



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**  
**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα**  
**ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**  
**Ερευνητική μονάδα Γεωλογίας**

---

**Μελέτη έκλυσης και συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια στην  
Δυτική Κρήτη**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Δέσποινα Α. Τσουκαλά**

Εξεταστική Επιτροπή

|                                    |                                                                                          |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Εμμανουήλ Μανούτσογλου</b>      | <b>Καθηγητής (επιβλέπων)</b>                                                             |
| <b>Νικόλαος Καλλίθρακας-Κόντος</b> | Καθηγητής                                                                                |
| <b>Κωνσταντίνος Ποτηριάδης</b>     | Δρ., Ειδικός Λειτουργός Επιστήμονας βαθμίδας Α',<br>Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας |

Φεβρουάριος 2017, Χανιά

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

Αφιερωμένη στον Αντώνη Πλυμάκη,  
πρωτοπόρο σπηλαιολόγο των Χανίων.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος «Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον» της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, από την οποία αποφοίτησα.

Από την θέση αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω, αρχικά, τον δάσκαλο μου, κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου, για την υπομονή και τη στήριξή του όλο αυτό το διάστημα και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κ. Νίκο Καλλίθρακα-Κόντο για την απλότητα και την βοήθειά του και κ. Κωνσταντίνο Ποτηριάδη για τις γνώσεις του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω, την κα. Μαρία Κολωβού, από το τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της Ε.Ε.Α.Ε., για την ουσιαστική βοήθειά της στις μετρήσεις, τον γεωλόγο κ.Βασίλη Σιμιτζή για τη συμβολή του στα σπήλαια του Ρεθύμνου και τον εκπαιδευτή καταδύσεων κ. Ορέστη Καραμάνο για τη βοήθεια του στην επίσκεψή μας στο υποθαλάσσιο σπήλαιο των ελεφάντων.

Η επίτευξη του στόχου της εργασίας αυτής, θα ήταν αδύνατη, χωρίς την συμπαράσταση των φίλων και μελών της σπηλαιολογικής ομάδας του ορειβατικού συλλόγου Χανίων και κυρίως του φίλου και εφόρου σπηλαιολογίας, κ.Γιώργο Μαζωνάκη, που απορώ γιατί ακόμα μου απαντά στο τηλέφωνο.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όσους περπατήσαμε, σκαρφαλώσαμε και χαθήκαμε παρέα.

# Μελέτη έκλυσης και συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια στην Δυτική Κρήτη

## Περίληψη

Μεγάλο ποσοστό της φυσικής ακτινοβολίας που δέχεται ο άνθρωπος, οφείλεται στην ακτινοβολία άλφα ( $\alpha$ ) που προκύπτει από την μεταστοιχείωση του ραδιενεργού ευγενούς αερίου που ονομάζεται ραδόνιο. Το στοιχείο αυτό ανήκει στην ραδιενεργή σειρά του ουρανίου και ανιχνεύεται στα πετρώματα, το έδαφος, το νερό, τον αέρα ακόμα και τα δομικά υλικά. Το ραδόνιο είναι μια από τις λίγες ουσίες που έχουν θεωρηθεί ότι είναι καρκινογόνες. Η βασική επίπτωση στην υγεία του ανθρώπου από το ραδόνιο είναι ο καρκίνος του πνεύμονα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση που χρησιμοποιείται από τους οργανισμούς World Health Organization και Environmental Protection Agency (US), το ραδόνιο ανήκει στα καρκινογενή κατηγορίας 1 και A αντίστοιχα (W.H.O., 1988; E.P.A., 1999) (Νικολακόπουλος et al., 2015). Η U.S. Environmental Protection Agency (2003) εκτιμά ότι το 13,4% των θανάτων από καρκίνο του πνεύμονα οφείλονται στο ραδόνιο. Στα πλαίσια λοιπόν πολύπλευρων ερευνών, ένα τμήμα των ερευνητών έχει επικεντρωθεί στο ιδιόμορφο περιβάλλον των σπηλαίων, καθώς αποτελούν μορφοτεκτονικές δομές που από την δομή αλλά και από την θέση και τον τρόπο δημιουργίας τους, μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην έρευνα σχετικά με την συγκέντρωση του ραδονίου στον αέρα.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, με χρήση παθητικών ανιχνευτών καταγραφής ιχνών (CR-39), έγιναν μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου και υπολογισμός της ενεργής δόσης ακτινοβολίας που δέχεται ο άνθρωπος σε 24 σπήλαια και σπηλαιοβάραθρα στην δυτική Κρήτη. Η διάθεση των ανιχνευτών και η επεξεργασία τους έγιναν από το τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας και εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο έκλυσης και συγκέντρωσης ραδονίου στα συγκεκριμένα σπήλαια.

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν διαφορετικές συγκεντρώσεις ραδονίου σε σπήλαια που βρίσκονται σε διαφορετικές λιθοστρωματογραφικές ενότητες. Τις μικρότερες τιμές συγκέντρωσης εμφανίζουν σπήλαια εντός ανθρακικών (καρστικών) σχηματισμών της ενότητας Τρυπαλίου (με μέσο όρο  $1.085 \text{ Bq/m}^3$ ). Υψηλότερες τιμές μετρήθηκαν σε σπήλαια που έχουν δημιουργηθεί σε σχηματισμούς του Νεογενούς – Τεταρτογενούς (με μέσο όρο  $2.022 \text{ Bq/m}^3$ ) και στα μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων (με μέσο όρο  $1.715 \text{ Bq/m}^3$ ). Οι τιμές συγκέντρωσης που μετρήθηκαν στα υπό

μελέτη σπήλαια δεν χαρακτηρίζονται ιδιαίτερα υψηλές, συγκρινόμενες με αντίστοιχα διεθνή δεδομένα. Επίσης σε σύγκριση με δημοσιευμένα στοιχεία από τον ελληνικό χώρο, είναι αρκετά μικρότερες από αυτές που μετρήθηκαν στο σπήλαιο των Πετραλώνων (με μέγιστη τιμή ίση με 88.000 Bq/m<sup>3</sup>) και παραπλήσιες με τις μετρήσεις στο σπήλαιο Περάματος (1.311 Bq/m<sup>3</sup>). Αυξημένες τιμές παρουσίασαν τα σπήλαια οι θέσεις των οποίων σχετίζονται άμεσα με ρηγματωγόνες ζώνες, ή συνδέονται με την ύπαρξη σιδηρομεταλλευμάτων στην περιοχή ανάπτυξής τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκέντρωσης ραδονίου για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στα υπό μελέτη σπήλαια και τα όρια ασφαλείας για την προστασία από ιοντίζουσες ακτινοβολίες που αναφέρονται στην Ε.Ε Οδηγία του 2013, η επίσκεψη και παραμονή στα υπό μελέτη σπήλαια, για εύλογα χρονικά διαστήματα, θεωρείται ακίνδυνη.

**Λέξεις κλειδιά:** Ραδόνιο, ραδιενέργεια, σπήλαια, ρήγματα, παθητικοί ανιχνευτές CR-39, ενεργή δόση ακτινοβολίας.

# **Study of radon exhalation and concentration in caves in Western Crete**

## **Abstract**

Much of the natural radiation that human accepts is due to alpha radiation which arises from the transmutation of radioactive noble gas called radon. This element belongs to the radioactive series of uranium and is detected in rocks, soil, water, air and even building materials. Radon is one of the few substances that are considered to be carcinogenic. The main impact on human health from radon is lung cancer. According to the classification used by the organizations World Health Organization, and Environmental Protection Agency (US), radon belongs to carcinogenic category 1 and A respectively (W.H.O., 1988; E.P.A., 1999) (Nikolakopoulos et al., 2015). H U.S. Environmental Protection Agency (2003) estimates that 13.4% of deaths from lung cancer are due to radon. So within multifaceted research, part of researchers has focused on the special environment of caves, as they are Morphotectonic structures that can contribute significantly to the research on the concentration of radon in air, as a result of their structure, position and the way in which they are created.

As part of this thesis, with the use of passive Solid State Nuclear Track Detectors (CR-39), measurements of radon concentration have been carried out and there has also been a calculation of the active radiation dose received by man in 24 caverns and caves in western Crete. The placing of the detectors and the processing was made by the Environmental Radioactivity Control section of Greek Atomic Energy Commission. The results were compared with the corresponding results of the International Bibliography and conclusions were reached on the factors which influence the release and concentration effect of radon in these caves.

More specifically, different radon concentrations were seen in caves located in different lithostratigraphical sections. The lowest concentrations are shown in caves within carbonate formations of Tripali unit (average  $1.085 \text{ Bq/m}^3$ ). Higher values were measured in caves created in formations of Neogene - Quaternary (with an average of  $2.022 \text{ Bq/m}^3$ ) and in metamorphic carbonate rocks of the Group of Plattenkalk (average of  $1.715 \text{ Bq/m}^3$ ). The concentration values measured in the studied caves are not qualified as very high compared with the corresponding international standards. Also, in comparison with published data from the Greek area, they appear quite lower than those measured in the cave of Petralona (with a maximum value of  $88.000 \text{ Bq/m}^3$ ) and close to the measurements in Perama Cave ( $1.311 \text{ Bq/m}^3$ ). Increased prices have been shown in caves' positions which are directly related to

rigmatogones zones, or are linked to the existence of iron in their development areas. According to the results of the radon concentration, measurements for the specific period of time in the under study caves as well as safety limits for protection against ionizing radiation, which are reported in EU/59/Directive 2013, visit and stay in the study caves for reasonable periods of time are considered harmless.

**Key words:** radon, caves, radioactivity, faults, effective dose, passive detectors CR-39.

## Περιεχόμενα

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| Περίληψη                                                                 | v   |
| Abstract                                                                 | vii |
| Κατάλογος Πινάκων                                                        | xi  |
| Κατάλογος Σχημάτων                                                       | xii |
| Κατάλογος Εικόνων                                                        | xiv |
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή                                                     | 15  |
| 1.1 Φυσικές και χημικές ιδιότητες ραδονίου .....                         | 18  |
| 1.2 Σχηματισμός, απορροή και διαφυγή ραδονίου .....                      | 24  |
| 1.2.1 Περιπτώσεις αυξημένης συγκέντρωσης ραδονίου.....                   | 33  |
| 1.3 Μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας .....                                 | 35  |
| 1.4 Ραδόνιο σε κτήρια .....                                              | 40  |
| 1.5 Επιπτώσεις στην υγεία – Όρια Ασφαλείας .....                         | 45  |
| Κεφάλαιο 2: Ραδόνιο σε σπήλαια .....                                     | 50  |
| 2.1 Αερισμός των σπηλαίων .....                                          | 53  |
| 2.2 Η επιρροή της θερμοκρασίας .....                                     | 58  |
| 2.3 Ο ρόλος των ρηγμάτων .....                                           | 64  |
| 2.4 Έρευνες σε σπήλαια .....                                             | 67  |
| Κεφάλαιο 3: Μετρητικές διατάξεις ανίχνευσης ραδονίου.....                | 74  |
| 3.1 Ενεργητικοί ανιχνευτές .....                                         | 75  |
| 3.2 Παθητικοί ανιχνευτές .....                                           | 77  |
| 3.2.1 Αρχή Λειτουργίας Ανιχνευτή CR-39.....                              | 82  |
| Κεφάλαιο 4: Γεωλογική επισκόπηση Δυτικής Κρήτης .....                    | 86  |
| 4.1 Σχηματισμοί Ομάδας Πλακωδών Ασβεστόλιθων και ενότητας Τρυπαλίου..... | 89  |
| 4.1.1 Νεογενείς Λεκάνες Β.Δ. Κρήτης .....                                | 96  |
| 4.2 Περιγραφή των προς μελέτη σπηλαίων .....                             | 101 |
| Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα .....                                           | 131 |
| 5.1 Συμπεράσματα .....                                                   | 139 |
| 5.1.1 Συζήτηση.....                                                      | 141 |
| Βιβλιογραφία                                                             | 143 |
| Παράρτημα                                                                | 158 |



## Κατάλογος Πινάκων

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 1: Ιστορική αναδρομή ανακαλύψεων σχετικών με την ραδιενέργεια.....                                                                               | 17  |
| Πίνακας 2: Φυσικές ιδιότητες ραδονίου.....                                                                                                               | 19  |
| Πίνακας 3: Ραδιενεργή σειρά ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ).....                                                                                           | 22  |
| Πίνακας 4: Ραδιενεργή σειρά θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ).....                                                                                            | 22  |
| Πίνακας 5: Ραδιενεργή σειρά ακτινίου ( $^{235}\text{U}$ ).....                                                                                           | 23  |
| Πίνακας 6: Περιεκτικότητα U (%) σε αντίστοιχα ορυκτά.....                                                                                                | 25  |
| Πίνακας 7: Περιεκτικότητα ουρανίου σε πετρώματα και ορυκτά.....                                                                                          | 25  |
| Πίνακας 8: Τυπικές περιεκτικότητες γνωστών ραδιενεργών στοιχείων σε πετρώματα.....                                                                       | 26  |
| Πίνακας 9: Τύπος πετρώματος κι εδάφους συναρτήσει συγκέντρωσης ραδονίου.....                                                                             | 26  |
| Πίνακας 10: Ρυθμός διαφυγής ραδονίου από πετρώματα σε έρευνα στην Ιταλία.....                                                                            | 31  |
| Πίνακας 11: Περιεκτικότητα ραδίου, ρυθμός διαφυγής μάζας και απορροή ραδονίου σε διάφορα δείγματα από έρευνα στην Ινδία.....                             | 31  |
| Πίνακας 12: Ισοδυναμίες της ιστορικής μονάδας Working Level.....                                                                                         | 36  |
| Πίνακας 13: Τιμές παράγοντα ισοδυναμίας (F) σε μελέτες σε σπήλαια ανά τον κόσμο.....                                                                     | 37  |
| Πίνακας 14: Ιστορικές μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας και σχέσεις ισοδυναμίας τους.....                                                                   | 39  |
| Πίνακας 15: Όρια συγκέντρωσης στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών.....                                                                                     | 44  |
| Πίνακας 16: Ετήσιες ισοδύναμες δόσεις από αντίστοιχες πηγές έκθεσης.....                                                                                 | 48  |
| Πίνακας 17: Όρια ασφαλείας για την ακτινοβολία ραδονίου.....                                                                                             | 49  |
| Πίνακας 18: Εθνικά όρια ασφαλείας.....                                                                                                                   | 49  |
| Πίνακας 19: Εποχιακή διακύμανση συγκέντρωσης ραδονίου στο Manita Pec Cave, της Κροατίας.....                                                             | 60  |
| Πίνακας 20: Καταγραφή αποτελεσμάτων συγκέντρωσης ραδονίου από διεθνής έρευνες σε σπήλαια ((X): Χειμώνας (A): Άνοιξη (K): Καλοκαίρι.....                  | 69  |
| Πίνακας 21: Παραδοχές χρόνου παραμονής αντίστοιχα με την κατηγορία επισκέπτη.....                                                                        | 73  |
| Πίνακας 22: Εκτιμώμενη δόση ακτινοβολίας σε αντίστοιχο χρόνο παραμονής ανά κράτος.....                                                                   | 73  |
| Πίνακας 23: Σύνοψη κυριότερων χαρακτηριστικών ανιχνευτών ραδονίου.....                                                                                   | 81  |
| Πίνακας 24: Ονοματολογία του μεταμορφωμένου συστήματος της Κρήτης.....                                                                                   | 90  |
| Πίνακας 25: Ονόματα των προς μελέτη σπηλαίων, περιοχή εμφάνισής τους και χαρακτηρισμός τους σύμφωνα με την διεύθυνση ανάπτυξής τους.....                 | 102 |
| Πίνακας 26: Γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος της εισόδου των προς μελέτη σπηλαίων και σπηλαιοβαράθρων.....                                         | 107 |
| Πίνακας 27: Ταξινόμηση σπηλαίων σύμφωνα με την λιθοστρωματογραφική τους θέση.....                                                                        | 108 |
| Πίνακας 28: Κωδικοί μετρητών CR-39 και ημερομηνίες εισόδου και εξόδου τους στα αντίστοιχα σπήλαια.....                                                   | 132 |
| Πίνακας 29: Αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης ραδονίου στα υπό μελέτη σπήλαια.....                                                                     | 133 |
| Πίνακας 30: Συγκέντρωση ραδονίου στα υπό μελέτη σπήλαια σύμφωνα με την λιθοστρωματογραφική τους θέση.....                                                | 135 |
| Πίνακας 31: Τιμές ενεργής δόσης ακτινοβολίας που δέχεται ένας επισκέπτης E(1), σπηλαιολόγος E(2) και ένας εργαζόμενος E(3) σύμφωνα με την εξίσωση 3..... | 137 |
| Πίνακας 32: Μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος παραμονής (ώρες/έτος) για εργαζόμενους σε αντίστοιχο σπήλαιο.....                                              | 138 |

# Κατάλογος Σχημάτων

|                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 1: Απεικόνιση ισοτόπων των τριών φυσικών ραδιενεργών σειρών διάσπασης.....                                                                                                                   | 20 |
| Σχήμα 2: Θυγατρικά ραδονίου και χρόνος ημιζωής τους.....                                                                                                                                           |    |
| Σχήμα 3: Σχηματισμός και απορροή ραδονίου από γεωλογικούς σχηματισμούς- πιθανές διαδρομές- Διαφυγή ραδονίου από το έδαφος.....                                                                     | 27 |
| Σχήμα 4: Διαδικασία απορροής, μετακίνησης και διαφυγής ραδονίου από το έδαφος.....                                                                                                                 | 30 |
| Σχήμα 5: Σχεδιάγραμμα παραγόντων που επηρεάζουν την απορροή, μετακίνηση και διαφυγή του ραδονίου .....                                                                                             | 32 |
| Σχήμα 6: Απορροή ραδονίου από σιδηρούχο σχηματισμό.....                                                                                                                                            |    |
| Σχήμα 7: Υποθετικό μοντέλο για την υψηλή συγκέντρωση ραδονίου σε γεωθερμικές πηγές .....                                                                                                           | 34 |
| Σχήμα 8: Είσοδος ραδονίου στα κτήρια. ....                                                                                                                                                         | 41 |
| Σχήμα 9: Χάρτης απεικόνισης περιοχών αυξημένων συγκεντρώσεων ραδονίου στην Ελλάδα. ....                                                                                                            | 42 |
| Σχήμα 10: Κατανομή συχνότητας-συγκέντρωσης του ραδονίου σε κατοικίες στην Ελλάδα.....                                                                                                              | 43 |
| Σχήμα 11: Διάγραμμα κατανομής συγκέντρωσης ραδονίου σε σχολικά κτήρια στην Ελλάδα .....                                                                                                            | 43 |
| Σχήμα 12: Πιθανές καταστάσεις στις οποίες μπορούν να βρεθούν τα θυγατρικά προϊόντα του ραδονίου.....                                                                                               | 47 |
| Σχήμα 13: Συνεισφορά των διαφόρων πηγών ακτινοβολίας στη μέση ετήσια δόση .....                                                                                                                    | 47 |
| Σχήμα 14: Πηγές έκθεσης σε ακτινοβολία παγκοσμίως (δόσεις σε mSv).....                                                                                                                             | 47 |
| Σχήμα 15: Χάρτης με τις κύριες εμφανίσεις των ασβεστολιθικών πετρωμάτων στην Ελλάδα σπηλαίων και σπηλαιοβαθρών, με αριθμό μεγαλύτερο από 10.000, όπως αναπαριστά ο και τα μεγαλύτερα σπήλαια ..... | 51 |
| Σχήμα 16: Παράγοντες που επηρεάζουν την ισορροπία συγκέντρωσης ραδονίου σε υπόγεια κοιλότητα .....                                                                                                 | 55 |
| Σχήμα 17: Απεικόνιση τούνελ μελέτης κυκλοφορίας αέρα.....                                                                                                                                          | 56 |
| Σχήμα 18: Διαδικασία δημιουργίας και αερισμού σπηλαίου - Ισοζύγιο μάζας Rn και CO <sub>2</sub> ...59                                                                                               |    |
| Σχήμα 19: Χρονοσειρές μετεωρολογικών συνθηκών και σύστασης αέρα στο σπήλαιο Hollow Ridge της Φλόριντας.....                                                                                        | 61 |
| Σχήμα 20: Χωρική κατανομή συγκέντρωσης ραδονίου συναρτήσει εποχιακής διακύμανσης στο σπήλαιο Manita Pec Cave, της Κροατίας .....                                                                   | 62 |
| Σχήμα 21: Γραφήματα κατανομής εβδομαδιαίας C <sub>RN</sub> και θερμοκρασίας στο σπήλαιο Nerja Cave, της Ισπανίας.....                                                                              | 63 |
| Σχήμα 22: Διάγραμμα συγκέντρωσης ραδονίου και ραδίου συναρτήσει της απόστασης κατά μήκος ρήγματος .....                                                                                            | 66 |
| Σχήμα 23: Απεικόνιση αποτελεσμάτων της κατανομής της συγκέντρωσης του ραδονίου σε σχέση με την λογαριθμική κατανομή περιεκτικότητας ραδονίου σε 220 σπήλαια παγκόσμιας κλίμακας.....               | 68 |
| Σχήμα 24: Γράφημα συσχέτισης χρόνου παραμονής (ώρες/έτος) για αντίστοιχη συγκέντρωση ραδονίου σύμφωνα με ετήσια όρια επιτρεπόμενης ενεργής δόσης με F=0,4.....                                     | 72 |
| Σχήμα 25: Σχηματική αναπαράσταση της επιφάνειας ανιχνευτή πυρηνικών ιχνών μετά από χημική επεξεργασία για χρονικό διάστημα t .....                                                                 | 78 |
| Σχήμα 26: Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων που διέρχεται το σχήμα του ίχνους κατά τη διαδικασία της χημικής επεξεργασίας του ανιχνευτή .....                                                      | 78 |
| Σχήμα 27: Σχηματική απεικόνιση ίχνους από σωματίδιο α.....                                                                                                                                         | 85 |
| Σχήμα 28: Εμφανίσεις της Ομάδας Πλακωδών Ασβεστολίθων και του Φυλλιτικού Καλύμματος στην Πελοπόννησο και την Κρήτη .....                                                                           | 87 |
| Σχήμα 29: Τεκτονική διάταξη των τεκτονοστρωματογραφικών ενοτήτων στην Κρήτη . ....                                                                                                                 | 87 |

|                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 30: Στρωματογραφικές - τεκτονικές Ενότητες της νήσου Κρήτης (Ενότητα Plattenkalk, Ενότητα Τρυπαλίου, Φυλλιτική-Χαλαζιτική σειρά, ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, ζώνη Πίνδου.....                             | 92  |
| Σχήμα 31: Συγκριτικές λιθοστρωματογραφικές στήλες των Πλακωδών Ασβεστολίθων της Κρήτης .....                                                                                                                | 93  |
| Σχήμα 32: Τομή με μεταμορφωμένα ανθρακικά της ενότητας Madarakalke που στην συνέχεια πήρε το όνομα ενότητα του Τρυπαλίου, τοποθετούνται ως υποκείμενα της ανώτερης σειράς των φυλλιτών, ραουβακών κτλ. .... | 94  |
| Σχήμα 33: Τομή με μεταμορφωμένα ανθρακικά της ενότητας του Τρυπαλίου τοποθετούνται δυτικά του Ομαλού με ρήγμα τεκτονικός υποκείμενα της Φυλλιτικής Χαλαζιτικής Σειράς. ....                                 | 95  |
| Σχήμα 34: Γεωλογικός Χάρτης των τριών Νεογενών λεκανών ιζηματογένεσης.....                                                                                                                                  | 100 |
| Σχήμα 35: Κάτοψη σπηλαίου Γερανίου, Ρεθύμνου.....                                                                                                                                                           | 116 |
| Σχήμα 36: Χαρτογράφηση σπηλαίου Λεντάκα, Λιτσάρδα, Χανίων .....                                                                                                                                             | 117 |
| Σχήμα 37: Χαρτογράφηση σπηλαίου Λεντάκα, Λιτσάρδα, Χανίων .....                                                                                                                                             | 118 |
| Σχήμα 38:Χαρτογράφηση του σπηλαίου Λαχταριδέ στ' Ασκορδαλού, Χανίων. ....                                                                                                                                   | 124 |
| Σχήμα 39: Τομή B-N σπηλαίου των Ελεφάντων στο Δράπανο, Αποκορώνου, Χανίων.....                                                                                                                              | 125 |
| Σχήμα 40: Χαρτογράφηση σπηλαίου Σκορδουλάκια Ασφένδου, Σφακίων, Χανίων.....                                                                                                                                 | 127 |
| Σχήμα 41: Χαρτογραφική απεικόνιση σπηλαίου Ασφένδου, Σκορδουλάκια, Χανίων .....                                                                                                                             | 127 |
| Σχήμα 42: Χαρτογράφηση σπηλαιοβάραθρου Γουργούθακα, Λευκά Όρη, Χανίων .....                                                                                                                                 | 129 |
| Σχήμα 44: Κατανομή συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια της Ελλάδας. ....                                                                                                                                       | 131 |
| Σχήμα 45: Συγκριτική απεικόνιση συγκέντρωσης ραδονίου στα υπό μελέτη σπήλαια και στα σπήλαια της Ιταλίας. ....                                                                                              | 134 |

## Κατάλογος Εικόνων

|                                                                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 1: Φωτογραφία του Φρήντιχ Ερστ Ντόρν .....                                                                                                                                           | 15  |
| Εικόνα 2: Εικόνες από ίχνη διασπάσεων ραδονίου σε διαφορετικές αναλύσεις .....                                                                                                              | 80  |
| Εικόνα 3: Παθητικών ανιχνευτής τύπου CR-39. ....                                                                                                                                            | 83  |
| Εικόνα 4: Μικροσκόπιο Leica. ....                                                                                                                                                           | 85  |
| Εικόνα 5: Τμήμα του Γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:500.000 .....                                                                                                                 | 86  |
| Εικόνα 6: Γενικός Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδος, Νήσος Κρήτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών υπό κλίμακα 1: 200.000 και απεικόνιση των θέσεων των υπό μελέτη σπηλαίων..... | 103 |
| Εικόνα 7: Υπόμνημα γενικού Γεωλογικού Χάρτη Ελλάδος, Νήσος Κρήτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών .....                                                                 | 104 |
| Εικόνα 8: Νεοτεκτονικός- γεωλογικός χάρτης της βόρειας ζώνης του νομού Χανίων Κρήτης υπό κλίμακα 1:50.000 και απεικόνιση των θέσεων των υπό μελέτη σπηλαίων.....                            | 105 |
| Εικόνα 9: Υπόμνημα Νεοτεκτονικού - γεωλογικού χάρτη της βόρειας ζώνης του νομού Χανίων Κρήτης .....                                                                                         | 106 |
| Εικόνα 10: Εκκλησάκι Αγίου Προδρόμου Ιωάννη – σπήλαιο Ντάμιαλης, στο Καστέλι, Χανίων. ....                                                                                                  | 109 |
| Εικόνα 11: Η θέση του σπηλαίου Ντάμιαλη σε σχηματισμούς της ζώνης της Πίνδου στην περιοχή.....                                                                                              | 110 |
| Εικόνα 12: Διαμπερές σπήλαιο στο Καστέλι, Κισσάμου, νομός Χανίων. ....                                                                                                                      | 110 |
| Εικόνα 13: Είσοδος σπηλαίου Μ.Α.Ι.Χ. στην Σούδα, Χανίων.....                                                                                                                                | 111 |
| Εικόνα 14: Αεροφωτογραφία απεικόνισης στιγμάτων εισόδου σπηλαίων στην Σούδα. ....                                                                                                           | 111 |
| Εικόνα 15: Είσοδος σπηλαίου «Λιθωμένης κοπελιάς» στην Κάϊνα, Αποκορώνου, Χανίων                                                                                                             | 112 |
| Εικόνα 16: Είσοδος σπηλαίου Σιμονέλι στα παράκτια του νομού Ρεθύμνης.....                                                                                                                   | 113 |
| Εικόνα 17: Σπήλαιο και εκκλησάκι Αγίου Αντωνίου στο Ατσιπόπουλο, Ρεθύμνου. ....                                                                                                             | 114 |
| Εικόνα 18: Είσοδος σπηλαίου Γερανίου στο Γεράνι, Χανίων .....                                                                                                                               | 115 |
| Εικόνα 19: Είσοδος Σπηλαίου Τρύπα της Λεντάκα στο Μελιδόνι, Αποκορώνου, Χανίων..                                                                                                            | 117 |
| Εικόνα 20: Είσοδος σπηλαίου Ζουρές ή των Αγίων 98 Πατέρων στον Αζογυρέ, Σελίνου, Χανίων .....                                                                                               | 119 |
| Εικόνα 21: Είσοδος σπηλαιοβάραθρου του Τζανή, Ομαλός, Χανίων.....                                                                                                                           | 120 |
| Εικόνα 22: Χαρτογραφήσεις σπηλαιοβάραθρου «του Τζανή» στον Ομαλό, Χανίων .....                                                                                                              | 121 |
| Εικόνα 23: Είσοδος σπηλαίου Νεροσπηλιά στο Σαμολί, Ακρωτηρίου, Χανίων.....                                                                                                                  | 121 |
| Εικόνα 24: Ο πρωτοπόρος σπηλαιολόγος των Χανίων Αντώνης Πλυμάκης στην είσοδο του σπηλαίου στον Κουρουπητό, Χανίων.....                                                                      | 122 |
| Εικόνα 25: Είσοδος σπηλαίου Σπήλιος Σπήλιος στ' Ασκορδαλού, Χανίων.....                                                                                                                     | 123 |
| Εικόνα 26: Είσοδος σπηλαιοβαράθρου Δαφνέ, Λιτσάρδα, Αποκορώνου, Χανίων .....                                                                                                                | 123 |
| Εικόνα 27: Σπήλαιο Ασφένδου στα Σκορδουλάκια, Ασφένδου, Χανίων .....                                                                                                                        | 126 |
| Εικόνα 28: Είσοδος σπηλαίου LO1(αριστερά) - δεξαμενή νερού σπηλαίου LO23(δεξιά)...                                                                                                          | 128 |
| Εικόνα 29: Βαθύτερο σημείο σπηλαιοβάραθρου Γουργούθακα, Λευκά Όρη Χανίων .....                                                                                                              | 130 |
| Εικόνα 30: Άδεια χορήγησης εισόδου σε σπήλαια της Δυτικής Κρήτης στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. ....                                                                     | 158 |
| Εικόνα 31: Φύλλο χάρτου Αλικιανού υπό κλίμακα 1:50.000 (Ι.Γ.Μ.Ε, 1969). ....                                                                                                                | 159 |
| Εικόνα 32: Φύλλο χάρτου Βρυσσών υπό κλίμακα 1:50.000 (Ι.Γ.Μ.Ε 1985-1987). ....                                                                                                              | 160 |
| Εικόνα 33: Φύλλο χάρτου Καστελλίου υπό κλίμακα 1:50.000 (Ι.Γ.Μ.Ε 1968).....                                                                                                                 | 161 |
| Εικόνα 34: Φύλλο χάρτου Χανίων υπό κλίμακα 1:50.000 (Ι.Γ.Μ.Ε 1968).....                                                                                                                     | 162 |
| Εικόνα 35: Φύλλο χάρτου Παλαιόχωρας υπό κλίμακα 1:50.000 (Ι.Γ.Μ.Ε 1994-1995). ....                                                                                                          | 163 |
| Εικόνα 36: Φύλλο χάρτου Πλατανιά υπό κλίμακα 1:50.000 (Ι.Γ.Μ.Ε 1956). ....                                                                                                                  | 164 |
| Εικόνα 37: Φύλλο χάρτου Ρεθύμνου υπό κλίμακα 1:50.000 (Ι.Γ.Μ.Ε 1980-1984).....                                                                                                              | 165 |

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Το γεγονός ότι στην καθημερινή του ζωή ο άνθρωπος, συνυπάρχει με φυσικές και τεχνητές πηγές ακτινοβολήσης, οδήγησε τους επιστήμονες τα τελευταία χρόνια, σε παγκόσμιο επίπεδο, στην μελέτη των ιδιοτήτων τους και την αλληλεπίδρασή τους με τον ανθρώπινο οργανισμό. Φυσικά ραδιοϊσότοπα ανιχνεύονται στο νερό, τον αέρα, τα πετρώματα, το έδαφος ακόμη και τα οικοδομικά υλικά και έρχονται σε άμεση επαφή με τον άνθρωπο και τις δραστηριότητες του, καθιστώντας επιτακτική τη μελέτη τους, καθώς μερικά εξ αυτών προκαλούν σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Το ραδόνιο (*Radon*) ανακαλύφθηκε το 1900, από τον Γερμανό φυσικό Φρήντιχ Ερστ Ντόρν (*Friedrich Ernst Dorn*) και αποτελεί το τρίτο κατά σειρά φυσικό ραδιενεργό στοιχείο που βρέθηκε μετά το ράδιο και το πολώνιο (Dorn, 1900), καθώς το 1898, οι Curies και Schmidt ανακάλυψαν την ραδιενεργή σειρά του θορίου. Αρχικά, το ραδόνιο ονομάστηκε «απόρροια ραδίου» (*radium emanation*), διότι προερχόταν από υλικά που περιείχαν ράδιο, ενώ τελικά, το 1923, προτάθηκε το όνομα ραδόνιο. Το 1904, οι Geisel and Debierne ανακάλυψαν το ακτίνιο (Ac). Το 1908, οι Ramsay και Gray, απομόνωσαν το ραδόνιο, προσδιόρισαν την πυκνότητα του και διαπίστωσαν ότι αποτελεί το βαρύτερο από τα ευγενή αέρια (Ramsay and Gray, 1910).



**Εικόνα 1:** Φωτογραφία του Φρήντιχ Ερστ Ντόρν [1].

Επιδημιολογικές μελέτες βασισμένες σε διάφορες ομάδες πληθυσμών, όπως ανθρακωρύχους, οδήγησαν στην συσχέτιση του καρκίνου του πνεύμονα με το ραδόνιο και τα θυγατρικά του. Πιο συγκεκριμένα, η επιρροή του ραδονίου στον ανθρώπινο οργανισμό ήταν γνωστή από τον 16ο αιώνα, όταν ο γιατρός Agricola George, το 1556, παρατήρησε ότι ανθρακωρύχοι που δούλευαν για περισσότερα από 10 χρόνια στα ορυχεία του όρους Erzgebirge στα σύνορα Γερμανίας-Τσεχοσλοβακίας, για εξόρυξη μεταξύ άλλων και του ορυκτού πισσουρανίτη, κύρια πηγή χημικής παραγωγής ουρανίου και ραδίου, παρουσίασαν επιδημία καρκίνου του πνεύμονα (Waxweiler, 1981). Παρόμοια φαινόμενα είχαν παρατηρηθεί και σε μεταλλωρύχους στο Jachymon της Βοημίας. Γεγονότα που αποτέλεσαν αιτία συστηματικής μελέτης για την περαιτέρω διερεύνηση και εξήγηση των φαινομένων αυτών. Γνώσεις σχετικές με το ραδόνιο και την ραδιενέργεια, είναι αποτέλεσμα συμβολής πολλών ερευνητών. Ιστορική αναδρομή ανακαλύψεων σχετικών με την ραδιενέργεια παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Στο ραδόνιο οφείλεται περίπου το μισό ποσοστό της ετήσιας ραδιενεργού δόσης, που προσλαμβάνει ο άνθρωπος από φυσικές πηγές ραδιενέργειας (UNSCEAR, 2008). Έτσι, διεθνής και ευρωπαϊκές επιτροπές που ασχολούνται με την προστασία από ραδιενεργή ακτινοβολία, συνεχίζουν την προσπάθεια τους, με σκοπό την θέσπιση αντιπροσωπευτικών μέτρων προστασίας και ορίων ασφαλείας για το γενικό πληθυσμό και εργαζομένους, σε χώρους με αυξημένα επίπεδα συγκέντρωσης ραδονίου όπως ορυχεία, σπήλαια και ιαματικές πηγές.

Η σημαντική ανακάλυψη του ραδονίου και η μελέτη διαφυγής και συγκέντρωσης του, έχει φανεί χρήσιμη εκτός από την προστασία της ανθρώπινης υγείας και την ασφαλή παραμονή του ανθρώπου σε κτήρια και κατοικίες, σε επισκέπτες στα περιβάλλοντα των σπηλαίων, που είναι αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας. Επίσης, η ανακάλυψη αυτή, βοήθησε και σε πολλά άλλα επιστημονικά πεδία, όπως την εξερεύνηση της γεωθερμικής ενέργειας και των γεωθερμικών πεδίων (Balcazar et al., 1991), την παρακολούθηση της ηφαιστειακής δραστηριότητας (Seidel et al., 1984; Baubron et al., 1991), την πρόβλεψη των σεισμών (Hauksson and Goddard, 1981; Singh et al., 1991; Wattananikorn et al., 1998; Planinic et al., 2001; Οικονομόπουλος, 2008) και τη χαρτογράφηση των ρηγμάτων (Fytikas et al., 1999; Al-Tamini and Abumurad, 2001; Guerra and Lombardi, 2001; Atallah et al., 2001; Baubron et al., 2002; Ajayi and Adepelumi, 2002).

**Πίνακας 1:** Ιστορική αναδρομή ανακαλύψεων σχετικών με την ραδιενέργεια (Τροποποιημένος από: Cothorn and Smith, 1987).

|               |                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1597</b>   | Ο Agricola παρατήρησε υψηλό επίπεδο καρκίνου του πνεύμονα στους ανθρακωρύχους του όρους Ertz (Agricola, 1556)                                                                                                             |
| <b>1896</b>   | Ο Becquerel ανακάλυψε την ραδιενεργή σειρά του Ουρανίου (Becquerel, 1896)                                                                                                                                                 |
| <b>1898</b>   | Οι Curies και Schmidt ανακάλυψαν την ραδιενεργή σειρά του Θορίου και τα στοιχεία Ράδιο και Πολώνιο                                                                                                                        |
| <b>1899</b>   | Οι Thomson και Rutherford παρουσίασαν ότι η ραδιενέργεια προκαλεί ιονισμό. Ο Rutherford ανακάλυψε τα σωματίδια α και β, το θορόνιο και το ονόμασε απόρροια «emanation» (Rutherford and Owens, 1899)                       |
| <b>1900</b>   | Ο Dorn ανακάλυψε τη διάσπαση στη σειρά του $^{238}\text{U}$ και την απορροή Ραδονίου                                                                                                                                      |
| <b>1901</b>   | Οι Rutherford και Brooks παρουσίασαν ότι το ραδόνιο είναι ραδιενεργό αέριο. Ανακάλυψη ενεργητικών αποθεμάτων του Θορίου από τον Rutherford και του Ραδίου από τους Curies (Rutherford, 1900; Rutherford and Brooks, 1901) |
| <b>1902</b>   | Οι Rutherford και Soddy ανακάλυψαν την μεταστοιχείωση. Ο Thomson ανακάλυψε το ραδόνιο στο νερό της βρύσης                                                                                                                 |
| <b>1903</b>   | Οι Rutherford and Soddy ανέπτυξαν εξισώσεις που περιγράφουν την ραδιενεργή διάσπαση (Rutherford and Soddy, 1902)                                                                                                          |
| <b>1904</b>   | Οι Geisel and Debiere ανακάλυψαν το ακτίνιο (Ac)                                                                                                                                                                          |
| <b>1908</b>   | Οι Ramsay και Gray απομόνωσαν το ραδόνιο, προσδιόρισαν την πυκνότητα του και διαπίστωσαν ότι αποτελεί το βαρύτερο από τα ευγενή αέρια (Ramsay and Gray, 1910)                                                             |
| <b>1913</b>   | Ο Arnstein προσδιόρισε επιδερμοειδές καρκίνωμα σε αυτοψία ανθρακωρύχου. Ο Fajan ανακάλυψε την ομάδα των νόμων μετάπτωσης των στοιχείων (Fajan, 1913)                                                                      |
| <b>1914</b>   | Πρώτη χρήση Ραδονίου για ιατρικούς λόγους                                                                                                                                                                                 |
| <b>1925</b>   | Πρώτη αναφορά του ονόματος του Ραδονίου στην βιβλιογραφία                                                                                                                                                                 |
| <b>1940 s</b> | Παρουσιάζεται αιτιώδης σχέση μεταξύ Ραδονίου και καρκίνου του πνεύμονα                                                                                                                                                    |
| <b>1955</b>   | Προτείνεται η έννοια του working level (WL)                                                                                                                                                                               |
| <b>1984</b>   | Ανακάλυψη υψηλών επιπέδων ραδονίου στα κτήρια στο the Reading Prong                                                                                                                                                       |

## 1.1 Φυσικές και χημικές ιδιότητες ραδονίου

Με τον όρο φυσική ραδιενέργεια εννοούμε την ιοντίζουσα ακτινοβολία από πηγές που προϋπάρχουν στη φύση ή δημιουργούνται με τρόπο φυσικό σε αντίθεση με τη ραδιενέργεια που εκλύεται από ανθρώπινες δραστηριότητες, τεχνητή ραδιενέργεια. Η φυσική ραδιενέργεια κατατάσσεται σε δύο κατηγορίες:

- Την κοσμική ακτινοβολία, δηλαδή το σύνολο της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που δέχεται η γη από κοσμικές διεργασίες.
- Την γήινη ακτινοβολία, δηλαδή το σύνολο της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ραδιενεργά ισότοπα που βρίσκονται στο φλοιό της γης.

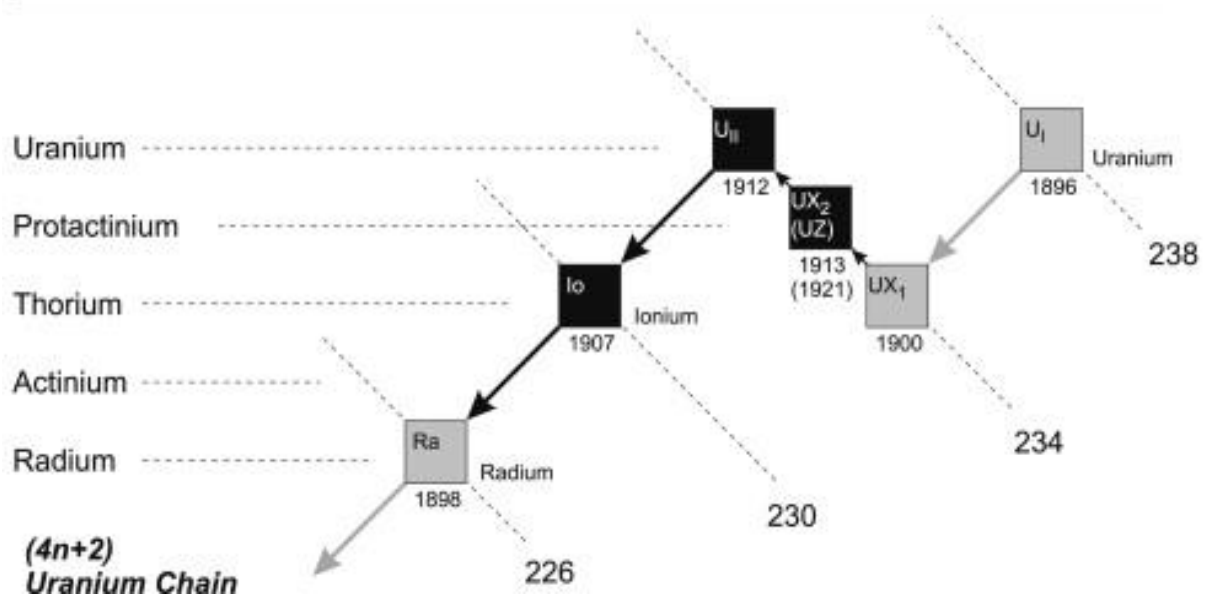
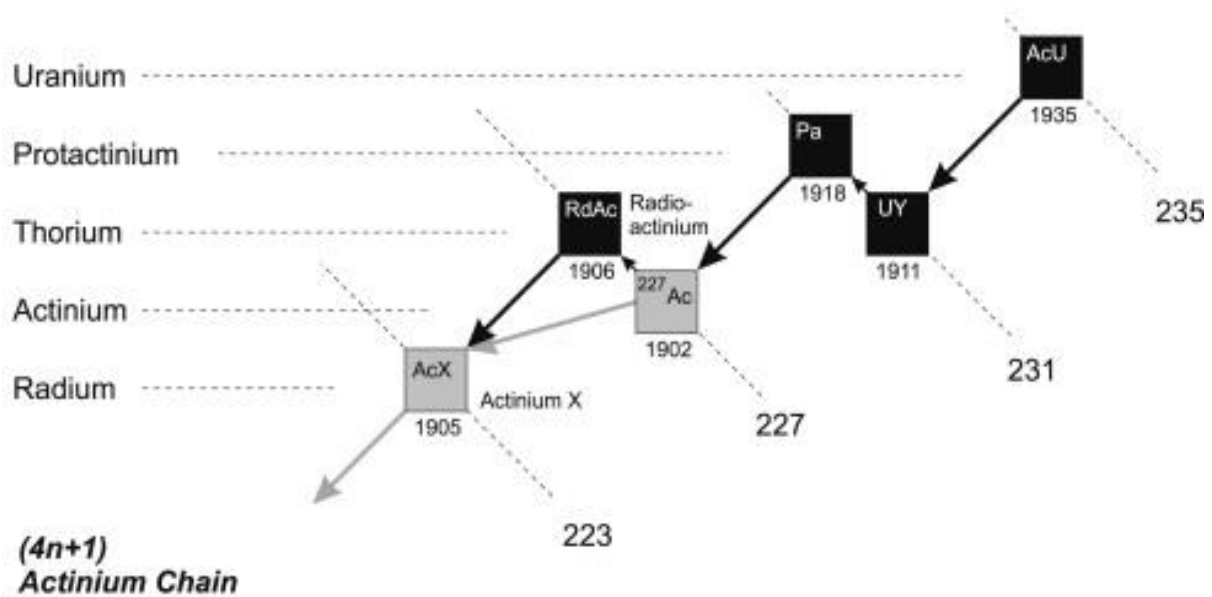
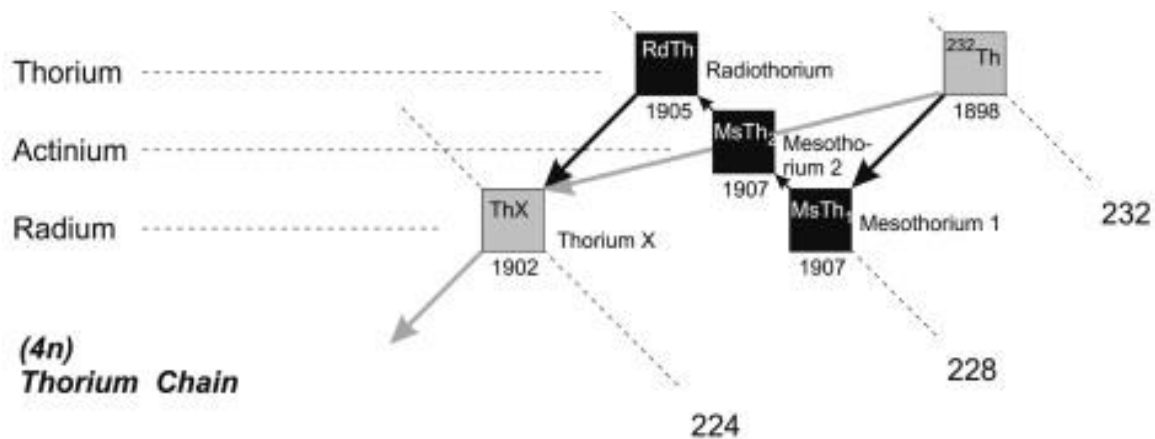
Στη δεύτερη αυτή κατηγορία ανήκουν τα μέλη των τριών φυσικών ραδιενεργών σειρών του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ), του θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ) και του ακτινίου ( $^{235}\text{U}$ ) παρουσιάζοντας αντίστοιχα τα εξής φυσικά θυγατρικά ραδιοϊσότοπα ραδίου  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  και  $^{223}\text{Ra}$  και αντίστοιχα ραδονίου, το ραδόνιο ( $^{222}\text{Rn}$ ), το θορόνιο ( $^{220}\text{Rn}$ ) και το ακτίνιο ( $^{219}\text{Rn}$ ). Στο σχήμα 1 και τους πίνακες 3, 4, 5 παρουσιάζονται αναλυτικά οι ραδιενεργές αυτές σειρές καθώς ο χρόνος ημιζωής των θυγατρικών ισότοπων τους, το είδος της ακτινοβολίας που εκπέμπουν και η ενέργεια αποδιέγερσης τους. Σημειώνεται ότι τις τελευταίες δεκαετίες έχουν παραχθεί μερικές εκατοντάδες τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων, τα οποία περιλαμβάνουν τα γνωστά καίσιο ( $^{137}\text{Cs}$ ), στρόντιο ( $^{90}\text{Sr}$ ) και ιώδιο ( $^{131}\text{I}$ ).

Το φυσικό ραδιενεργό στοιχείο ραδόνιο, με σύμβολο Rn στον περιοδικό πίνακα, είναι ένα άχρωμο, άγευστο και άοσμο ευγενές αέριο που αποτελεί παράγωγο της σειράς διάσπασης του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ) (Martin, 1991; Atwood, 1992). Μέχρι σήμερα έχουν ανακαλυφθεί 39 ισοτοπικές μορφές του ραδονίου με ατομικό αριθμό από 193 έως 231, αριθμός που ενδέχεται να αυξηθεί στο μέλλον (Fry and Thoennessen, 2013). Το πιο σταθερό του ισότοπο είναι το  $^{222}\text{Rn}$  (222) με χρόνο ημιζωής 3,82 ημέρες και ατομικό αριθμό 86. Οι χρόνοι ημιζωής των άλλων ισοτόπων του ραδονίου είναι μικρότεροι από μία ώρα, εκτός από του  $^{210}\text{Rn}$  (2,5 ώρες) και του  $^{211}\text{Rn}$  (14,7 ώρες) (Cothorn and Smith, 1987), για τον λόγο αυτόν όταν στην συνέχεια θα αναφέρεται ο όρος ραδόνιο θα πρόκειται για το ισότοπο 222. Το ραδόνιο είναι το βαρύτερο μέλος της ομάδας των ευγενών αερίων, περίπου 100 φορές βαρύτερο από το υδρογόνο και 7,5 φορές από τον αέρα. Όταν ψύχεται κάτω από το σημείο υγροποίησης του, φωσφορίζει έντονα (*brilliant phosphorescence*) και γίνεται κίτρινο σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και κόκκινο-πορτοκαλί σε θερμοκρασία του υγρού αέρα (Wilkening, 1990). Όπως όλα τα ευγενή αέρια, έτσι και το ραδόνιο, έχει συμπληρωμένη τη στιβάδα σθένους του. Η ηλεκτρονιακή δομή του

ατόμου του είναι  $1s^2 2s^2 2p^6 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$ , που υποδεικνύει πολύ περιορισμένη χημική δραστηριότητα. Ωστόσο, η σχετικά χαμηλή ενέργεια ιοντισμού, ίση με 10,74eV, του επιτρέπει να λαμβάνει μέρος σε έναν περιορισμένο αριθμό χημικών αντιδράσεων. Το ραδόνιο, όπως και το ξένο, μπορεί να αντιδράσει με το φθόριο, παράγοντας το φθόριο του ραδονίου ( $RnF_4$ ) (CRC, 2001). Επίσης, προσροφάται εύκολα στον ξυλάνθρακα και απελευθερώνεται από αυτόν με θέρμανση στους 350°C (Amgarou, 2002). Οι φυσικές ιδιότητες του ραδονίου συγκεντρώνονται στον πίνακα 2.

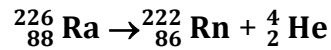
**Πίνακας 2:** Φυσικές ιδιότητες ραδονίου (Cothorn and Smith, 1987).

| Property                                                                     | Value                                  |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Boiling point                                                                | -61.8°C                                |
| Melting point                                                                | -71°C                                  |
| Critical temperature                                                         | 104°C                                  |
| Critical pressure                                                            | 62 atmospheres                         |
| Density at normal temperature and pressure                                   | 9.96 kg m <sup>-3</sup>                |
| Volume of 27.03 pCi at normal temperature and pressure                       | 1.6 × 10 <sup>-20</sup> m <sup>3</sup> |
| Vapor pressure at                                                            |                                        |
| - 144.0°C                                                                    | 0.13 kPa                               |
| - 126.3°C                                                                    | 1.3 kPa                                |
| - 111.3°C                                                                    | 5.3 kPa                                |
| - 99.0°C                                                                     | 13 kPa                                 |
| - 71.0°C                                                                     | 53 kPa                                 |
| - 61.8°C                                                                     | 100 kPa                                |
| Coefficients of solubility <sup>b</sup> at atmospheric pressure in water at: |                                        |
| 0°C                                                                          | 0.507                                  |
| 10°C                                                                         | 0.340                                  |
| 20°C                                                                         | 0.250                                  |
| 30°C                                                                         | 0.195                                  |
| 37°C                                                                         | 0.167                                  |
| 50°C                                                                         | 0.138                                  |
| 75°C                                                                         | 0.114                                  |
| 100°C                                                                        | 0.106                                  |
| Coefficient of solubility in:                                                |                                        |
|                                                                              | at 37°C                                |
| Absolute alcohol                                                             | —                                      |
| Acetone                                                                      | —                                      |
| Amyl alcohol                                                                 | —                                      |
| Aniline                                                                      | —                                      |
| Animal fats                                                                  | 5.5–6.5                                |
| Benzene                                                                      | —                                      |
| Carbon disulfide                                                             | —                                      |
| Chloroform                                                                   | —                                      |
| Ether                                                                        | —                                      |
| Fatty acids                                                                  | 3.6–7.3                                |
| Ethyl acetate                                                                | —                                      |
| Formic acid                                                                  | 0.96                                   |
| Glycerine                                                                    | —                                      |
| Hexane                                                                       | —                                      |
| Human blood                                                                  | 0.43                                   |
| Human fat                                                                    | 6.33                                   |
| Linoleic acid                                                                | 6.3                                    |
| Oleic acid                                                                   | 6.7                                    |
| Olive oil                                                                    | —                                      |
| Petroleum (liquid paraffin)                                                  | —                                      |
| Toluene                                                                      | —                                      |
| Xylene                                                                       | —                                      |
|                                                                              | at 18°C                                |
| Absolute alcohol                                                             | 6.17                                   |
| Acetone                                                                      | 6.30                                   |
| Amyl alcohol                                                                 | 10.6                                   |
| Aniline                                                                      | 3.80                                   |
| Animal fats                                                                  | —                                      |
| Benzene                                                                      | 12.82                                  |
| Carbon disulfide                                                             | 23.14                                  |
| Chloroform                                                                   | 15.08                                  |
| Ether                                                                        | 15.08                                  |
| Fatty acids                                                                  | —                                      |
| Ethyl acetate                                                                | 7.35                                   |
| Formic acid                                                                  | —                                      |
| Glycerine                                                                    | 0.21                                   |
| Hexane                                                                       | 16.56                                  |
| Human blood                                                                  | —                                      |
| Human fat                                                                    | —                                      |
| Linoleic acid                                                                | —                                      |
| Oleic acid                                                                   | —                                      |
| Olive oil                                                                    | 29.00                                  |
| Petroleum (liquid paraffin)                                                  | 9.20                                   |
| Toluene                                                                      | 13.24                                  |
| Xylene                                                                       | 12.75                                  |
|                                                                              | at 0°C                                 |
| Absolute alcohol                                                             | 8.28                                   |
| Acetone                                                                      | 7.99                                   |
| Amyl alcohol                                                                 | —                                      |
| Aniline                                                                      | 4.45                                   |
| Animal fats                                                                  | —                                      |
| Benzene                                                                      | —                                      |
| Carbon disulfide                                                             | 33.4                                   |
| Chloroform                                                                   | 20.5                                   |
| Ether                                                                        | 20.09                                  |
| Fatty acids                                                                  | —                                      |
| Ethyl acetate                                                                | 9.41                                   |
| Formic acid                                                                  | —                                      |
| Glycerine                                                                    | —                                      |
| Hexane                                                                       | 23.4                                   |
| Human blood                                                                  | —                                      |
| Human fat                                                                    | —                                      |
| Linoleic acid                                                                | —                                      |
| Oleic acid                                                                   | —                                      |
| Olive oil                                                                    | —                                      |
| Petroleum (liquid paraffin)                                                  | 12.6                                   |
| Toluene                                                                      | 18.4                                   |
| Xylene                                                                       | —                                      |

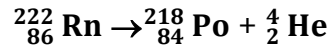


**Σχήμα 1:** Απεικόνιση ισοτόπων των τριών φυσικών ραδιενεργών σειρών διάσπασης (Fry and Thoennessen, 2013).

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



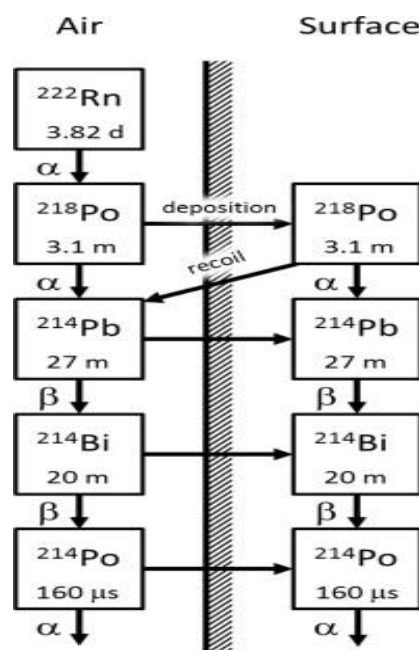
Το ραδόνιο ( $^{222}\text{Rn}$ ) διασπάται σε πολώνιο ( $^{218}\text{Po}$ ) ως εξής:



Η διάσπαση του, καθώς και η δευτερεύουσα διάσπαση των θυγατρικών του, ολοκληρώνεται με το σχηματισμό σταθερού μόλυβδου. Και τα δύο  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  αποτελούν μέλη της σειράς του ουρανίου  $^{238}\text{U}$ , όπως ήδη αναφέρθηκε, με την διαφορά ότι μόνο το ραδόνιο εμφανίζεται σε αέρια κατάσταση.

Τα θυγατρικά προϊόντα του ραδονίου διακρίνονται σε δύο ομάδες, ανάλογα με το χρόνο ημιζωής τους. Τα βραχύβια θυγατρικά ισότοπα  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  και  $^{214}\text{Po}$  έχουν χρόνο ημιζωής μικρότερο από 27 λεπτά και τα μακροβιότερα ισότοπα  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  και  $^{210}\text{Bi}$  λόγω του μεγάλου χρόνου ημιζωής του πρώτου πυρήνα  $^{210}\text{Pb}$  ίσο με 22,3 χρόνια (Mostafa et al., 2015). Το σχήμα 2 παρουσιάζει τον χρόνο ημιζωής των θυγατρικών του ραδονίου.

Κατά την «α-διάσπαση» ο ραδιενεργός πυρήνας εκπέμπει ένα σωματίδιο α, δηλαδή έναν πυρήνα ηλίου  $^4_2\text{He}$  κατά την διάσπασή του από τον μητρικό ασταθή πυρήνα, με αποτέλεσμα ο ατομικός αριθμός να ελαττώνεται κατά δύο, εξαιτίας της απομάκρυνσης δύο πρωτονίων, ενώ ο μαζικός αριθμός, ελαττώνεται κατά τέσσερα (ακτινοβολία α).



**Σχήμα 2:** Θυγατρικά ραδονίου και χρόνος ημιζωής τους (Angella et al., 2015).

**Πίνακας 3:** Ραδιενεργή σειρά ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ) (από Πατήρη, 2009).

| Μητρικός πυρήνας  | Τύπος αποδιέγερσης                       | Χρόνος ημιζωής                | Ενέργεια αποδιέγερσης (MeV) |
|-------------------|------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| $^{238}\text{U}$  | $\alpha$                                 | $4.468 \times 10^9 \text{ y}$ | 4.270                       |
| $^{234}\text{Th}$ | $\beta^-$                                | 24.10 d                       | 0.273                       |
| $^{234}\text{Pa}$ | $\beta^-$                                | 6.70 h                        | 2.197                       |
| $^{234}\text{U}$  | $\alpha$                                 | $2.455 \times 10^5 \text{ y}$ | 4.859                       |
| $^{230}\text{Th}$ | $\alpha$                                 | $7.538 \times 10^4 \text{ y}$ | 4.770                       |
| $^{226}\text{Ra}$ | $\alpha$                                 | 1602 y                        | 4.871                       |
| $^{222}\text{Rn}$ | $\alpha$                                 | 3.8235 d                      | 5.590                       |
| $^{218}\text{Po}$ | $\alpha$ 99.98%,<br>$\beta^-$ 0.02%      | 3.10 min                      | 6.115,<br>0.265             |
| $^{218}\text{At}$ | $\alpha$ 99.90%,<br>$\beta^-$ 0.10%      | 1.5 s                         | 6.874,<br>2.883             |
| $^{218}\text{Rn}$ | $\alpha$                                 | 35 ms                         | 7.263                       |
| $^{214}\text{Pb}$ | $\beta^-$                                | 26.8 min                      | 1.024                       |
| $^{214}\text{Bi}$ | $\beta^-$ 99.98%,<br>$\alpha$ 0.02%      | 19.9 min                      | 3.272,<br>5.617             |
| $^{214}\text{Po}$ | $\alpha$                                 | 0.1643 ms                     | 7.883                       |
| $^{210}\text{Tl}$ | $\beta^-$                                | 1.30 min                      | 5.484                       |
| $^{210}\text{Pb}$ | $\beta^-$                                | 22.3 y                        | 0.064                       |
| $^{210}\text{Bi}$ | $\beta^-$ 99.9998%,<br>$\alpha$ 0.00013% | 5.013 d                       | 1.426,<br>5.982             |
| $^{210}\text{Po}$ | $\alpha$                                 | 138.376 d                     | 5.407                       |
| $^{206}\text{Tl}$ | $\beta^-$                                | 4.199 min                     | 1.533                       |
| $^{206}\text{Pb}$ | -                                        | σταθερός                      | -                           |

**Πίνακας 4:** Ραδιενεργή σειρά θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ) (από Πατήρη, 2009).

| Μητρικός πυρήνας  | Τύπος αποδιέγερσης                   | Χρόνος ημιζωής                  | Ενέργεια αποδιέγερσης (MeV) |
|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| $^{232}\text{Th}$ | $\alpha$                             | $1.40 \times 10^{10} \text{ y}$ | 4.081                       |
| $^{228}\text{Ra}$ | $\beta^-$                            | 5.75 y                          | 0.046                       |
| $^{228}\text{Ac}$ | $\beta^-$                            | 6.25 h                          | 2.124                       |
| $^{228}\text{Th}$ | $\alpha$                             | 1.9116 y                        | 5.520                       |
| $^{224}\text{Ra}$ | $\alpha$                             | 3.6319 d                        | 5.789                       |
| $^{220}\text{Rn}$ | $\alpha$                             | 55.6 s                          | 6.404                       |
| $^{216}\text{Po}$ | $\alpha$                             | 0.145 s                         | 6.906                       |
| $^{212}\text{Pb}$ | $\beta^-$                            | 10.64 h                         | 0.570                       |
| $^{212}\text{Bi}$ | $\beta^-$ 64.06%,<br>$\alpha$ 35.94% | 60.55 min                       | 2.252,<br>6.208             |
| $^{212}\text{Po}$ | $\alpha$                             | 299 ns                          | 8.955                       |
| $^{208}\text{Tl}$ | $\beta^-$                            | 3.053 min                       | 4.999                       |
| $^{208}\text{Pb}$ | -                                    | σταθερός                        | -                           |

**Πίνακας 5:** Ραδιενεργή σειρά ακτινίου ( $^{235}\text{U}$ ) (από Πατήρη, 2009).

| Μητρικός πυρήνας  | Τύπος αποδιέγερσης | Χρόνος ημιζωής               | Ενέργεια αποδιέγερσης (MeV) |
|-------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|
| $^{239}\text{Pu}$ | $\alpha$           | $2.41 \times 10^4 \text{ y}$ | 5.244                       |
| $^{235}\text{U}$  | $\alpha$           | $7.04 \times 10^8 \text{ y}$ | 4.678                       |
| $^{231}\text{Th}$ | $\beta^-$          | 25.52 h                      | 0.391                       |
| $^{231}\text{Pa}$ | $\alpha$           | $3.27 \times 10^4 \text{ y}$ | 5.150                       |
| $^{227}\text{Ac}$ | $\beta^-$ 98.62%   | 21.772 y                     | 0.045                       |
|                   | $\alpha$ 1.38%     |                              | 5.042                       |
| $^{227}\text{Th}$ | $\alpha$           | 18.68 d                      | 6.147                       |
| $^{223}\text{Fr}$ | $\beta^-$          | 22.00 min                    | 1.149                       |
| $^{223}\text{Ra}$ | $\alpha$           | 11.43 d                      | 5.979                       |
| $^{219}\text{Rn}$ | $\alpha$           | 3.96 s                       | 6.946                       |
| $^{215}\text{Po}$ | $\alpha$ 99.99977% | 1.781 ms                     | 7.527                       |
|                   | $\beta^-$ 0.00023% |                              | 0.715                       |
| $^{215}\text{At}$ | $\alpha$           | 0.1 ms                       | 8.178                       |
| $^{211}\text{Pb}$ | $\beta^-$          | 36.1 m                       | 1.367                       |
| $^{211}\text{Bi}$ | $\alpha$ 99.724%   | 2.14 min                     | 6.751                       |
|                   | $\beta^-$ 0.276%   |                              | 0.575                       |
| $^{211}\text{Po}$ | $\alpha$           | 516 ms                       | 7.595                       |
| $^{207}\text{Tl}$ | $\beta^-$          | 4.77 min                     | 1.418                       |
| $^{207}\text{Pb}$ | -                  | σταθερός                     | -                           |

Φαινόμενο το οποίο χρησιμεύει σε συγκεκριμένες μετρητικές διατάξεις στον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ραδονίου, όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια στο κεφάλαιο 3. Εκτός από ακτινοβολία  $\alpha$  όμως, κάποια από τα μέλη των τριών ραδιενεργών σειρών εκπέμπουν ακτινοβολία  $\beta$  ή  $\gamma$  κατά την διάσπασή τους, όπως παρουσιάζουν οι παραπάνω πίνακες. Ως ακτινοβολία  $\beta$  ορίζεται το ηλεκτρόνιο που εκπέμπεται από τον πυρήνα, κατά τη μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο (εκπομπή σωματιδίου  $\beta^-$ ) ή εκπομπή ηλεκτρονίου κατά τη μετατροπή ενός πρωτονίου του πυρήνα σε νετρόνιο (εκπομπή σωματιδίου  $\beta^+$ ), ενώ ως ακτινοβολία  $\gamma$  καλείται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προέρχεται κατά τη μετάβαση ενός πυρήνα από κάποια ενεργειακή στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη, οπότε και εκπέμπεται ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με τη διαφορά των δυο σταθμών (Ehmann and Vance, 1991).

## 1.2 Σχηματισμός, απορροή και διαφυγή ραδονίου

Η ύπαρξη ουρανιούχων και ραδιούχων κόκκων σε πετρώματα και εδάφη μπορεί να αιτιολογήσει το σχηματισμό του ραδονίου στους σχηματισμούς αυτούς, καθώς όπως αναφέρθηκε, το ραδόνιο ανήκει στη ραδιενεργή σειρά του ουρανίου. Καθώς το ραδόνιο είναι το μόνο στοιχείο της σειράς που εμφανίζεται σε αέρια φάση μπορεί να διαφύγει από αυτούς και να εισέλθει στην ατμόσφαιρα.

Η ικανότητα σχηματισμού ραδονίου στο έδαφος καθορίζεται από την περιεκτικότητα των κόκκων αυτού σε ουράνιο ή ράδιο, η οποία καταχρηστικά ταυτίζεται με την ειδική ενεργότητα (*specific activity*) (Nazaroff et al., 1988). Η ενεργότητα ενός δείγματος ορίζεται ως ο ρυθμός αποδιέγερσης των ραδιενεργών πυρήνων, ο οποίος περιγράφεται από την εξίσωση:

$$A = -dN/dt = \lambda N(t) \quad (1)$$

Όπου N: ο αριθμός των πυρήνων του δείγματος τη χρονική στιγμή t και λ: η σταθερά αποδιέγερσης με χαρακτηριστική τιμή για κάθε πυρήνα.

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

Ο χρόνος  $T_{1/2}$  είναι ο χρόνος ημιζωής του δείγματος, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε η ραδιενέργεια του δείγματος να μειωθεί στο μισό της αρχικής της τιμής (Wilkening, 1980).

*Συνοπτικά, ενεργότητα (A) ορίζεται η ενεργότητα μιας ποσότητας ραδιονουκλειδίου σε συγκεκριμένη ενεργειακή κατάσταση σε δεδομένη χρονική στιγμή. Η μονάδα μέτρησης της ενεργότητας είναι το Bq (becquerel) (Επ. εφημερίδα L13 Ε.Ε., 2014).*

Η σχέση μεταξύ γεωλογικών παραμέτρων και ραδονίου έχει καταγραφεί από τα τέλη της δεκαετίας του 1970, κυρίως στις έρευνες του ουρανίου. Ο παράγοντας γεωλογίας είναι σύνθετος και περιλαμβάνει πράγματι όλα τα γεωλογικά χαρακτηριστικά. Γεωλογικές πληροφορίες υποδεικνύουν όχι μόνο την ποσότητα ουρανίου που υπάρχει στα πετρώματα και το έδαφος, αλλά δίνουν επίσης ενδείξεις για την πρόβλεψη της γενικής πορείας του ραδονίου και τα χαρακτηριστικά της κίνησης του.

Ενώ στην φύση εμφανίζονται περίπου 250 ορυκτά ουρανίου ενδεικτικά αναφέρονται ο Ουρανινίτης, ο Κοφινίτης, ο Ρεναρδίτης, ο Οτουνίτης με τους αντίστοιχους χημικούς τύπους και ποσοστιαία περιεκτικότητα σε ουράνιο όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 6 (Emsley, 1991).

Οι τύποι πετρωμάτων που συχνά συνδέονται με υψηλή συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους είναι οι εξής: 1) Μεταμορφωμένα πετρώματα, ηφαιστειακά πετρώματα και γρανίτες που περιέχουν ουράνιο 2) Παγετώδεις αποθέσεις που προέρχονται από ιζήματα

**Πίνακας 6:** Περιεκτικότητα U (%) σε αντίστοιχα ορυκτά (Emsley, 1991).

| Ορυκτό      | Χημικός τύπος                                                                                            | Περιεκτικότητα U (%) |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Ουρανινίτης | UO <sub>2</sub>                                                                                          | 88,15%               |
| Κοφινίτης   | USiO <sub>4</sub> · nH <sub>2</sub> O                                                                    | 72,63%               |
| Ρεναρδίτης  | Pb(UO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> •7(H <sub>2</sub> O) | 56,97%               |
| Οτουνίτης   | Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·10–12H <sub>2</sub> O                 | 48,27%               |

και πετρώματα που περιέχουν ουράνιο 3) Μαύροι σχιστόλιθοι 4) Εδάφη που προέρχονται από ανθρακικά πετρώματα 5) Ποτάμιες, θαλάσσιες και λιμναίες αποθέσεις, που περιέχουν ουράνιο (Gundersen and Schumann, 1996; Pantinakis et al., 2012).

Ο πίνακας 7 και 8 παρουσιάζει αντίστοιχα την περιεκτικότητα ουρανίου και γνωστών ραδιενεργών στοιχείων σε ορυκτά και διάφορους τύπους πετρωμάτων. Ενώ ο πίνακας 9, παρουσιάζει την ταξινόμηση του κινδύνου του ραδονίου σύμφωνα με γεωλογικά εδάφη.

**Πίνακας 7:** Περιεκτικότητα ουρανίου σε πετρώματα και ορυκτά (Τροποποιημένος από: Cothorn and Smith, 1987).

| Τύπος Πετρώματος                     | Εύρος U (ppm) |
|--------------------------------------|---------------|
| <b>Πυριγενή πετρώματα</b>            |               |
| Διορίτες                             | 0,0 – 11,0    |
| Γρανοδιορίτες                        | 0,5 – 9,0     |
| Γρανιτικά πετρώματα                  | 0,5 - 21,0    |
| Βασάλτης                             | 0,5 – 1,0     |
| <b>Ορυκτά από πυριγενή πετρώματα</b> |               |
| Χαλαζίας                             | 0,7           |
| Βιοτίτης                             | 1,0 – 40,0    |
| Καλιούχος άστριος                    | 0,2 - 3,0     |
| Πλαγιόκλαστα                         | 0,2 – 5,0     |
| Ζιρκόνιο                             | 300 – 3,000   |
| Απατίτης                             | 5,0 – 150,0   |
| Μοναζίτης                            | 1,0 – 30,0    |
| <b>Μεταμορφωμένα πετρώματα</b>       |               |
| Γνεύσιος                             | 2,0           |
| Σχιστόλιθος                          | 2,5           |
| Αργιλικός Σχιστόλιθος                | 2,7           |
| <b>Ιζηματογενή πετρώματα</b>         |               |
| Μαύροι σχιστόλιθοι                   | 3 - 250       |
| Ανθρακικά πετρώματα                  | 2             |

**Πίνακας 8:** Τυπικές περιεκτικότητες γνωστών ραδιενεργών στοιχείων σε πετρώματα [2].

| Τύπος πετρώματος | U (ppm) | Th (ppm) | K (%) |
|------------------|---------|----------|-------|
| Γρανίτης         | 5       | 18       | 3,8   |
| Βασάλτης         | 0,6     | 3        | 0,8   |
| Σχιστόλιθοι      | 5       | 12       | 2,7   |
| Ψαμμίτες         | 1       | 2        | 0,6   |
| Ασβεστόλιθοι     | 1,8     | 1,6      | 0,3   |
| Άμμοι            | 3       | 6        | 0,3   |

**Πίνακας 9:** Τύπος πετρώματος κι εδάφους συναρτήσει συγκέντρωσης ραδονίου (Τροποποιημένος από: Cothorn and Smith, 1987).

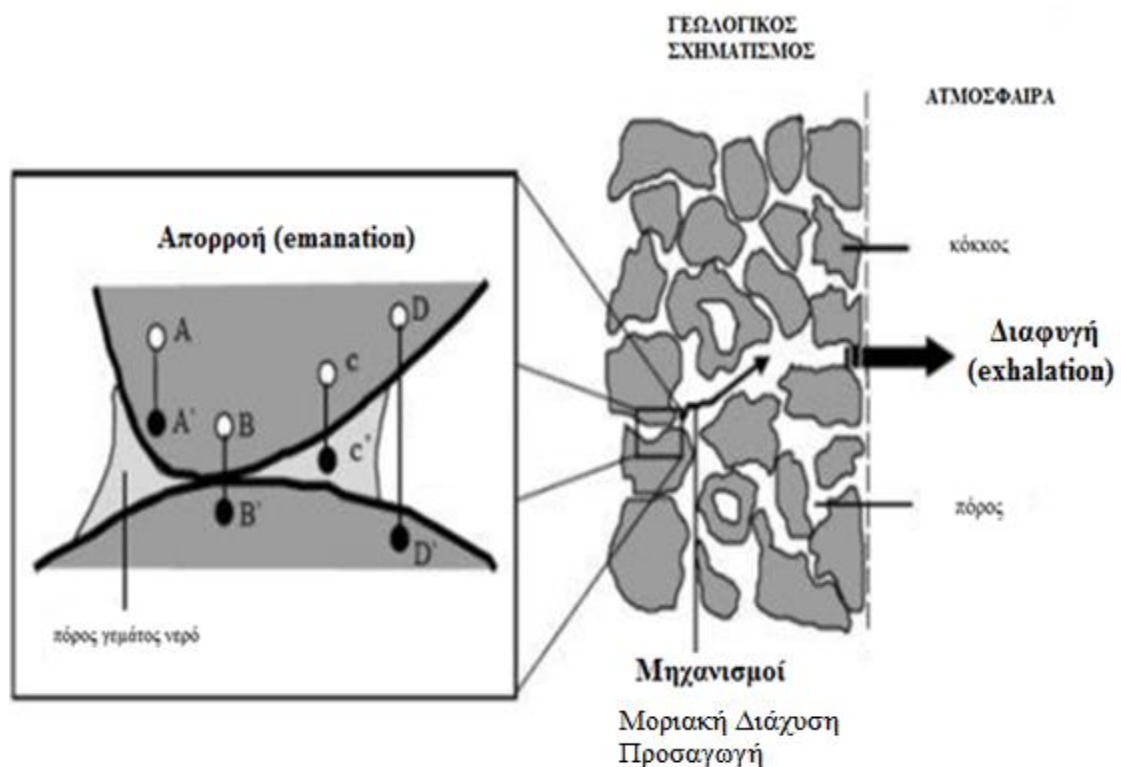
|                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Συγκέντρωση <math>^{222}\text{Rn} &gt; 50,000 \text{ Bq/m}^3</math></b>            |
| Γρανίτες πλούσιοι σε ουράνιο                                                          |
| Πηγματίτες                                                                            |
| Αργιλικός Σχιστόλιθος                                                                 |
| Εδάφη υψηλής διαπερατότητας                                                           |
| <b>Συγκέντρωση <math>^{222}\text{Rn} : 10,000\text{-}50,000 \text{ Bq/m}^3</math></b> |
| Πετρώματα και εδάφη με χαμηλή ή κανονική περιεκτικότητα σε ουράνιο                    |
| Εδάφη με μεσαία διαπερατότητα                                                         |
| <b>Συγκέντρωση <math>^{222}\text{Rn} &lt; 10,000 \text{ Bq/m}^3</math></b>            |
| Πετρώματα και εδάφη με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε ουράνιο                          |
| Ασβεστόλιθοι                                                                          |
| Ψαμμίτες                                                                              |
| Βασικά πυριγενή και ηφαιστειακά πετρώματα                                             |

Συνοπτικά, η ύπαρξη ουρανίου ή ραδίου σε ορυκτά, πετρώματα ή και εδαφικούς σχηματισμούς, οδηγεί στον σχηματισμό του ραδονίου. Μετά τη ραδιενεργό διάσπαση του ουρανίου ή του ραδίου, δημιουργείται ένας πυρήνας ραδονίου, ο οποίος ανακρούει λαμβάνοντας κάποιο ποσοστό κινητικής ενέργειας. Πιο αναλυτικά, με βάση την κινητική ενέργεια και το υλικό του κόκκου που δημιουργήθηκε, ο παραπάνω πυρήνας έχει τέσσερις δυνατότητες: α) να τελειώσει τη διαδρομή του μέσα στον κόκκο που δημιουργήθηκε (περίπτωσης Α), β) να διασχίσει τον κόκκο στον οποίο δημιουργήθηκε και να περάσει σε συνορεύοντα κόκκο τελειώνοντας τη διαδρομή του σε αυτόν, μη περνώντας από πορώδη χώρο (περίπτωση Β), γ) να διασχίσει τον κόκκο στον οποίο δημιουργήθηκε και να περάσει στο ρευστό του πορώδους συνεχίζοντας ή τερματίζοντας τη διαδρομή του σε αυτό (περίπτωση C), δ) να διασχίσει τον κόκκο που δημιουργήθηκε, να περάσει από το πορώδες και να καταλήξει σε γειτονικό κόκκο (περίπτωση

D). Η περίπτωση C είναι η μοναδική περίπτωση το ραδόνιο να καταφέρει να μεταφερθεί μέσω των διαρρήξεων των πετρωμάτων ή των πόρων του υλικού και να διαφύγει προς την ατμόσφαιρα. Τονίζεται, ότι η κινητική ενέργεια που αποκτά ο ανακρουόμενος πυρήνας ραδονίου είναι αρκετά μικρή, ώστε να είναι δυνατό να τελειώσει τη διαδρομή του σε κάποιον κόκκο ή σε κάποιο πόρο, έχοντας όμως διαπορευτεί, εν τω μεταξύ, ανάμεσα από δύο ή περισσότερους συνορεύοντες ή μη κόκκους. Επίσης, τα ποσοστά απορροής, που αντιστοιχούν στις διαδικασίες A, B και D θεωρούνται αμελητέα ως προς το σύνολο της απορροής του ραδονίου. Ένα ποσοστό μόλις της τάξης του 10-50% του ραδονίου που σχηματίζεται στους κόκκους, εισέρχεται στους πόρους. Το ποσοστό αυτό καλείται **συντελεστής απορροής** (*emanation coefficient*) ή ποσοστό απορροής (*emanation fraction*) (Λονιζή και Νικολόπουλος, 1998) και εξαρτάται από το μήκος ανάκρουσης και τη διάμετρο του κόκκου, στην συνέχεια θα γίνει αναλυτικότερη περιγραφή.

Το σχήμα 3, αναπαριστά τις τέσσερις διαφορετικές πιθανές διαδρομές που μπορεί να ακολουθήσει το ραδόνιο μετά το σχηματισμό του στους κόκκους ενός σχηματισμού και τη διαφυγή του στην ατμόσφαιρα, όπως αναλύθηκαν προηγουμένως.

Η κίνηση του ραδονίου εξαρτάται από το υλικό που πληρώνει τους πόρους του σχηματισμού, είτε αυτός είναι πέτρωμα είτε έδαφος. Κι αυτό γιατί η ενέργεια που αποκτά το ανακρουόμενο ραδόνιο είναι ικανή να του επιτρέψει να διασχίσει μεγαλύτερες αποστάσεις εντός ενός πόρου πληρωμένου από αέρα, περίπου 76μm, συγκριτικά με έναν πόρο γεμάτο



**Σχήμα 3:** Σχηματισμός και απορροή ραδονίου από γεωλογικούς σχηματισμούς- πιθανές διαδρομές- Διαφυγή ραδονίου από το έδαφος (Τροποποιημένο από Knutson, 1988).

νερό, περίπου 80 nm (Ziegler and Biersack, 1985; Λουιζή και Νικολόπουλος, 1998), καθώς ο συντελεστής διάχυσης του ραδονίου είναι μεγαλύτερος στον αέρα από εκείνον στο νερό (Cothorn and Smith, 1987). Με άλλα λόγια, η ύπαρξη νερού στους πόρους ενός γεωλογικού σχηματισμού, μειώνει την μετανάστευσή του ραδονίου λόγω της τριβής που ασκούν τα μόρια του νερού στο άτομο του, με αποτέλεσμα να εμποδίζουν την πορεία του. Ως αποτέλεσμα το ραδόνιο να παγιδεύεται στο νερό των πόρων και να μην καταφέρνει πάντα να διαφύγει (Markkanen and Arvela, 1992).

Το ραδόνιο που διαλύεται στο νερό μεταφέρεται μέσω αυτού και είναι δυνατό να φτάσει αρκετά μακριά από το σημείο γένεσής του (Erees et al., 2006). Το ραδόνιο παρουσιάζει μικρή διαλυτότητα στο νερό αλλά αυξημένη συγκριτικά με άλλα αέρια στοιχεία (Al-Azmi et al., 2004). Συνήθως η τιμή του ραδονίου στα υπόγεια νερά είναι μεγαλύτερη από αυτή στα επιφανειακά νερά που είναι μικρότερη των 2.000 Bq/m<sup>3</sup>. Ιδίως αν το υπόγειο νερό έρθει σε επαφή με εδάφη ή πετρώματα κανονικών ποσοστών ουρανίου ή ραδίου, το ραδόνιο μπορεί να συγκεντρωθεί με τιμή ίση έως και 44.000 Bq/m<sup>3</sup> (Wilkening, 1990; Karahan et al., 2000; Schwartz, 2003; Βογιάννης, 2005).

Η ταχύτητα κίνησης του ραδονίου εξαρτάται επίσης, από το μέγεθος και την γεωμετρία των ασυνεχειών και διαρρήξεων του υλικού μέσω των οποίων εκλύεται (Hakl et al., 1996). Το ραδόνιο απορρέει και διαφεύγει με διαφορετικούς ρυθμούς ανάλογα τον σχηματισμό.

Συνοπτικά, η παρουσία ουρανίου ή ραδίου στους κόκκους ενός σχηματισμού είναι ένας από τους βασικότερους, αλλά όχι κι ο μοναδικός παράγοντας απορροής ραδονίου από τους κόκκους μέσα στους οποίους παράγεται, καθώς εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες αυτών, όπως το μέγεθος, το πορώδες, τη διαπερατότητα, την περιεχόμενη υγρασία και την κρυσταλλική δομή τους, αλλά και τη βαρομετρική πίεση, το ύψος της βροχόπτωσης και τη θερμοκρασία του υποβάθρου (Schery et al., 1984).

Έτσι, λοιπόν η έξοδος του ραδονίου από έναν γεωλογικό σχηματισμό ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις και ορίζονται ως εξής:

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

Οι βασικοί **μηχανισμοί μετακίνησης (transport)** του ραδονίου από το σχηματισμό είναι οι εξής:

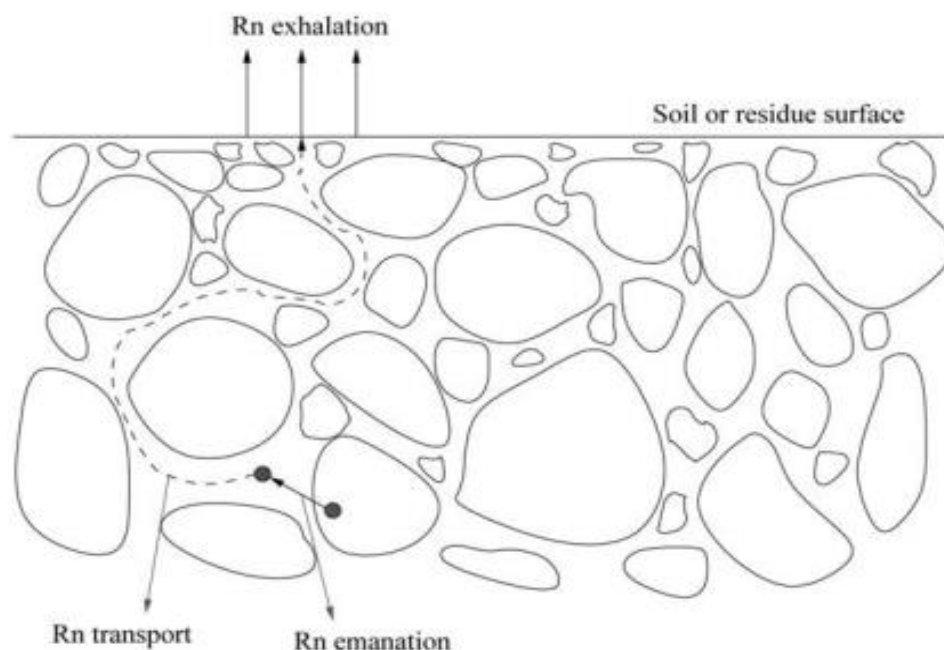
- Η **Μοριακή διάχυση (molecular diffusion)** όπου καλείται το αποτέλεσμα της αναταραχής των μορίων εξαιτίας της οποίας συμβαίνουν συχνές συγκρούσεις μορίων σαν συνέπεια της οποίας τα μόρια να διασκορπίζονται (Alonso and Finn, 1980). Ως αποτέλεσμα την κίνηση του ραδονίου, και γενικά των αερίων, από ένα σημείο του φέροντος ρευστού όπου η συγκέντρωση της είναι σχετικά υψηλή, προς ένα άλλο σημείο όπου η συγκέντρωση της είναι χαμηλότερη εξαιτίας της τυχαίας κίνησης των μορίων του (Νόμος του Fick). Η διάχυση θεωρείται ο κυρίαρχος μηχανισμός εισόδου του ραδονίου από το έδαφος στην ατμόσφαιρα (Nazaroff et al., 1988).
- Η **Προσαγωγή (advection)** όπου καλείται το αποτέλεσμα της μαζικής μετακίνησης των μορίων προς μία κατεύθυνση σαν αποτέλεσμα μεταβολής κάποιου εξωτερικού αιτίου (Alonso and Finn, 1980). Η κίνηση αυτή 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 (Νόμος του Darcy) (Nazaroff et al., 1988).

Η μαθηματική περιγραφή της μετακίνησης του ραδονίου συνδυάζει και τους δύο παραπάνω μηχανισμούς μετακίνησης (Font, 1997; Rogers and Nilson, 1991; Nazaroff et al., 1988). Το σχήμα 4, απεικονίζει τις διαδικασίες απορροής, μετακίνησης και διαφυγής ραδονίου ενώ στο σχήμα 5, παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την κάθε διαδικασία.

Στην ελληνική βιβλιογραφία έχει παρατηρηθεί σύγχυση στην χρήση των όρων «*emanation*» και «*exhalation*» (Οικονομόπουλος, 2008; Νικολόπουλος, 2000). Τονίζεται ότι στην συγκεκριμένη εργασία, οι όροι αυτοί θα χρησιμοποιούνται ως παραπάνω, σύμφωνα με το λεξικό του τμήματος χημείας του πανεπιστημίου Αθηνών. Στην διεθνή βιβλιογραφία ωστόσο οι δύο αυτοί όροι, έχουν απασχολήσει πολλούς ερευνητές, μερικοί εκ των οποίων έχουν βασιστεί σε θεωρητικές προσεγγίσεις, ενώ κάποιοι άλλοι σε πειραματικές μεθόδους για την ερμηνεία τους (Stajic and Nikezic, 2014).

Η διαφυγή (*exhalation*) του ραδονίου εξαρτάται κυρίως από το ρυθμό απορροής του (***emanation rate***) από τους κόκκους και την δομή του σχηματισμού που δημιουργήθηκε, αλλά επίσης εξαρτάται κι από τους παράγοντες, διάχυση και προσαγωγή, όπως ήδη αναφέρθηκαν, επιδρώντας στην μετακίνηση του ραδονίου στο σχηματισμό.

Στην προσπάθεια να δοθεί ένας ποσοτικός προσδιορισμός του όρου *emanation rate*, χρησιμοποιείται η παράμετρος που καλείται συντελεστής απορροής ***emanation factor*** (*f*), ο οποίος ορίζεται ως το ποσοστό των ατόμων ραδονίου που έχουν καταφέρει να διαφύγουν από



**Σχήμα 4:** Διαδικασία απορροής, μετακίνησης και διαφυγής ραδονίου από το έδαφος (Bascaran, 2016).

τους κόκκους και να περάσουν στο πορώδες του σχηματισμού σε σχέση με τα συνολικά άτομα ραδονίου που έχουν διασπαστεί. Ο συντελεστής αυτός μπορεί να προσδιοριστεί από την περιεχόμενη ποσότητα σε ράδιο του σχηματισμού και τον ρυθμό διαφυγής μάζας (**mass exhalation rate** -  $J_m$ ) από τους κόκκους του δείγματος. Το mass exhalation rate μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση ως εξής:

$$J_m = Q * f * \lambda \quad (3)$$

Όπου  $Q$  θεωρείται η περιεκτικότητα σε ράδιο (Bq/kg) του δείγματος, ο  $f$  ο συντελεστής απορροής του δείγματος και  $\lambda$  η σταθερά διάσπασης του ραδονίου ( $h^{-3}$ ) (Sahoo et al., 2007).

Έτσι, αρκετές έρευνες έχουν γίνει στην προσπάθεια τους να μελετήσουν εκτός από την περιεκτικότητα σε ραδιενεργά στοιχεία, όπως το ουράνιο και το θόριο, σε διάφορους τύπους πετρωμάτων, όπως παρουσιάζουν οι πίνακες 6-9, αλλά και το ρυθμό διαφυγής του ραδονίου από αυτά. Χαρακτηριστικά αναφέρεται παράδειγμα αντίστοιχης έρευνας στην Ιταλία που παρουσιάζει ο πίνακας 10, με τους ρυθμούς απορροής ραδονίου σε αντίστοιχους τύπους πετρωμάτων, ενώ αναφέρεται ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί προς το παρόν αντίστοιχη έρευνα στην Ελλάδα. Επίσης, ενδεικτικά αναφέρεται μία τάξη μεγέθους του ρυθμού απορροής ραδονίου σε διάφορα δείγματα μαρμάρων με πορώδες που κυμαίνεται από 0,17-1,10 που έχουν ως αποτέλεσμα 9,54 - 16,42 %. Επιβεβαιώνοντας ότι η ποσότητα ουρανίου στα δείγματα που μελετήθηκαν, δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας που επηρεάζει την απορροή του ραδονίου καθώς σημαντικό ρόλο έχει και το πορώδες (Misdaq and Amghar, 2005).

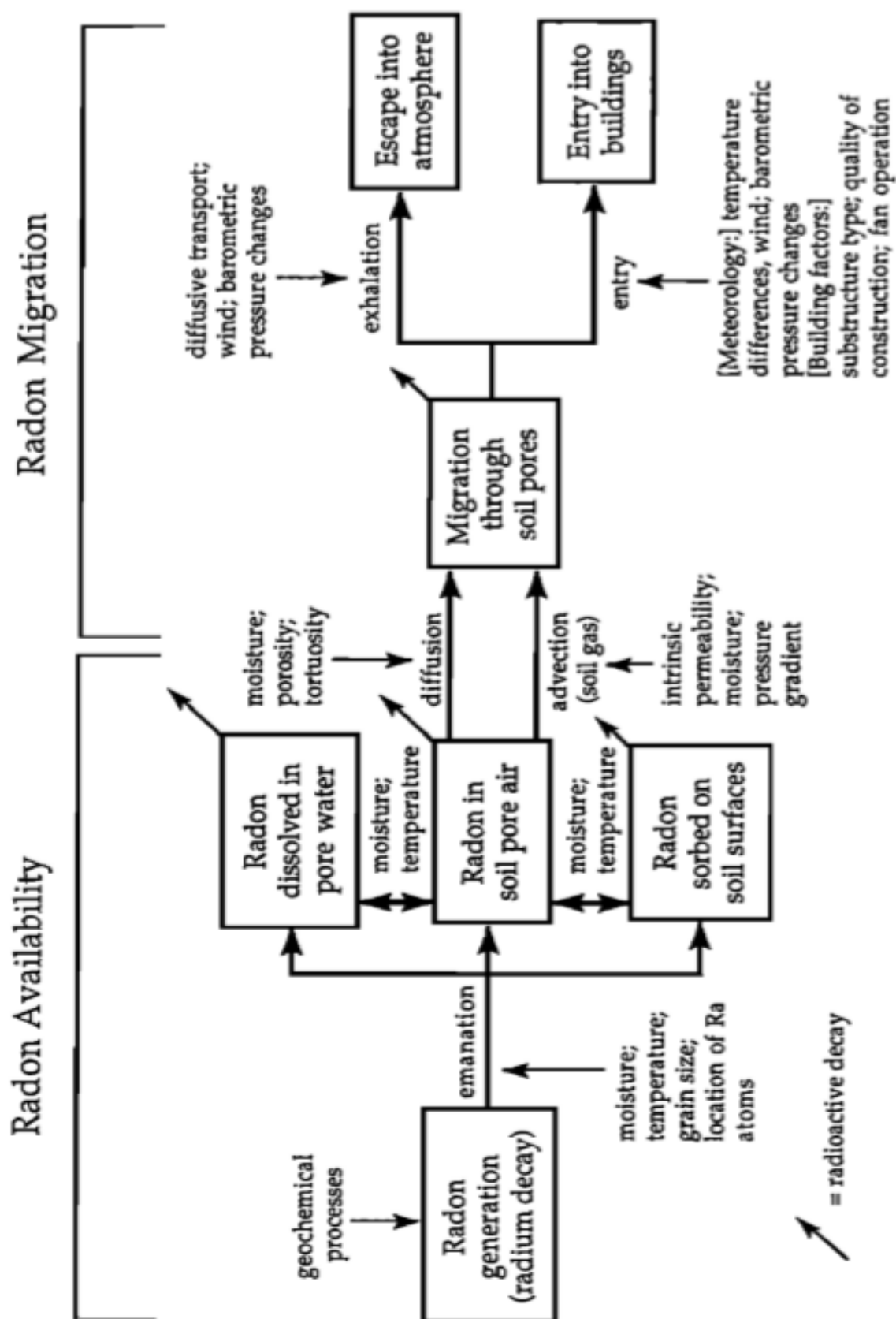
Στην συνέχεια, στον πίνακα 11, παρατίθενται τα αποτελέσματα αντίστοιχής έρευνας στην Ινδία, όπου έχει υπολογιστεί η περιεκτικότητα ραδίου, ο ρυθμός απορροής και ο ρυθμός διαφυγής μάζας σε διαφορετικά πετρώματα.

**Πίνακας 10:** Ρυθμός διαφυγής ραδονίου από πετρώματα σε έρευνα στην Ιταλία (Morelli et al., 2015).

| Material                   | Consistency                    | $E_S$ [mBqm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ] | $E_M$ [mBqkg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ] |
|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Volcanic Sand              | Grain<br>( $\phi < 500$ mm)    | 43.1 $\pm$ 6.7                              | 1.10 $\pm$ 0.20                              |
| Volcanic Sand              | Grain<br>(0.5 $< \phi < 1$ mm) | 33.4 $\pm$ 5.7                              | 0.80 $\pm$ 0.10                              |
| Volcanic Sand              | Grain<br>(1 $< \phi < 1.4$ mm) | 19.2 $\pm$ 4.2                              | 0.50 $\pm$ 0.10                              |
| Volcanic Sand              | Grain<br>(1.4 $< \phi < 2$ mm) | 24.1 $\pm$ 4.8                              | 0.60 $\pm$ 0.10                              |
| Volcanic Sand              | Grain<br>( $\phi > 2$ mm)      | 13.7 $\pm$ 3.6                              | 0.30 $\pm$ 0.10                              |
| Volcanic rock              | Compact block                  | 10.5 $\pm$ 2.6                              | 0.40 $\pm$ 0.10                              |
| Limestone of Ragusa        | Fine Grain                     | 28.3 $\pm$ 5.2                              | 0.70 $\pm$ 0.10                              |
| Soft Sandstone of Scicli   | Compact block                  | 33.6 $\pm$ 6.6                              | 0.80 $\pm$ 0.02                              |
| Hard Limestone of Pozzallo | Compact block                  | 8.0 $\pm$ 0.7                               | 0.30 $\pm$ 0.22                              |
| Hard Limestone of Modica   | Compact block                  | 19.7 $\pm$ 4.2                              | 1.00 $\pm$ 0.04                              |
| Hard Limestone of Ragusa   | Compact block                  | 4.0 $\pm$ 1.1                               | 0.20 $\pm$ 0.05                              |
| Hard Limestone of Scicli   | Compact block                  | 7.6 $\pm$ 1.6                               | 0.20 $\pm$ 0.09                              |
| Soft Limestone of Sampieri | Compact block                  | 1.6 $\pm$ 0.3                               | 0.40 $\pm$ 0.16                              |
| Soft Limestone of Scicli   | Compact block                  | 23.5 $\pm$ 5.5                              | 0.70 $\pm$ 0.14                              |
| Soft Limestone of Noto     | Compact block                  | 18.2 $\pm$ 2.7                              | 0.90 $\pm$ 0.21                              |
| Sand stone of Scicli       | Compact block                  | 25.3 $\pm$ 4.6                              | 1.10 $\pm$ 0.33                              |
| Crusher Sand of Modica     | Grain                          | 40.5 $\pm$ 6.9                              | 1.90 $\pm$ 0.21                              |
| Mix Sand/Stone             | Grain                          | 9.0 $\pm$ 1.5                               | 1.30 $\pm$ 0.01                              |
| Cement                     | Fine Grain                     | 37.7 $\pm$ 6.0                              | 0.90 $\pm$ 0.20                              |
| Glue                       | Fine Grain                     | 48.7 $\pm$ 6.9                              | 1.20 $\pm$ 0.20                              |
| Concrete                   | Compact block                  | 35.7 $\pm$ 4.8                              | 1.60 $\pm$ 0.20                              |
| Brick                      | Compact block                  | 15.2 $\pm$ 3.3                              | 1.00 $\pm$ 0.20                              |
| Red Cement                 | Compact block                  | 25.2 $\pm$ 4.0                              | 1.10 $\pm$ 0.20                              |
| Mix Marble/Cement          | Compact block                  | 28.2 $\pm$ 4.3                              | 1.40 $\pm$ 0.20                              |
| Travertine                 | Compact block                  | 49.1 $\pm$ 9.9                              | 2.20 $\pm$ 0.50                              |
| Stone of Tunisia           | Compact block                  | 77.7 $\pm$ 12.8                             | 3.40 $\pm$ 0.60                              |
| Stone of Comiso            | Compact block                  | 9.0 $\pm$ 2.4                               | 0.40 $\pm$ 0.10                              |
| Marble of Carrara          | Compact block                  | 65.4 $\pm$ 11.7                             | 2.80 $\pm$ 0.50                              |

**Πίνακας 11:** Περιεκτικότητα ραδίου, ρυθμός διαφυγής μάζας και απορροή ραδονίου σε διάφορα δείγματα από έρευνα στην Ινδία (Sahoo et al., 2007).

| Type of material | No. of samples | <sup>226</sup> Ra<br>(Bq kg <sup>-1</sup> ) | <sup>222</sup> Rn mass exhalation rate<br>(mBq kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ) | <sup>222</sup> Rn emanation<br>factor (%) |
|------------------|----------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Fired clay brick | 7              | 16 $\pm$ 5                                  | 6.1 $\pm$ 3.4                                                                     | 7.8 $\pm$ 3.4                             |
| Flyash brick     | 6              | 81 $\pm$ 11                                 | 72.8 $\pm$ 15.3                                                                   | 11.3 $\pm$ 4.6                            |
| Cement (PPC)     | 5              | 29 $\pm$ 4                                  | 2.3 $\pm$ 1.6                                                                     | 1.0 $\pm$ 0.7                             |
| Cement (SRC)     | 4              | 23 $\pm$ 6                                  | 2.2 $\pm$ 1.9                                                                     | 1.4 $\pm$ 0.8                             |
| White cement     | 4              | 38 $\pm$ 7                                  | 12.3 $\pm$ 5.6                                                                    | 4.3 $\pm$ 1.8                             |
| Marble           | 5              | 12 $\pm$ 3                                  | 1.1 $\pm$ 1.0                                                                     | 1.2 $\pm$ 1.1                             |
| Vitrified tile   | 5              | 33 $\pm$ 5                                  | 0.3 $\pm$ 0.3                                                                     | 0.1 $\pm$ 0.1                             |
| Glazed tile      | 5              | 68 $\pm$ 13                                 | 0.8 $\pm$ 0.7                                                                     | 0.2 $\pm$ 0.2                             |
| Black sand       | 6              | 13 $\pm$ 5                                  | 18.8 $\pm$ 6.4                                                                    | 20.4 $\pm$ 8.2                            |
| Yellow sand      | 6              | 10 $\pm$ 4                                  | 6.5 $\pm$ 4.3                                                                     | 8.4 $\pm$ 4.7                             |
| Silica fume      | 5              | 33 $\pm$ 8                                  | 12.5 $\pm$ 4.4                                                                    | 5.0 $\pm$ 1.7                             |
| Lime             | 5              | 9 $\pm$ 2                                   | 14.6 $\pm$ 4.9                                                                    | 20.8 $\pm$ 5.2                            |
| Concrete         | 6              | 21 $\pm$ 5                                  | 8.5 $\pm$ 3.6                                                                     | 5.4 $\pm$ 1.9                             |
| Soil             | 8              | 16 $\pm$ 7                                  | 23.5 $\pm$ 11.8                                                                   | 19.2 $\pm$ 6.1                            |

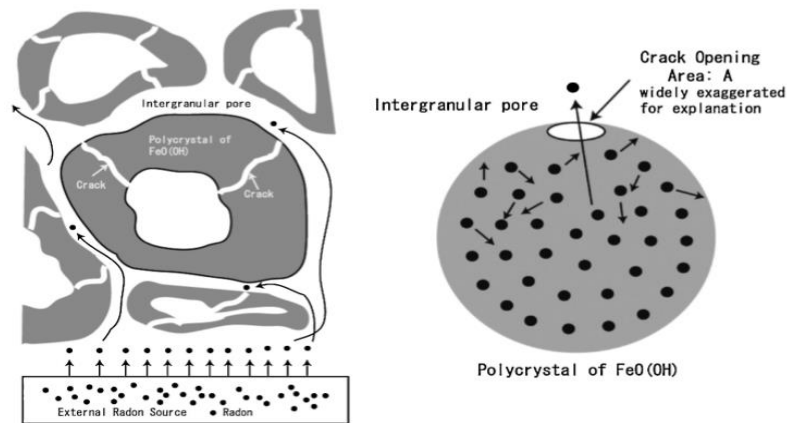


Σχήμα 5: Σχεδιάγραμμα παραγόντων που επηρεάζουν την απορροή, μετακίνηση και διαφυγή του ραδονίου (Nazaroff, 1992).

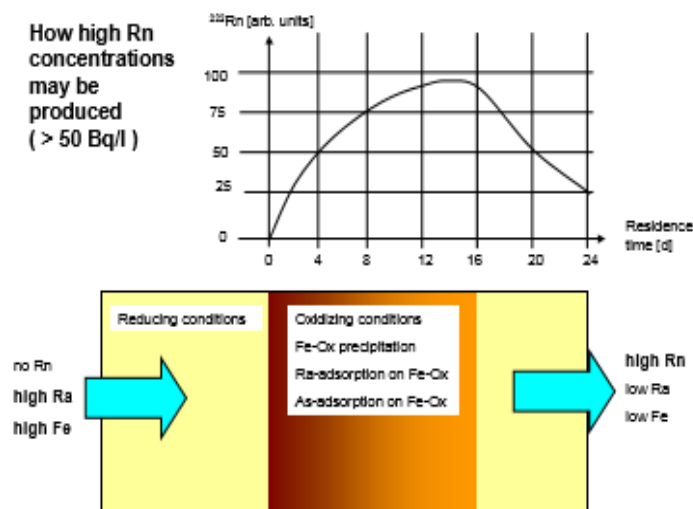
### 1.2.1 Περιπτώσεις αυξημένης συγκέντρωσης ραδονίου

Ποικιλία γεωλογικών, υδροχημικών και ισοτοπικών τεχνικών έχουν εφαρμοστεί για να εξηγήσουν την αιτία των εξαιρετικά υψηλών επιπέδων ραδονίου σε διαφορετικές περιπτώσεις.

- Γεωθερμικές πηγές, όπως εκείνης της St.Placidus στις Ελβετικές Άλπεις, ή καρστικής πηγής στην Ουγγαρία με 650 Bq/L και 100 Bq/L αντίστοιχη συγκέντρωση ραδονίου αλλά και οι πηγές BadGastein της Αυστρίας (Mache and Bamberger, 1914), είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα που οδήγησαν σε αντίστοιχες έρευνες με σκοπό την ερμηνεία του φαινομένου αυτού. Ως αποτέλεσμα να αποδειχθεί ότι το ράδιο μπορεί να προσροφηθεί στα υδροξείδια του σιδήρου. Τα υψηλά επίπεδα ραδονίου στις γεωθερμικές πηγές ερμηνεύονται είτε λόγω αυξημένης περιεκτικότητας σε ράδιο στο ρηγματωμένο πέτρωμα του υδροφόρου ορίζοντα, είτε λόγω συγκέντρωσης ραδίου στο νερό της πηγής. Όπου απαραίτητη είναι η ύπαρξη μιας παραγωγικής δεξαμενής ραδίου στο εσωτερικό του υδροφόρου ορίζοντα ή πολύ κοντά στην πηγή. Μια δεξαμενή που θα αποτελείται κυρίως από οξείδια και υδροξείδια του σιδήρου και του μαγγανίου, τα οποία καθιζάνουν σε μια ζώνη όπου αναγωγικά σιδηρούχα υπόγεια ύδατα - αναμειγνύονται περιστασιακά με οξυγόνο από το νερό της βροχής ή των πάγων. Καθώς νερό ανέρχεται από βαθύτερα επίπεδα, αναμειγνύεται με κρύα νερά του επί τόπου υδροφόρου ορίζοντα που είναι πλούσια σε οξυγόνο. Αποτέλεσμα της παραπάνω λειτουργίας είναι να δημιουργούνται υδροξείδια του σιδήρου στα οποία προσροφάται το ράδιο, με αποτέλεσμα τον τελικό εμπλουτισμό του νερού σε ραδόνιο (Surbeck, 2007). Μεταβολές των συγκεντρώσεων του ραδίου σε υπόγεια ποτάμια ή σε νερά πηγών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άντληση πληροφοριών σχετικά με γρήγορες διαδικασίες μεταφοράς του ραδονίου στα καρστικά συστήματα (Heinz, 2007). Το σχήμα 6 περιγράφει την απορροή ραδονίου από έναν σιδηρούχο σχηματισμό. Χαρακτηριστικά παραδείγματα που υποστηρίζουν το παραπάνω εννοιολογικό μοντέλο, όπως παρουσιάζει το σχήμα 7, είναι πηγές, διάφορων γεωλογικών σχηματισμών, κρυσταλλικής και ιζηματογενής προέλευσης (Gainon, 2003; Schott and Wiegand, 2003; Deflorin, 2004; Kloos, 2004). Υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου έχουν παρατηρηθεί επίσης, σε ιαματικές πηγές με τιμές μεγαλύτερες των 100kBq/m<sup>3</sup> (Βογιάννης, 2005).



**Σχήμα 6:** Απορροή ραδονίου από σιδηρούχο σχηματισμό (Tomozo et al., 2012).



**Σχήμα 7:** Υποθετικό μοντέλο για την υψηλή συγκέντρωση ραδονίου σε γεωθερμικές πηγές (Surbeck, 2007).

- Αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου έχουν παρατηρηθεί σε περιοχές κοντά σε λιγνιτορυχεία, όπως για παράδειγμα στις Βρύσσες, Αποκορώνου με τιμή ίση με 7000 Bq/m<sup>3</sup>. Το γεγονός αυτό αιτιολογήθηκε στην τάση του ουρανίου να προσκολλάτε στον λιγνίτη (Pantinakis et al., 2012; Nikolopoulos et al., 2002) και στην περιεκτικότητα των γαιανθράκων σε φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, όπως αυτά των ραδιενεργών σειρών του <sup>238</sup>U, του <sup>232</sup>Th καθώς και <sup>40</sup>K (Παπαδόπουλος, 2011).
- Επίσης, η παραγωγή των φωσφορικών λιπασμάτων βασίζεται στην επεξεργασία φωσφορικών πετρωμάτων, τα οποία περιέχουν σημαντικές ραδιενεργές συγκεντρώσεις στα φυσικά ραδιονουκλείδια του εδάφους. Τα ραδιονουκλείδια των πετρωμάτων κατά την βιομηχανική τους επεξεργασία περνούν στα προϊόντα και τα παραπροϊόντα τους. Ένα φωσφορικό πέτρωμα περιέχει συγκέντρωση <sup>238</sup>U που κυμαίνεται 0,2-1,5 Bq/g ενώ ένα φωσφορικό λίπασμα 0,3-3 Bq/g (Σερβιτζόγλου, 2004).

### 1.3 Μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας

Η επικινδυνότητα του ραδονίου και των θυγατρικών του ισοτόπων οφείλεται κυρίως στην εκπομπή της ακτινοβολίας άλφα. Η απευθείας μέτρηση της ακτινοβολίας που έχει δεχθεί ένα κύτταρο ή ένας ιστός του ανθρώπινου οργανισμού είναι πρακτικά αδύνατη, για τον λόγο αυτό με το πέρασμα των χρόνων ορίστηκαν αντίστοιχες μονάδες μέτρησης, ορισμοί και οι μεταξύ τους ισοδυναμίες, έτσι ώστε να είναι μετρήσιμα και κατανοητά τα αποτελέσματα της έκθεσης σε ραδιενεργή ακτινοβολία και η τάξη μεγέθους τους.

Η μονάδα μέτρησης της δραστηριότητας των ραδιενεργών πυρήνων σύμφωνα με το διεθνές σύστημα (S.I) είναι το Bq (μπεκερέλ). Το μπεκερέλ πήρε το όνομά του από τον Γάλλο επιστήμονα Ανρί Μπεκερέλ (*Antoine Henri Becquerel*), ο οποίος ανακάλυψε το φαινόμενο της ραδιενέργειας το 1896. Με αυτή μετριέται η ισχύς (ενεργότητα) της ραδιενέργειας δηλαδή η συχνότητα των πυρηνικών διασπάσεων μίας ραδιενεργούς ουσίας, ενός συγκεκριμένου είδους πυρήνα, ανά μονάδα χρόνου (δευτερόλεπτο). **1 Bq σημαίνει ότι λαμβάνει χώρα μία πυρηνική διάσπαση ανά δευτερόλεπτο.** Έτσι το αποτέλεσμα μίας μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου, εκφράζεται σε Bq/m<sup>3</sup> ή kBq/m<sup>3</sup>. Εκφράζει, δηλαδή, τη μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου που είναι και η πλέον αντιπροσωπευτική για τον εσωτερικό αέρα. **1 Bq/m<sup>3</sup> σημαίνει ότι κατά μέσο όρο σε κάθε κυβικό μέτρο αέρα, συμβαίνει μία διάσπαση ενός ατόμου ραδονίου ανά δευτερόλεπτο.**

Παλαιότερη μονάδα μέτρησης της ραδιενέργειας ήταν το Ci (κιουρί), και συγκεκριμένα υποπολλαπλάσια αυτού, μCi και pCi. Αυτή η μονάδα μέτρησης πήρε το όνομά της από τη φυσικό Μαρία Κιουρί (*Marie Curie*), η οποία ήταν η πρωτοπόρος στην έρευνα πάνω σε ραδιενεργά στοιχεία και στις διασπάσεις τους. **1 Ci ισούται με τη διάσπαση  $3,7 \times 10^{10}$  ραδιενεργών ατόμων ανά δευτερόλεπτο.**

Το 1955, ορίστηκε η έννοια Επίπεδο εργασίας (**Working Level**) σε ένα συνέδριο στο Salt Lake City των Η.Π.Α, ως μια συγκέντρωση ραδονίου από 100 pCi ραδονίου σε ισορροπία με τα θυγατρικά διάσπασης του, ανά λίτρο αέρα (100 pCi/L) (Holaday, 1969). Το επίπεδο εργασίας (WL) είναι ένα μέτρο του ρυθμού έκθεσης και περιγράφει πόση ενέργεια βρίσκεται στα σωματίδια άλφα σε ένα λίτρο αέρα. Η εκπομπή βήτα σωματιδίων από τα θυγατρικά του ραδονίου, δηλαδή το βισμούθιο (<sup>214</sup>Bi) και το μόλυβδο (<sup>214</sup>Pb) συμβάλλουν στην άλφα ενεργειακή κατάσταση, αφού διασπαστούν σε <sup>214</sup>Po. Ένα WL είναι η συγκέντρωση των θυγατρικών ραδονίου στον αέρα που θα έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή του  $1,3 \times 10^5$  MeV ενέργειας ανά λίτρο αέρα.

Η ιστορική αυτή μονάδα εκφράζεται επίσης και ως Μηνιαίο επίπεδο εργασίας (**Working Level Month**). Ένα WLM είναι ισοδύναμο με την έκθεση σε 1 WL για 170 ώρες που είναι ο μέσος αριθμός των ωρών εργασίας ενός ανθρακωρύχου σε ένα μήνα, θεωρώντας περίπου 40 ώρες/εβδομάδα. Μια έκθεση των 1 WLM θα οδηγήσει σε Ισοδύναμο Σύνολο Απορροφούμενης Δόσης των 10 mSv (1 rem) (N.C.R.P., 2009; I.C.R.P., 1986). Ο εκτιμώμενος κίνδυνος ζωής από μια έκθεση των 1 WLM είναι  $5 \times 10^{-4}$  (I.C.R.P., 2011). Ένα WLM αντιστοιχεί επίσης σε έκθεση μιας ώρας σε Ισοδύναμη Συγκέντρωση Ισορροπίας ίση με  $6,3 \times 10^5$  Bq/m<sup>3</sup> για τα θυγατρικά ισότοπα του <sup>222</sup>Rn και  $4,68 \times 10^4$  Bq/m<sup>3</sup> για τα θυγατρικά του <sup>220</sup>Rn (C.V.D.H.U.S, 2012). Οι σχέσεις, οι συμβολισμοί και οι ορισμοί των WL και WLM παρουσιάζονται στον πίνακα 12. Σημειώνεται ότι το «Potencial Alpha Energy Concetration» δεν χρησιμοποιείται πλέον στην βιβλιογραφία (Wilkening, 1990).

Για να συσχετιστεί αυτή η ενέργεια με τη βιολογική εναπόθεση και την απορροφούμενη δόση, πρέπει να εξεταστούν πολλοί άλλοι παράγοντες. Μερικοί εκ των οποίων, ο ρυθμός αναπνοής, ο όγκος του αέρα ανά αναπνοή, ο χρόνος που τα θυγατρικά ραδονίου παραμένουν στο σώμα και οι χρόνοι ημιζωής των θυγατρικών. Η συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα, επίσης, είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση του χρόνου, δεδομένου ότι το ραδόνιο παράγεται από την διάσπαση του ραδίου.

**Πίνακας 12:** Ισοδυναμίες της ιστορικής μονάδας Working Level (Wilkening, 1990).

| Όρος                                       | Μονάδες (S.I) | Ισοδυναμίες                                          |
|--------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------|
| <b>Working Level</b>                       | WL            | 1 WL= $1,3 \times 10^5$ MeV=3,700 Bq/m <sup>3</sup>  |
|                                            |               | 1 WLM = WL hours/170                                 |
| <b>Working Level Month</b>                 | WLM           | 1 WLM = $6,3 \times 10^5$ Bq/m <sup>3</sup> = 10 mSv |
| <b>Potencial Alpha Energy Concetration</b> | PAEC          | 1 PAEC = $1 \text{ J M}^{-3}$                        |

Ως βασικό μέγεθος εκτίμησης των επιπτώσεων της ακτινοβολίας στον ανθρώπινο οργανισμό χρησιμοποιείται η **απορροφούμενη δόση** (*Absorbed dose*). Απορροφούμενη δόση (D) ακτινοβολίας ορίζεται ως η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα μάζας και ισούται με το πηλίκο της μέσης ενέργειας που εναποτίθεται από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες στην ύλη μέσα σε ένα στοιχείο όγκου (de) ως προς την μάζα της ύλης που εμπεριέχεται σε αυτό το στοιχείο όγκου (dm). Μονάδα μέτρησης της ορίζεται στο διεθνές σύστημα το Gray (Gy) και ισχύει ότι  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg} = 100 \text{ rad}$ . Στον ορισμό του μεγέθους αυτού όμως δεν λαμβάνονται υπόψη οι διαφορές στον ιονισμό που προκαλούν οι διάφοροι τύποι ακτινοβολίας ούτε και η ιδιαίτερη ευαισθησία των βιολογικών ιστών. Έτσι η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (I.C.R.P.)

εισήγαγε ένα νέο μέγεθος, την **ισοδύναμη δόση** (*Dose equivalent*). Η ποσότητα αυτή ορίζεται ως το γινόμενο της μέσης απορροφούμενης δόσης από ένα βιολογικό ιστό επί ένα ποιοτικό συντελεστή, που αποδίδει τη σχετική επικινδυνότητα μιας συγκεκριμένης ακτινοβολίας και επί ένα δεύτερο συντελεστή που αποδίδει την ευαισθησία ενός συγκεκριμένου οργάνου στην ακτινοβολία. Τέλος, για να εκτιμηθεί ο συνολικός κίνδυνος που διατρέχει ένας οργανισμός, ορίζεται το μέγεθος της **ενεργής δόσης** (*Effective Dose - E<sub>eff</sub>*), το οποίο υπολογίζεται από το άθροισμα των επιμέρους ισοδύναμων δόσεων. Μονάδα μέτρησης της ενεργής δόσης στο διεθνές σύστημα είναι το Sievert (Sv).

Στην συνέχεια, παρατίθεται η εξίσωση υπολογισμού της ενεργής δόσης (*E<sub>eff</sub>*), όπως πραγματοποιήθηκε στην περίπτωση του σπηλαίου του Περάματος στα Ιωάννινα το 2004.

$$E_{eff} \text{ (mSv/y)} = C_{Rn} \times F \times T \times DCF \times u \quad (4)$$

Όπου συμβολίζεται με *C<sub>Rn</sub>* η τιμή συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m<sup>3</sup>), *F* ο παράγοντας ισοδυναμίας (*Equilibrium factor*) μεταξύ του ραδονίου και των θυγατρικών του, *T* ο συνολικός χρόνος έκθεσης στο συγκεκριμένο περιβάλλον ραδιενέργειας (h/y), *DCF* ο παράγοντας μετατροπής της ενεργού δόσης (*dose conversion factor*) και *u* ένας παράγοντας μετατροπής μεταξύ των μονάδων των προηγούμενων μεγεθών (Papachristodoulou et al., 2004).

Η αριθμητική αυτή εξίσωση χρησιμοποιείται επίσης στο σπήλαιο Castanar της Ισπανίας (Alvarez-Callego et al., 2015) και σε σπήλαια στα Bacony mountains της Ουγγαρίας (Kavasi et al., 2010).

Η τιμή του παράγοντα ισοδυναμίας *F* κυμαίνεται από 0,1-0,9 (UNSCEAR, 2006). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το 1994, η I.C.R.P. χρησιμοποιεί *F* = 0,4 ενώ ο Cigna, το 2005, χρησιμοποιεί *F*=0,57 για τις περιπτώσεις σπηλαίων και ορυχείων. Ο ίδιος ερευνητής συγκέντρωσε τις τιμές του παράγοντα ισοδυναμίας που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες μελέτες, όπως παρουσιάζει στην συνέχεια ο πίνακας 13.

Οι Denman and Parkinson, το 1996, στο σπήλαιο Altamira της Ισπανίας, υπολόγισαν την ενεργή δόση ως εξής (Lario et al., 2004):

$$E_{eff} \text{ (mSv)} = [C_{Rn} \text{ (Bq/m}^3\text{)} \times T \text{ (h/year)}] / 126.000 \quad (5)$$

Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί αντίστοιχα σε σπήλαια και εγκαταλελειμμένα ορυχεία της Αγγλίας (Gillmore et al., 2002; Sperrin et al., 2000), προϋποθέτοντας ότι 1 mSv ισοδυναμεί με 126 kBq m<sup>-3</sup>h (Wrixon et al., 1988) και 10 mSv ισούνται με 1 Working Level Month (WLM) (I.C.R.P., 1986), θεωρώντας το παράγοντα *F* = 0.5 (Gillmore et al., 2002).

**Πίνακας 13:** Τιμές παράγοντα ισοδυναμίας (F) σε μελέτες σε σπήλαια ανά τον κόσμο (Cigna, 2005).

| <b>Cave</b>                              | <b>Equilibrium factor</b> | <b>Reference</b>         |
|------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Gellért-hill System, Budapest, Hungary   | 0.94                      | Virag and Urban, 1970    |
| Idem, Aragonite cave                     | 0.73                      | Virag and Urban, 1970    |
| Carlsbad Caverns, NM, USA, Main Cave     | 0.44                      | Yarborough et al., 1978  |
| Idem, Main cave                          | 0.59                      | Ahlstrand and Fry, 1978  |
| Idem, Lower cave                         | 0.50                      | Yarborough et al., 1978  |
| Idem, New Cave                           | 0.90                      | Yarborough et al., 1978  |
| Idem, Pump Room Cave                     | 0.56                      | Ahlstrand and Fry, 1978  |
| Crystal Cave Sequoia, Calif., USA        | 0.90                      | Yarborough et al., 1978  |
| Jewel Cave, SD, USA, Historic Tour       | 0.19                      | Yarborough et al., 1978  |
| Idem, Scenic Tour                        | 0.81                      | Yarborough et al., 1978  |
| Lehman Cave, Nevada, USA                 | 0.64                      | Yarborough et al., 1978  |
| Mammoth Cave, Kentucky, USA              | 0.81                      | Yarborough et al., 1978  |
| Oregon Cave, Oregon, USA                 | 0.66                      | Yarborough et al., 1978  |
| Round Spring Cave, Ozark, MO, USA        | 0.98                      | Yarborough et al., 1978  |
| Wind Cave, SD, USA                       | 0.46                      | Yarborough et al., 1978  |
| Howe Caverns, NY, USA                    | 0.67                      | Seymore et al., 1980     |
| Grotta Grande Vento, Marche, Italy       | 0.69                      | Cigna and Clemente, 1981 |
| Idem Sala dei Duecento                   | 0.85                      | Clemente, 1980           |
| Katerinska Cave, Moravia, Czech Republic | 0.75                      | Burian & Stelcl, 1990    |
| Punkvevni Caves, Moravia, Czech Republic | 0.86                      | Burian & Stelcl, 1990    |
| Sloupsko-sosuvské Caves, CzechRep.       | 0.87                      | Burian & Stelcl, 1990    |
| Balcarka Cave, Moravia, Czech Republic   | 1.94                      | Burian & Stelcl, 1990    |
| Grotta di Quinzano, Verona, Italy        | 0.55                      | Trotti et al., 1993      |
| Szeplő Hill Cave, Budapest, Hungary      | 0.50                      | Szerbin, 1996            |
| Pál Valey Cave, Budapest, Hungary        | 0.48                      | Szerbin, 1996            |
| Therapeutic Cave, Tapolca, Hungary       | 0.51                      | Szerbin, 1996            |
| Vass Imre Cave, Northern Hills, Hungary  | 0.53                      | Szerbin, 1996            |
| Akiyoshi-do Cave, Yamaguchi, Japan       | 0.70                      | Limoto, 2000             |
| Taisyō-do Cave, Yamaguchi, Japan         | 0.71                      | Limoto, 2000             |
| Kagejiyō-do Cave, Yamaguchi, Japan       | 0.52                      | Limoto, 2000             |
| Postojna Cave, Railway Station, Slovenia | 0.56                      | Vaupotic et al., 2001    |
| Idem, Lowest Point, Slovenia             | 0.54                      | Vaupotic et al., 2001    |
| Therapeutic Cave, Tapolca, Hungary       | 0.57                      | Kávási et al., 2003      |

Τέλος, η σχέση υπολογισμού της ενεργής δόσης έχει εμφανιστεί στην διεθνή βιβλιογραφία και ως εξής, στο σπήλαιο Nerja Cave της Ισπανίας (Duenas et al.,2011):

$$E_{eff} \text{ (mSv)} = 7.78 \times F \times T \times C \quad (6)$$

Και ως εξής στο σπήλαιο Manita Pec Cave της Κροατίας (Radolic et al., 2011):

$$E_{eff} \text{ (mSv)} = 7.923 \times F \times T \times C \quad (7)$$

Στον πίνακα 14, παρουσιάζονται οι ιστορικές μονάδες μέτρησης των σχετικών με την ραδιενέργεια όρων καθώς και οι μετατροπές που απαιτούνται από την μία μονάδα μέτρησης στην άλλη, στο διεθνές σύστημα (S.I), σύμφωνα με το λεξικό του οργανισμού IAEA [3].

**Πίνακας 14:** Ιστορικές μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας και σχέσεις ισοδυναμίας τους [3].

| Μονάδα                 | Ορισμός                                                                                                                               | Μετατροπή                                                        |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>R</b><br>Roentgen   | Ακτινοβολία που απαιτείται για να παραχθεί 1 ηλεκτροστατική μονάδα φορτίου (e.s.u), σε 1 cm <sup>3</sup> αέρα (σε κανονικές συνθήκες) | 1 e.s.u. φορτίου<br>=2,083x10 <sup>15</sup> ιόντα/m <sup>3</sup> |
| <b>Bq</b><br>Becquerel | 1 πυρηνική διάσπαση/s                                                                                                                 | 1Bq ≅ 27 pCi<br>≅ 2.703 × 10 <sup>-11</sup> Ci                   |
| <b>Ci</b><br>Curie     | Ακτινοβολία 1 g <sup>226</sup> Ra                                                                                                     | 1 Ci = 3,7 × 10 <sup>10</sup> Bq<br>= 37 GBq                     |
| <b>pCi/L</b>           | Η ενεργότητα ανά μονάδα όγκου                                                                                                         | 1 pCi/L=37 Bq/m <sup>3</sup>                                     |
| <b>Rad</b>             | Μονάδα απορροφούμενης δόσης 100 έργων ανά γραμμάριο ύλης                                                                              | 0,01 J/Kg                                                        |
| <b>Rem</b>             | Μονάδα βιολογικής δόσης                                                                                                               | 1 rem = Q x rad<br>(Q = συντελεστής βιολογικής δράσης)           |
| <b>Gy</b><br>Gray      | Μονάδα απορροφούμενης δόσης                                                                                                           | 1 Gy =100rad<br>= 1 J/gr                                         |
| <b>Sv</b><br>Sievert   | Μονάδα ενεργής δόσης                                                                                                                  | 1 Sievert =100 rem<br>= 1 joule/kilogram                         |

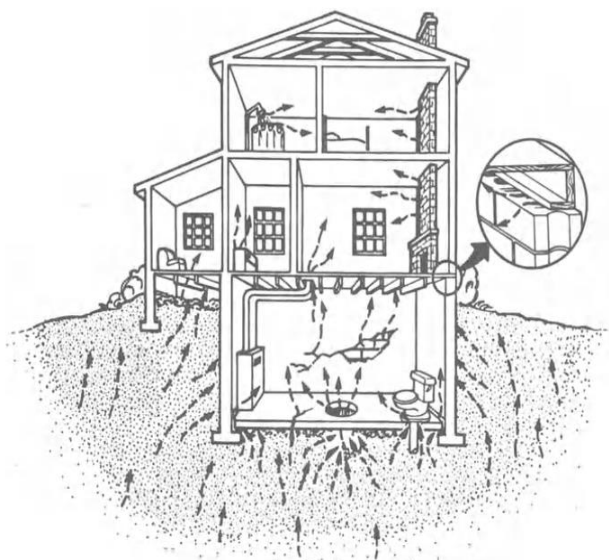
## 1.4 Ραδόνιο σε κτήρια

Το ραδόνιο βρίσκεται κατά πλειοψηφία με ποσοστό 85-90% στο έδαφος, με 5-10% στα οικοδομικά υλικά και τέλος μόλις το 2% στον αέρα και το νερό. Αφού σχηματιστεί και διαφύγει στην ατμόσφαιρα, ένα από τα επόμενα σημεία συγκέντρωσής του είναι τα κτήρια που χρησιμοποιούνται είτε ως κατοικίες είτε ως επαγγελματικοί χώροι, όπου ο άνθρωπος αφιερώνει μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό συμβαίνει γιατί η πίεση στο εσωτερικό του κτηρίου είναι χαμηλότερη από εκείνη στο εξωτερικό του, έτσι ο αέρας μπορεί να εισέλθει στο εσωτερικό του κυρίως από μικρορωγμές στα θεμέλια ή τους τοίχους, κενά στα σημεία ένωσης τοίχου και εδάφους, διάκενα στα ξύλινα πατώματα και από κενά στα σημεία εισόδου σωλήνων ύδρευσης και αποχέτευσης. Στη συνέχεια, με τη θέρμανση του εσωτερικού αέρα, το ραδόνιο μεταφέρεται στα υψηλότερα πατώματα. Παράγοντες που επηρεάζουν την συγκέντρωση ραδονίου μέσα σε κτήρια είναι οι παρακάτω, όπως αναπαριστά το σχήμα 8 (Ε.Ε.Α.Ε., 2006).

- Ο ρυθμός διαφυγής ραδονίου από το έδαφος.
- Το είδος θεμελίωσης της οικοδομής.
- Το ύψος της κατοικίας.
- Η απορροή ραδονίου από τα οικοδομικά υλικά.
- Ο εξαερισμός του σπιτιού.
- Η διαφορά πίεσης στο εσωτερικό του κτιρίου και στο εξωτερικό περιβάλλον.

Έχει παρατηρηθεί ότι το ραδόνιο συγκεντρώνεται αισθητά σε εσωτερικούς χώρους. Οι συγκεντρώσεις του ραδονίου που μετρούνται σε πολυκατοικίες με πολλούς ορόφους, είναι μικρότερες στους πάνω ορόφους, ενώ το επίπεδο ραδονίου είναι υψηλότερο στις μονοκατοικίες συγκριτικά των πολυκατοικιών. Επίσης, οι διαφορές στην θερμοκρασία τους καλοκαιρινούς και τους χειμερινούς μήνες οδηγούν στην εποχιακή διακύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου στο εσωτερικό των κτηρίων. Η θέρμανση και τα τζάκια στα κτήρια οδηγούν σε αυξημένη συγκέντρωση ραδονίου κατά τους χειμερινούς μήνες (Faulkner and Gillmore, 1995). Η ηλικία της πολυκατοικίας καθώς και το ποσοστό βροχόπτωσης είναι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο αυτό. Ο αερισμός των κτηρίων όμως, αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες μείωσης του φαινομένου, όπως περιγράφουν πολλές έρευνες (De Francesco et al., 2010; Dong Xie et al., 2015; Rotger-Griful et al., 2016; Abdallah et al., 2012). Η συγκέντρωση ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους εξαρτάται επίσης, από την θέρμανση και την χρήση του νερού (Nazaroff et al., 1988).

Η Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, λαμβάνοντας υπόψη τις προτάσεις της

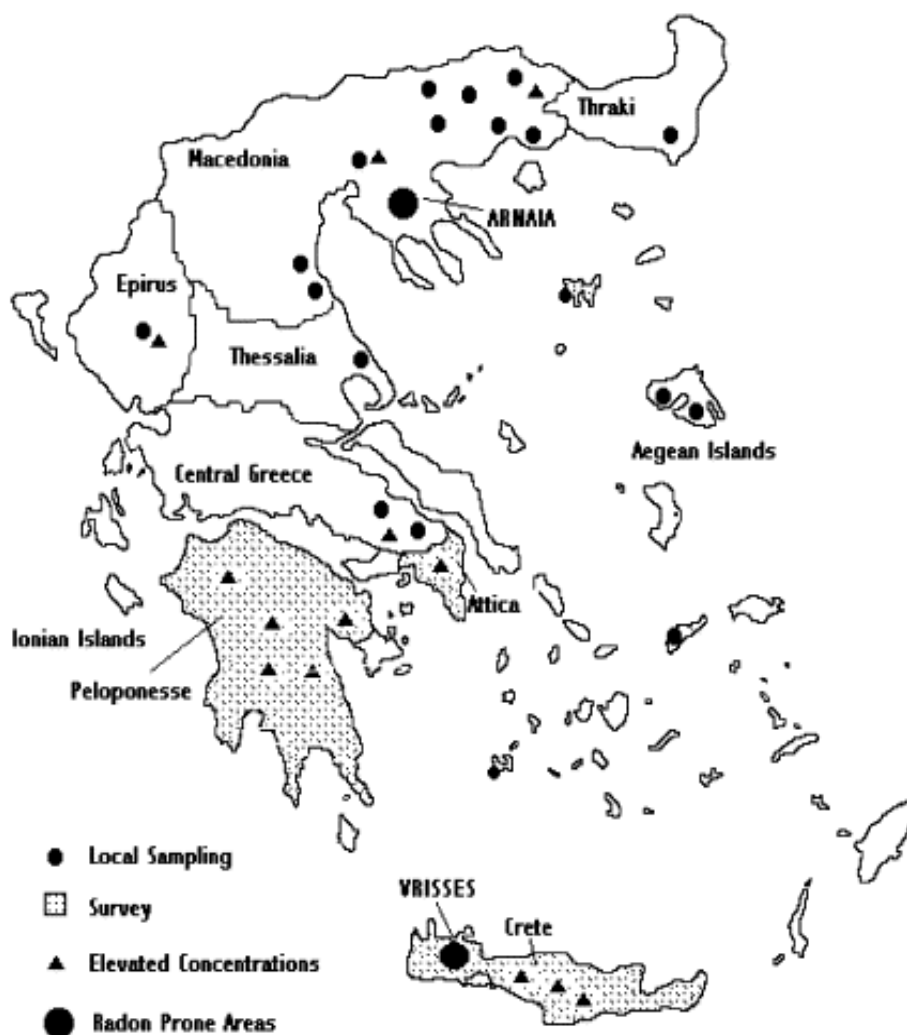


**Σχήμα 8:** Είσοδος ραδονίου στα κτήρια (Cothorn and Smith, 1987).

Διεθνούς Επιτροπής Ακτινοπροστασίας (ICRP) εξέδωσε το 1990 την σύσταση “Προστασία του πληθυσμού από την έκθεση στο ραδόνιο μέσα στα κτήρια” (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 κτήρια.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, τα τελευταία 20 χρόνια, έχουν γίνει πολλές μελέτες που επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους στην μελέτη συγκέντρωσης ραδονίου σε κατοικίες (Hakam and Lferde, 1995; Vukotic et al., 1997; Narayana et al., 1998; Man and Yeung, 1999; Garavaglia et al., 2000; Grattan et al., 2004; Βογιάννης, 2005; Immea et al., 2005; Liuliu et al., 2015). Στον Ελλαδικό χώρο, αναφέρεται το παράδειγμα της Θεσσαλονίκης, που το 1988, έδειξε ότι οι συγκεντρώσεις ραδονίου κυμαίνονται από 8 έως 185 Bq/m<sup>3</sup>, με μέση ετήσια συγκέντρωση  $30 \pm 27$  Bq/m<sup>3</sup>. Τιμές εντός των επιτρεπτών ορίων για κτήρια σύμφωνα με τις αρμόδιες επιτροπές καθώς και χαμηλές συγκριτικά με αντίστοιχες μελέτες σε χώρες με τα ίδια κλιματολογικά χαρακτηριστικά. Χώρες με πιο ψυχρό κλίμα όπως Ιρλανδία και Ελβετία παρουσιάζουν πολύ πιο υψηλές τιμές (Στούλος, 1998). Αντίστοιχες μελέτες στην Ελλάδα επιβεβαιώνουν ότι δεν αναμένονται υψηλές τιμές σε κτήρια (Nikolopoulos et al., 1999).

Αποτελέσματα επόμενης σχετικής δημοσίευσης, το 2002, με μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου σε 1277 ελληνικές κατοικίες, εκ των οποίων οι 303 βρίσκονται στην Κρήτη, υπολόγισαν ότι η ενεργή δόση που αποδίδουν κυμαίνεται από  $0,09 \pm 0,04$  έως  $28 \pm 4$  mSv, ενώ το ποσοστό των τιμών που ξεπέρασε τα 400 Bq/m<sup>3</sup>, οριακή τιμή όπως πρότεινε η Ευρωπαϊκή κοινότητα, ήταν πολύ μικρό. Παρόλα αυτά, όπως παρουσιάζει ο χάρτης, σχήμα 9, οι περιοχές Βρύσσελ, Αποκορώνου και Άρναια, Χαλκιδικής χαρακτηρίζο-



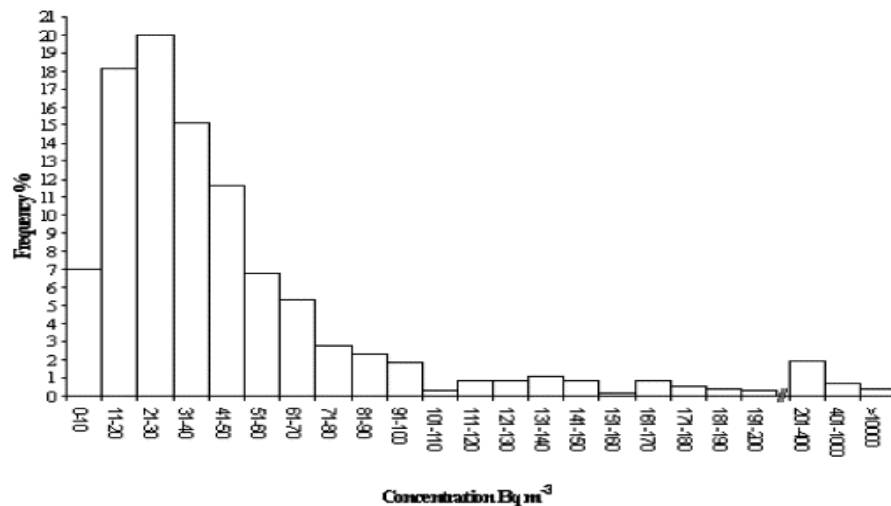
**Σχήμα 9:** Χάρτης απεικόνισης περιοχών αυξημένων συγκεντρώσεων ραδονίου στην Ελλάδα (Nikolopoulos et al., 2002).

νται ως οι περισσότεροι εκτεθειμένες περιοχές στη συγκέντρωση του ραδονίου (Nikolopoulos et al., 2002). Το παρακάτω ιστόγραμμα, στο σχήμα 10, παρουσιάζει την κατανομή συχνότητας – συγκέντρωσης του ραδονίου σε κατοικίες στον Ελλαδικό χώρο (Nikolopoulos et al., 2002).

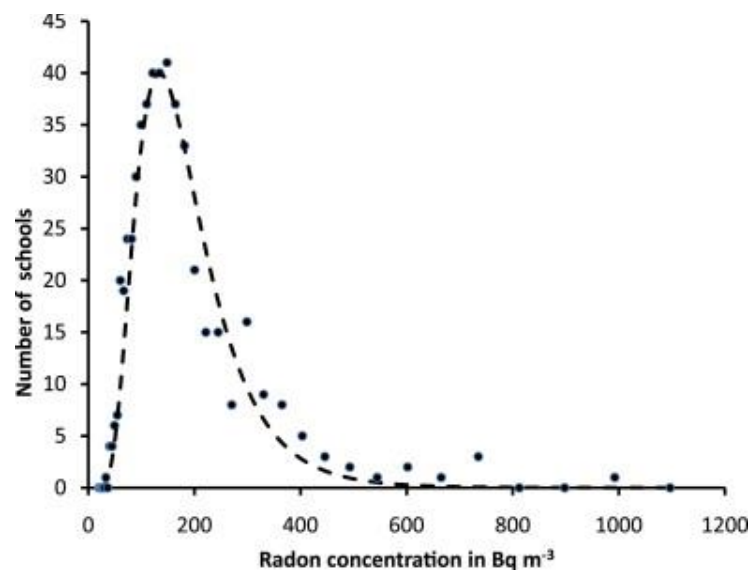
Η συγκέντρωση ραδονίου έχει μετρηθεί και σε σχολικά κτήρια, όπως δημοσιεύτηκε το 2011. Το μεγαλύτερο ποσοστό των 512 σχολικών κτηρίων (εκ των οποίων τα 11 ανήκουν στην Κρήτη) παρουσίασαν τιμές συγκέντρωσης που κυμαίνονται από 60-250 Bq/m<sup>3</sup>, όπως εμφανίζεται στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 11 (Papachristodoulou et al., 2010).

Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (Ε.Ε.Α.Ε), αρμόδια αρχή για την παρακολούθηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος στη χώρα μας, το 2006, συγκέντρωσε από διάφορους διεθνείς οργανισμούς τα όρια που προτείνουν για την συγκέντρωση ραδονίου στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών και παρουσιάζονται στον πίνακα 15.

Σε συνέχεια των μελετών αυτών, πλήθος μελετών έχει γίνει με επίκεντρο τους επαγγελματικούς χώρους είτε αυτοί είναι κτήρια είτε όχι, όπως ορυχεία και σπήλαια. Καθώς μετά την κατοικία ο άνθρωπος αφιερώνει στους χώρους αυτούς το δεύτερο μεγαλύτερο



**Σχήμα 10:** Κατανομή συχνότητας – συγκέντρωσης του ραδονίου σε κατοικίες στην Ελλάδα (Nikolopoulos et al., 2002).



**Σχήμα 11:** Διάγραμμα κατανομής συγκέντρωσης ραδονίου σε σχολικά κτήρια στην Ελλάδα (Papachristodoulou et al., 2010).

διάστημα του χρόνου του. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε 42 εργασιακούς χώρους στα Ιωάννινα, το 2010, ακολούθησαν μια λογαριθμική κανονική κατανομή με αριθμητικό μέσο όρο ίσο με  $95 \pm 51 \text{ Bq/m}^3$ , τιμή που όπως θα αναλυθεί και στην συνέχεια, είναι εντός των επιτρεπτών ορίων ασφαλής συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, καθώς δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική εποχιακή διακύμανση. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις ραδονίου που μετρήθηκαν σε υπόγειους χώρους ήταν σημαντικά υψηλότερες από εκείνες των

άλλων ορόφων. Η τιμή της ενεργής δόσης υπολογίστηκε με εύρος 0,13 - 1,36 mSv/y, με μέση τιμή ίση με 0,62 mSv/y. Τα αναφερόμενα στοιχεία συμβάλλουν στην αξιολόγηση του ραδονίου και την εκτίμηση της δόσης σε εθνικό επίπεδο για τους εργασιακούς χώρους (Papachristodoulou et al., 2010).

**Πίνακας 15:** Όρια συγκέντρωσης στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών (Ε.Ε.Α.Ε., 2006).

| <b>Οργανισμός<br/>/ Κράτος</b> | <b>Υπάρχουσες<br/>κατοικίες<br/>(Bq/ m<sup>3</sup>)</b> | <b>Νεόδητες<br/>κατοικίες<br/>(Bq/ m<sup>3</sup>)</b> |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>ICRP</b>                    | 400                                                     | 200                                                   |
| <b>CECt</b>                    | 400                                                     | 200                                                   |
| <b>WHO</b>                     | 200                                                     | 200                                                   |
| <b>Σουηδία</b>                 | 800                                                     | 140                                                   |
| <b>Νορβηγία</b>                | 800                                                     | 200                                                   |
| <b>Φιλανδία</b>                | 800                                                     | 200                                                   |
| <b>Η.Π.Α</b>                   | ISO                                                     | 150                                                   |

Μια ακόμη σημαντική πηγή ραδονίου είναι τα οικοδομικά υλικά. Τα κοινά οικοδομικά υλικά όπως το ξύλο, τα τούβλα και το τσιμέντο εκλύουν σχετικά μικρές ποσότητες ραδονίου. Τα πιο σημαντικά ισότοπα που εμφανίζονται στα οικοδομικά υλικά είναι το <sup>226</sup>Ra, το <sup>232</sup>Th και το <sup>40</sup>K. Υπάρχουν, ωστόσο, υλικά όπως ο γρανίτης και ορισμένα είδη πέτρας και γύψου που είναι ιδιαίτερα ραδιενεργά (N.C.R.P., 1987). Τα οικοδομικά υλικά, περιέχουν ποσότητες από ραδιοϊσότοπα που είτε είναι μέλη των φυσικών ραδιενεργών σειρών, είτε όχι (Louizi et al., 1994).

## 1.5 Επιπτώσεις στην υγεία – Όρια Ασφαλείας

Η αλληλεπίδραση του ραδονίου και της α ακτινοβολίας που εκλύεται κατά την διάσπασή του, με τον ανθρώπινο οργανισμό, έχει οδηγήσει σε γενετικές μεταλλάξεις και την ανάπτυξη καρκίνου, κυρίως του πνεύμονα, κατατάσσοντας το ραδόνιο και τα θυγατρικά του ως καρκινογόνο κλάσης 1 και Α αντίστοιχα (W.H.O., 1988; E.P.A., 1987). Το 1921, η γιατρός Margaret Uhlig, πρότεινε τη συσχέτιση της εισπνοής ραδονίου με τον καρκίνο των πνευμόνων (Uhlig, 1921). Επιδημιολογικές μελέτες μάλιστα, εκτιμούν ότι το 13,4% των θανατηφόρων καρκίνων του πνεύμονα αποδίδεται στο ραδόνιο, αν και το μεγαλύτερο μέρος αυτού, συνδέεται και με το μακροχρόνιο κάπνισμα (E.P.A., 2003). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρει στην επικράτεια των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, το 1995, ότι από τους 157.400 θανάτους οι 21.100 αποδόθηκαν στην παρουσία ραδονίου σε κλειστούς χώρους. Τα αποτελέσματα των κυριότερων μελετών που πραγματοποιήθηκαν από τον I.C.R.P. και τον N.R.C., δίνουν πιθανότητα ανάπτυξης θανατηφόρου καρκίνου του πνεύμονα  $1,0 \times 10^{-4}$  (N.R.C., 1988) και  $0,87 \times 10^{-4}$  (I.C.R.P., 1994), σε ένα μέλος του γενικού πληθυσμού που εκτίθεται συνεχώς σε 1 Bq/m<sup>3</sup>, με μέση ετήσια συγκέντρωση ραδονίου για 70 έτη.

Για τον υπολογισμό του κινδύνου από το ραδόνιο και τα θυγατρικά του, ερευνητές έχουν βασιστεί σε διαφορετικές ομάδες πληθυσμού όπως εργάτες ορυχείων στις ΗΠΑ (Waxweiler et al., 1981; Whittemore and McMillan, 1983; Chovil, 1981; Muller et al., 1985), στη Νότιο Κίνα (Xian-Zhen et al., 1993) και στην Τσεχία (Seve et al., 1985; Kunz et al., 1979). Αντίστοιχες μελέτες αναφέρονται σε εργάτες ορυχείων φωσφοριζόντων υλικών στον Καναδά (Morrison et al., 1981; Morrison et al., 1985), σε εργάτες ορυχείων μετάλλων, κυρίως σιδήρου, στη Σουηδία (Snihls, 1973; Axelsson and Sundell, 1978; Damberg and Larsson, 1982). Με σκοπό την προστασία και την πρόληψη ίδιων φαινομένων, ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί επίσης στους εργαζόμενους σε λουτροπηγές και σπήλαια σε πάρα πολλές χώρες (Νικολόπουλος, 2000), αποτελέσματα των οποίων θα παρουσιαστούν στην συνέχεια. Παρόλα αυτά λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων οι επιδημιολογικές μελέτες γενικού πληθυσμού συνεχίζονται μέχρι σήμερα με σκοπό την αντιπροσωπευτική εκτίμηση του κινδύνου από το ραδόνιο.

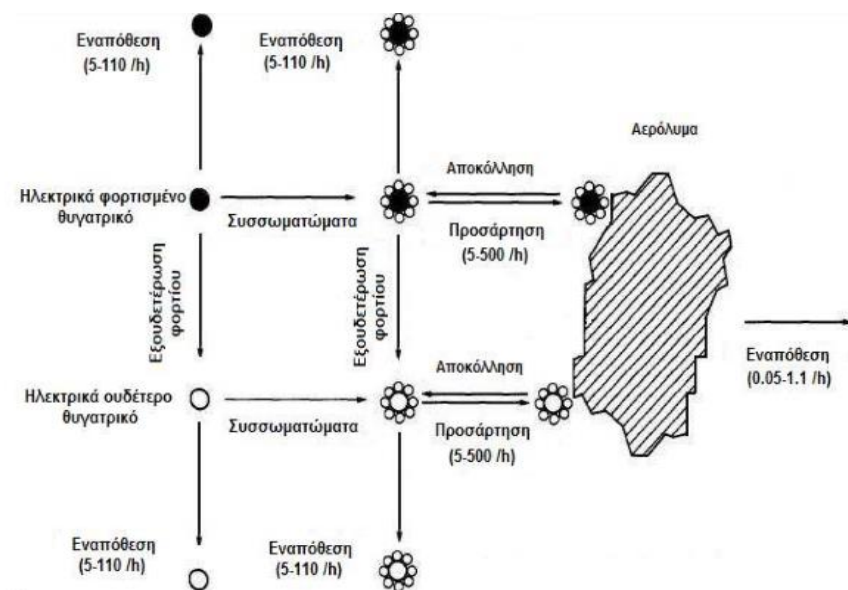
Το ραδόνιο, όντας αέριο, εισέρχεται μέσω της αναπνοής στον ανθρώπινο οργανισμό. Η διάρκεια όμως της εισπνοής και εκπνοής είναι πιο σύντομη του χρόνου ημιζωής του (3,82 ημέρες), έτσι η πιθανότητα να αποδιεγερθεί το ραδόνιο εντός του οργανισμού είναι μικρή. Ωστόσο μια ποσότητα αέρα υπάρχει συνέχεια στους πνεύμονες και τα ραδιενεργά του προϊόντα που δημιουργούνται είναι στερεά και ευθύνονται για το μεγαλύτερο ποσοστό της

ακτινοβολήσης του οργανισμού. Από τα θυγατρικά του, τα ισότοπα του πολωνίου  $^{218}\text{Po}$  και  $^{214}\text{Po}$  θεωρείται ότι έχουν την μεγαλύτερη ραδιοβιολογική επικινδυνότητα (UNSCEAR, 2000). Επιπλέον, το ραδόνιο αποτελεί παράγοντα επιβάρυνσης της ακτινοβολίας στο στομάχι που οφείλονται στην κατανάλωση νερού (W.H.O., 1993). Η επιβάρυνση υπολογίζεται με μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου στα ύδατα (E.P.A., 2000). Αναφέρεται ότι στην πρώτη μελέτη συγκέντρωσης ραδονίου σε πόσιμο νερό στην Ελλάδα σημειώθηκαν τιμές από 0.8 έως 24 Bq/L, όταν σύμφωνα με το E.P.A., το 2000, το όριο ήταν 11 Bq/L (Nikolopoulos and Louizi, 2008). Ενώ αντίστοιχη έρευνα στην Ιορδανία, παρατήρησε συγκέντρωση ραδονίου 3,1-5,7 Bq/L σε νερό γεώτρησης και 2,5-4,7 Bq/L σε πόσιμο νερό (Al.Bataina et al., 1997). Η Ε.Ε. εξέδωσε το 2013, την Οδηγία 2013/51/Euratom «περί θεσπίσεως απαιτήσεων προστασίας της υγείας του πληθυσμού από ραδιενεργές ουσίες που περιέχονται στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης», ορίζοντας ως επίπεδο δράσης για τη λήψη μέτρων για το πόσιμο νερό τα 100 Bq/L. Στην περίπτωση που η συγκέντρωση ραδονίου στο πόσιμο νερό είναι μικρότερη από 100 Bq/L δεν απαιτούνται περιοριστικά μέτρα.

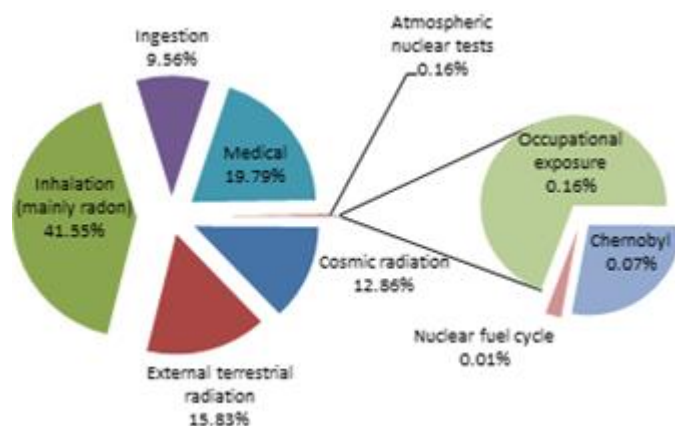
Τα θυγατρικά του ραδονίου όμως, έχουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά στην ατμόσφαιρα, σε σχέση με το ραδόνιο. Είναι χημικώς ενεργά στοιχεία που μετά το σχηματισμό τους μπορούν να παραμείνουν αδέσμευτα στον αέρα, να αλληλοεπιδράσουν με τα μόρια του αέρα δημιουργώντας συσσωματώματα ή άλλα μόρια ή να επικαθίσουν σε μια επιφάνεια. Από ραδιο- βιολογική άποψη, πιο ενδιαφέρουσα κρίνεται η συμπεριφορά τους σε σχέση με τα αερολύματα της ατμόσφαιρας. Η εναπόθεση σε επιφάνειες είναι σημαντικός μηχανισμός απομάκρυνσης των θυγατρικών ισοτόπων του ραδονίου από τον αέρα. Στην πραγματικότητα μετά την εναπόθεσή τους σε μια επιφάνεια τα θυγατρικά του ραδονίου δεν θεωρούνται πλέον απειλή για τον ανθρώπινο οργανισμό επειδή δεν περιέχονται στον εισπνεόμενο αέρα. Το σχήμα 12, παρουσιάζει πιθανές καταστάσεις στις οποίες μπορούν να βρεθούν τα θυγατρικά προϊόντα του ραδονίου και ο ρυθμός της κάθε διαδικασίας, που αποτελεί μέτρο της πιθανότητας να πραγματοποιηθεί η κάθε διαδικασία.

Σύμφωνα με την *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, έχει υπολογιστεί ότι περίπου το 42% της συνολικής ετήσιας δόσης που δέχεται ο μέσος κάτοικος του πλανήτη, εξαιτίας των φυσικών ραδιενεργών πηγών, οφείλεται στο ραδόνιο, όπως απεικονίζει το σχήμα 13, ενώ το ποσό ενεργής δόσης που λαμβάνεται από τη φυσική ραδιενέργεια είναι 2,4 mSv, σύμφωνα με τον πίνακα 16 και το σχήμα 14.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, το ενδιαφέρον των επιστημών και των διεθνών επιτροπών που ασχολούνται με την προστασία της ανθρώπινης υγείας έχουν θεσπίσει όρια ασφαλείας για την έκθεση του ανθρώπου με ραδιενεργές ακτινοβολίες.



**Σχήμα 12:** Πιθανές καταστάσεις στις οποίες μπορούν να βρεθούν τα θυγατρικά προϊόντα του ραδονίου (Πατήρης, 2009).



**Σχήμα 13:** Συνεισφορά των διαφόρων πηγών ακτινοβολίας στη μέση ετήσια δόση (UNSCEAR, 2008).



**Σχήμα 14:** Πηγές έκθεσης σε ακτινοβολία παγκοσμίως (δόσεις σε mSv) (UNSCEAR, 2008).

Σύμφωνα με την I.C.R.P. και τη δημοσίευση 65 προτείνεται ως επιτρεπτό για την ετήσια ενεργή δόση τιμές που κυμαίνονται από 3-10 mSv. Οι κανονισμοί που αφορούν την προστασία από ραδιενεργή ακτινοβολία γίνονται συνεχώς πιο αυστηροί. Η I.C.R.P., το 1993, με σκοπό να μειώσει το βαθμό επικινδυνότητας από την έκθεση σε ραδιενεργή ακτινοβολία στο αέρα του εσωτερικού κτηρίων και εργασιακών χώρων πρότεινε όρια 200-600 Bq/m<sup>3</sup> για κατοικίες και 500-1500 Bq/m<sup>3</sup> για εργασιακούς χώρους, για τη συγκέντρωση ραδονίου.

**Πίνακας 16:** Ετήσιες ισοδύναμες δόσεις από αντίστοιχες πηγές έκθεσης (UNSCEAR, 2000).

| Πηγή έκθεσης                | Μέση ετήσια ισοδύναμη Δόση (mSv) |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Κανονικό υπόβαθρο           |                                  |
| <b>Εξωτερική έκθεση</b>     |                                  |
| Κοσμική ακτινοβολία         | 0,38                             |
| Γήινη ακτινοβολία           | 0,46                             |
| <b>Εσωτερική έκθεση</b>     |                                  |
| Κοσμογενικά ραδιονουκλείδια | 0,01                             |
| Γήινα ραδιονουκλείδια       | 0,23                             |
| Ραδόνιο                     | 1,205                            |
| Θορόνιο                     | 0,07                             |
| <b>Σύνολο</b>               | <b>2,4</b>                       |

Το 2009, η WHO μείωσε ακόμα περισσότερο τα προτεινόμενα όρια στα 300 Bq/m<sup>3</sup> για τις κατοικίες και τα 1000 Bq/m<sup>3</sup> για εργασιακούς χώρους, τα οποία συνεχίζει να αναφέρει η I.C.R.P., το 2014, όπως στον πίνακα 17.

Το 2014, η International Basic Safety standards (I.A.E.A) όρισε ως μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ασφαλείας τα 300 Bq/m<sup>3</sup> στην περίπτωση των κτηρίων καθώς η Επίσημη εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης L13, Volume 57 με την οδηγία 2013/59/Ευρατόμ του συμβουλίου, της 5ης Δεκεμβρίου 2013, για τον καθορισμό βασικών προτύπων ασφαλείας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από ιοντίζουσες ακτινοβολίες, καταργώντας τις οδηγίες 89/618/Ευρατόμ, 90/641/Ευρατόμ, 96/29/Ευρατόμ, 97/43/Ευρατόμ και 2003/122/Ευρατόμ, αναφέρει τα 300 Bq/m<sup>3</sup> ως μέγιστο ετήσιο επιτρεπόμενο όριο συγκέντρωσης ραδονίου στον αέρα, εκτός αν δικαιολογείται από τις εκάστοτε επικρατούσες εθνικές συνθήκες. Υπόγειοι χώροι εργασίας όπως κυρίως ορυχεία και σπήλαια θεωρούνται δυνητικοί για τον κίνδυνο του ραδονίου, για τον λόγο αυτό η συγκέντρωση ραδονίου είναι σημαντικό να μετρηθεί στους χώρους αυτούς.

Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ως όριο για τη δόση που δέχεται το κοινό το 1 mSv ανά έτος, ενώ το όριο της ενεργού δόσης για επαγγελματική έκθεση μικρότερο των 6 mSv απαιτείται δοσιμετρία χώρου και συνεχείς έλεγχος. Για δόση που κυμαίνεται μεταξύ των 6-20 mSv ανά έτος σε επαγγελματικούς χώρους απαιτείται ατομική δοσιμετρία. Για περιπτώσεις που οι τιμές που ξεπερνούν τα 20 mSv θεωρούνται καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και απαιτείται αυστηρός σχεδιασμός και μέτρα προστασίας (Επ. εφημερίδα L13 Ε.Ε., 2014).

Ο πίνακας 18 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα όρια ασφαλείας για την συγκέντρωση ραδονίου όπως ορίζεται από αντίστοιχες νομοθεσίες του εκάστοτε κράτους (Cigna, 2005).

**Πίνακας 17:** Όρια ασφαλείας για την ακτινοβολία ραδονίου (I.C.R.P., 2014).

|                       | Επίπεδο αναφοράς (Bq/m <sup>3</sup> ) | Ετήσια Ενεργή Δόση (mSv) |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| <b>Κατοικίες</b>      | 300                                   | 17                       |
| <b>Χώροι εργασίας</b> | 1000                                  | 27                       |
| <b>Ορυχεία</b>        | 1000                                  | 8                        |

**Πίνακας 18:** Εθνικά όρια ασφαλείας (Cigna, 2005).

| Country                     | Advisory reference levels |                          | Enforced reference levels |                          |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Austria (existing)          | 400 Bq/m <sup>3</sup>     | 10800 pCi/m <sup>3</sup> |                           |                          |
| Austria (new)               | 200 Bq/m <sup>3</sup>     | 5400 pCi/m <sup>3</sup>  |                           |                          |
| Czech Rep. (existing)       | 200 Bq/m <sup>3</sup>     | 5400 pCi/m <sup>3</sup>  | 1000 Bq/m <sup>3</sup>    | 27000 pCi/m <sup>3</sup> |
| Czech Rep. (new)            | 100 Bq/m <sup>3</sup>     | 2700 pCi/m <sup>3</sup>  | 200 Bq/m <sup>3</sup>     | 5400 pCi/m <sup>3</sup>  |
| Denmark (exist. & new)      |                           |                          | 400 Bq/m <sup>3</sup>     | 10800 pCi/m <sup>3</sup> |
| Estonia (exist. & new)      | 1500 Bq/m <sup>3</sup>    | 40500 pCi/m <sup>3</sup> |                           |                          |
| Finland (exist. & new)      |                           |                          | 400 Bq/m <sup>3</sup>     | 10800 pCi/m <sup>3</sup> |
| Greece (existing)           | 400 Bq/m <sup>3</sup>     | 10800 pCi/m <sup>3</sup> |                           |                          |
| Greece (new)                | 200 Bq/m <sup>3</sup>     | 5400 pCi/m <sup>3</sup>  |                           |                          |
| Hungary (exist. & new)      |                           |                          | 1000 Bq/m <sup>3</sup>    | 27000 pCi/m <sup>3</sup> |
| Ireland (exist. & new)      | 200 Bq/m <sup>3</sup>     | 5400 pCi/m <sup>3</sup>  |                           |                          |
| Italy (exist. & new)        |                           |                          | 500 Bq/m <sup>3</sup>     | 13500 pCi/m <sup>3</sup> |
| Latvia (existing)           | 1000 Bq/m <sup>3</sup>    | 27000 pCi/m <sup>3</sup> |                           |                          |
| Latvia (new)                |                           |                          | 300 Bq/m <sup>3</sup>     | 8100 pCi/m <sup>3</sup>  |
| Lithuania (existing)        |                           |                          | 400 Bq/m <sup>3</sup>     | 10800 pCi/m <sup>3</sup> |
| Lithuania (new)             |                           |                          | 200 Bq/m <sup>3</sup>     | 5400 pCi/m <sup>3</sup>  |
| Slovak Rep.(existing) (*)   |                           |                          | 500 Bq/m <sup>3</sup>     | 13500 pCi/m <sup>3</sup> |
| Slovak Rep. (existing) (**) |                           |                          | 1000 Bq/m <sup>3</sup>    | 27000 pCi/m <sup>3</sup> |
| Slovak Rep. (new) (*)       |                           |                          | 250 Bq/m <sup>3</sup>     | 6750 pCi/m <sup>3</sup>  |
| Slovenia (exist. & new)     | 1000 Bq/m <sup>3</sup>    | 27000 pCi/m <sup>3</sup> |                           |                          |
| Sweden (existing)           |                           |                          | 400 Bq/m <sup>3</sup>     | 10800 pCi/m <sup>3</sup> |
| Sweden (new)                |                           |                          | 200 Bq/m <sup>3</sup>     | 5400 pCi/m <sup>3</sup>  |
| UK (exist. & new)           |                           |                          | 400 Bq/m <sup>3</sup>     | 10800 pCi/m <sup>3</sup> |

## Κεφάλαιο 2

### Ραδόνιο σε σπήλαια

Εκτός από την μελέτη του φαινομένου συγκέντρωσης του ραδονίου σε κατοικίες, σε οικοδομικά υλικά, το νερό της βρύσης ή γεωθερμικών πηγών και τον αέρα, έχει μελετηθεί η ύπαρξη ραδονίου και στα σπήλαια. Τα τελευταία χρόνια, ένα μεγάλο ποσοστό γνώσεων σχετικά με τη συμπεριφορά του ραδονίου στο ιδιόμορφο αυτό περιβάλλον είναι διαθέσιμο από την διεθνή βιβλιογραφία. Τα σπήλαια, αποτελούν μορφοτεκτονικές δομές που από την δομή τους αλλά και από την θέση δημιουργία τους μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά σε σχετικές έρευνες.

Καθώς, σε αντίθεση με άλλα μικροπερατά ή αδιαπέρατα πετρώματα, τα ανθρακικά πετρώματα, λόγω της διαλυτότητάς τους, αποτυπώνουν 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. Η διαδικασία της καρστικοποίησης είναι μια δυναμική διεργασία, χαρακτηριστικά εγγενής των ανθρακικών πετρωμάτων, εξελισσόμενη στο χρόνο μόνο υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Αυτή η διαδικασία εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες όπως 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 «εν δυνάμει» καρστικό, και 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).

Το ραδόνιο, όντας αέριο, διαφεύγει και εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, έτσι τα σπήλαια όντας μία από τις πιο άμεσες και φυσικές δομές, ευνοούν την παρατήρηση του φαινομένου αυτού. Περισσότερες από 30.000 δημοσιεύσεις σε παγκόσμιο επίπεδο αναφέρονται στο ραδόνιο, εκ των οποίων περισσότερες από 1.000 επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους στην συγκέντρωση του ραδονίου σε σπήλαια και καρστικές δομές [4]. Σε αντίθεση με την Ελλάδα που αντίστοιχες μελέτες σε σπήλαια είναι ελάχιστες (Πατήρης, 2009; Papastefanou et al., 2005; Papachristodoulou et al., 2004; Speleological Expedition Lion, 2013, Τσουκαλά, 2013). Η Ελλάδα, ως χώρα πλούσια σε ασβεστολιθικά πετρώματα, εμφανίζει μεγάλο αριθμό σπηλαίων όπως παρουσιάζει ο χάρτης κατανομής ασβεστολιθικών πετρωμάτων και σπηλαίων, στο σχήμα 15.



Σημειώνεται ότι η νήσος Κρήτη εμφανίζει τον μεγαλύτερο συγκριτικά με τις άλλες περιοχές, αριθμό σπηλαίων και συγκεκριμένα οι νομοί Ηρακλείου και Χανίων. Στα πλαίσια καταγραφής των σπηλαίων, ο αριθμός των σπηλαίων ξεπερνά τα 1.500 στον νομό των Χανίων σύμφωνα με στοιχεία της σπηλαιολογικής ομάδας του ορειβατικού συλλόγου Χανίων και την επίσημη καταγραφή τους μέχρι τώρα από τον Χανιώτη σπηλαιολόγο, Α. Πλυμάκη. Βέβαια, ο αριθμός αυτός με τον πέρασμα των χρόνων συνεχώς αυξάνεται καθώς συνέχεια ανακαλύπτονται και καταγράφονται νέα σπήλαια και σπηλαιοβάραθρα (Πλυμάκης, 2002).

Λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων που έχουν παρατηρηθεί σε σπήλαια και ορυχεία, πολλές νομοθετικές διατάξεις θέσπισαν περιορισμούς για την συγκέντρωση ραδονίου σε αυτά. Σπήλαια, σήραγγες και υπόγειοι χώροι συχνά αναφέρονται ρητά σε συστάσεις και κανονισμούς. Ορισμένοι οργανισμοί, όπως η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (US Environmental Protection Agency) ή η Εθνική Ακαδημία Επιστημών των ΗΠΑ (US National Academy of Sciences), τονίζουν τον κίνδυνο ύπαρξης ραδονίου. 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 (Doll, 1992).

Ο Hakl και οι συνάδελφοί του (Hakl et al., 1997), έχουν δημοσιεύσει μία πολύ εκτεταμένη αναφορά σχετικά με την παρακολούθηση του ραδονίου σε σπήλαια, έχοντας συλλέξει μεγάλο αριθμό δεδομένων, κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Ο ρόλος του ραδονίου ως φυσικός ιχνηλάτης για τη μελέτη της διεπιφάνειας της λιθόσφαιρας, της υδρόσφαιρας και της ατμόσφαιρας είναι θεμελιώδης. Αυτό μπορεί να παρέχει πολλές πληροφορίες σχετικά με την ανάπτυξη και τις αλλαγές του μικροκλίματος του σπηλαίου (Cigna, 2005). Είναι γνωστό επίσης, ότι το ραδόνιο, καθώς και το διοξείδιο του άνθρακα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ιχνηλάτες για να διερευνηθεί το κλίμα των σπηλαίων κι ιδιαίτερα η κυκλοφορία του αέρα σε αυτά (Doll, 1992).

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, και δεδομένου ότι το σπήλαιο είναι ένα περίπλοκο σύστημα, πολλές έρευνες έχουν προσπαθήσει να εξηγήσουν τις υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου που παρατηρούνται σε αυτά, καθώς τους παράγοντες και το μέγεθος που αυτοί επηρεάζουν το φαινόμενο αυτό. Μερικοί από αυτούς είναι ο τρόπος γένεσης των σπηλαίων, η λιθοστρωματογραφία, τα γεωμορφολογικά τους χαρακτηριστικά, το μέγεθος και η ποσότητα των ρωγμών που παρατηρούνται στο εσωτερικό τους. Τα ασβεστολιθικά πετρώματα, στα οποία τα φυσικά σπήλαια συνήθως αναπτύσσονται, περιέχουν 1,3 – 2,4 ppm ουρανίου (Hakl et al, 1997). Επίσης, ο αερισμός τους είναι ένας ιδιαίτερος μηχανισμός, η

κατανόηση του οποίου, μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την κυκλοφορία και την εναλλαγή του αέρα σε αυτά. Ο αερισμός τους όμως, δεν θα μπορούσε να εξεταστεί ασύνδετα με τις τιμές της θερμοκρασίας που επικρατούν μέσα και έξω από το σπήλαιο. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες καθιστούν δύσκολη την διεξαγωγή ολοκληρωτικών συμπερασμάτων, καθώς κάθε σπήλαιο είναι διαφορετικό και μοναδικό. Στην συνέχεια, θα γίνει προσπάθεια αποτύπωσης προβληματισμών που έχουν απασχολήσει την διεθνή επιστημονική κοινότητα, καθώς θα γίνει αναφορά σε αντίστοιχα παραδείγματα ερευνών επικεντρωμένων στην συγκέντρωση ραδονίου σε σπήλαια ανά τον κόσμο και την Ελλάδα.

## 2.1 Αερισμός των σπηλαίων

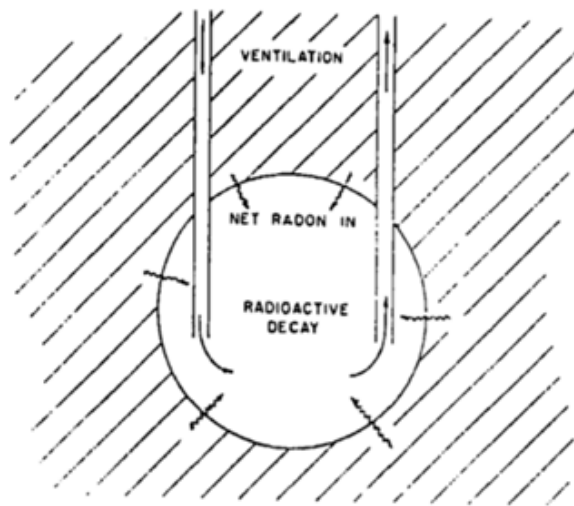
Όπως στα κτήρια, έτσι και στα σπήλαια, η κυκλοφορία και η εναλλαγή του αέρα, έχει καθοριστικό ρόλο στην συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών του. Τα άτομα του ραδονίου, μετά τη διάσπαση τους από το μητρικό ράδιο, διαχέονται ελεύθερα στα διάκενα μεταξύ ορυκτών και σωματιδίων του εδάφους, όπου γίνονται μέρος του εδαφικού αερίου. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου στον εδαφικό αέρα που κυκλοφορεί στο πορώδες και τα τριχοειδή αγγεία, λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, μπορούν να πλησιάσουν τιμές της τάξης των  $55.000 \text{ Bq/m}^3$ . Τα επίπεδα του ραδονίου δύναται να προσεγγίσουν τα επίπεδα του εδαφικού αέρα, παρά μόνο εάν οι υπόγειες κοιλότητες έχουν φυσικά ή τεχνητά συστήματα αερισμού (Wilkening, 1990).

Η μετεωρολογία σπηλαίων αναφέρεται στο μικροκλίμα και την σύνθεση του αέρα στα σπήλαια. Πιο συγκεκριμένα, στην μετεωρολογία των σπηλαίων περιλαμβάνονται παράμετροι όπως η θερμοκρασία του αέρα, το περιεχόμενο υδρατμών του αέρα (εκφραζόμενο ως σχετική υγρασία), τον ρυθμό εξάτμισης, την υγροποίηση, την κίνηση του αέρα (ταχύτητα, διεύθυνση, ροή κτλ), τη βαρομετρική πίεση, τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα καθώς τα επίπεδα ραδονίου και άλλων επικίνδυνων αερίων όπως μεθάνιο, υδρογόνο και μονοξειδίου του άνθρακα. Πρόσθετα των παραπάνω παραμέτρων του αέρα συχνά καταγράφονται στην μετεωρολογία σπηλαίων και η θερμοκρασία των ιζημάτων και των πετρωμάτων των σπηλαίων. Η παρατήρηση της μεταβλητότητας των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι μια δύσκολη διαδικασία λόγω της διαφορετικότητας των σπηλαίων αλλά και των διαφορετικών παραμέτρων που εμφανίζουν διαφορετικές ακολουθίες. Γενικά η μεταβλητότητα της θερμοκρασίας, υγρασίας, εξάτμισης, υγροποίησης και των επιπέδων του διοξειδίου του

άνθρακα είναι μεγαλύτερη κοντά στις εισόδους των σπηλαίων. Βαθύτερα στα σπήλαια αυτές οι παράμετροι μπορεί να διαφέρουν σε πολύ μικρότερο βαθμό. Οι θερμοκρασίες των ιζημάτων, του νερού και των πετρωμάτων τείνουν να παρουσιάζουν πολύ μικρότερη μεταβλητότητα από την θερμοκρασία του αέρα στην ίδια περιοχή. Η ροή του αέρα δηλαδή η ταχύτητα και η διεύθυνση του είναι πολύ πιο δύσκολο να μελετηθεί ως γενικό σύνολο. Κοντά στην είσοδο των σπηλαίων αναμένεται σημαντική ροή, ωστόσο σε περιορισμένους χώρους βαθιά στα σπήλαια η ροή του αέρα μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Σε πολλές περιπτώσεις οι μετεωρολογικές μετρήσεις των σπηλαίων είναι καλύτερα να ερμηνεύονται σε συνδυασμό με τις μετεωρολογικές μετρήσεις τις επιφάνειας τις ίδιες περιοχής (Toomey, 2009).

Σε προσπάθεια ανάπτυξης ενός προγράμματος μετεωρολογικής μελέτης είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη το μέγεθος του εύρους των διαφόρων παραμέτρων και το ποσοστό μεταβολής κάθε παραμέτρου που θεωρούνται σημαντικοί στο να επηρεάσουν τις διεργασίες εντός του σπηλαίου ή είναι αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Αυτού του τύπου οι πληροφορίες μπορούν να συλλεχθούν ύστερα από μελέτη και παρατήρηση του σπηλαίου κατά την οποία μια ποικιλία παραμέτρων θα μετρηθούν χρησιμοποιώντας, είτε σημειακές μετρήσεις είτε μικρές διαδρομές με όργανα καταγραφής μετρήσεων. Αυτού του τύπου η παρατήρηση βοηθά στο να αποτιμηθεί κατά πόσο οι παράμετροι αυτοί μεταβάλλονται στο σπήλαιο με την πάροδο του χρόνου. Μπορεί επίσης να παρέχει σημαντικά δεδομένα που επιτρέπουν την επιλογή των καταλληλότερων οργάνων για την πραγματοποίηση των μετρήσεων (Toomey, 2009).

Το μεγάλο σύμπλεγμα σπηλαίων Carlsbad Caverns στο Νέο Μεξικό, παρουσιάζει χαρακτηριστικά τη διαδικασία ανταλλαγής αέρα και ενδείκνυται για παρατήρηση του φαινομένου αυτού. Υπάρχουν τρεις κύριες περιπτώσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην μελέτη της συγκέντρωσης ραδονίου στον αέρα των ορυχείων ή των σπηλαίων. Η πρώτη απαιτεί διαφορά θερμοκρασίας που ευνοεί την κατακόρυφη κυκλοφορία του αέρα μέσω σχετικά μεγάλων ανοιγμάτων, η δεύτερη περιλαμβάνει τη μεταφορά ραδονίου με την κίνηση του αέρα διαμέσου των ρωγμών, ρηγματώσεων/σχισμών ή υπόγειων ανοιγμάτων, όπου υπάρχει διαφορά πίεσης. Αυτό είναι αποτέλεσμα των αλλαγών της βαρομετρικής πίεσης, της βαρομετρικής πίεσης που προκύπτει από την κίνηση του αέρα ή άλλων αιτιών. Ενώ η τρίτη και πιο σημαντική περίπτωση σχετίζεται με την απορροή ραδονίου στα ορυχεία-σπήλαια, όπου οι πηγές του ουρανίου-ραδίου είναι άφθονες. Συγκεντρώσεις ραδονίου σε υψηλά επίπεδα στη γη διέπεται από παράγοντες που εξετάζονται παρακάτω. Η καθαρή ροή των ατόμων ραδονίου από τα τοιχώματα εξισορροπείται από τις απώλειες, λόγω της ραδιενεργής διάσπασης και της διαδικασίας αερισμού στο εσωτερικό μιας κοιλότητας, όταν το σύστημα φτάνει σε ισορροπία.



**Σχήμα 16:** Παράγοντες που επηρεάζουν την ισορροπία συγκέντρωσης ραδονίου σε υπόγεια κοιλότητα (Wilkening, 1990).

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ο πλούσιος σε ραδόνιο αέρας στο εσωτερικό της κοιλότητας, αντικαθίσταται από τον εξωτερικό αέρα, ο οποίος έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ραδόνιο. Για μία κοιλότητα εσωτερικής επιφάνειας  $S$  και όγκου  $V$ , όπως παρουσιάζει το σχήμα 16, ισχύει η εξής σχέση:

$$SE = \lambda VC + Q (C - C_{out}) \quad (8)$$

Όπου  $E$  είναι η καθαρή ροή των ατόμων ανά δευτερόλεπτο για κάθε  $m^2$ ,  $\lambda$  είναι η σταθερά διάσπασης ραδονίου,  $C$  και  $C_{out}$  είναι οι συγκεντρώσεις του  $^{222}Rn$  μέσα και έξω από την κοιλότητα/  $m^3$  και  $Q$  είναι η ροή του αέρα ανά  $m^3/sec$ .

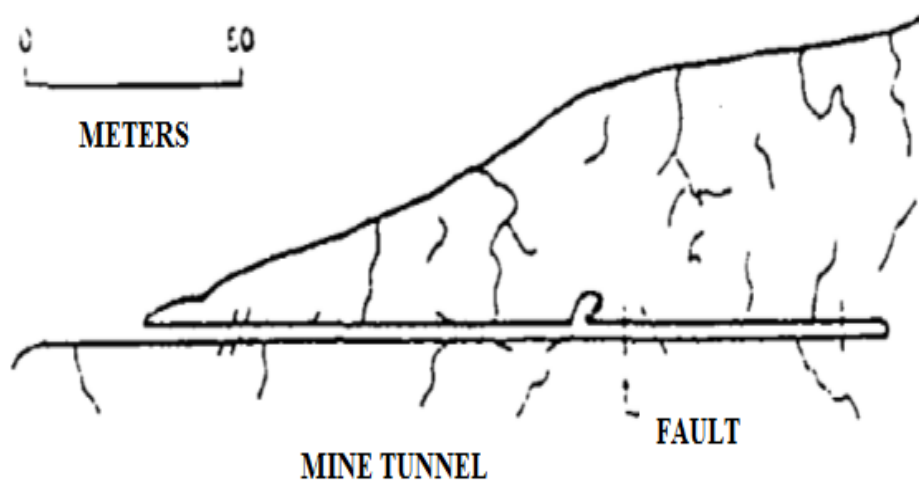
Αν εισέλθει στο σπήλαιο εξωτερικός αέρας πολύ χαμηλής συγκέντρωσης ραδονίου, τότε ο  $C_{out}$  μπορεί να παραληφθεί και η συγκέντρωση ραδονίου να υπολογιστεί ως εξής:

$$C = SE / (\lambda V + Q) \quad (9)$$

Η συγκέντρωση ραδονίου φαίνεται να εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα από το άθροισμα των  $\lambda V$  και το ρυθμό εναλλαγής του αέρα  $Q$  και ανάλογα με την καθαρή ροή  $SE$ . Με λίγα λόγια, η συγκέντρωση ραδονίου μπορεί να υπολογιστεί για ένα σύστημα, εφόσον είναι γνωστές οι φυσικές διαστάσεις της κοιλότητας, η καθαρή ροή των ατόμων ραδονίου και η παροχή του αέρα. Ο φυσικός αερισμός θεωρείται ότι είναι ανάλογος της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα του σπηλαίου. Όπου ο πλούσιος σε ραδόνιο αέρας του εσωτερικού του σπηλαίου αντικαταστάθηκε από πιο ψυχρό και χαμηλότερης συγκέντρωσης ραδονίου εξωτερικό αέρα. Σχεδόν καμία εναλλαγή αέρα δε συμβαίνει κατά το καλοκαίρι, όπου ο εξωτερικός αέρας είναι πιο θερμός από τον αέρα του σπηλαίου. Εναλλαγή αέρα λαμβάνει

χώρα κατά τους χειμερινούς μήνες, όπου ο ψυχρότερος εξωτερικός αέρας αντικαθιστά μερικώς τον αέρα του σπηλαίου, ο οποίος παραμένει θερμοκρασιακά σχεδόν σταθερός, περίπου στους  $14 \pm 1^\circ\text{C}$ , κατά τη διάρκεια του έτους. Η ετήσια μέση διακύμανση της συγκέντρωσης ραδονίου σε υπόγεια σπήλαια βασίζεται σε αυτό το μοντέλο. Παρόλα αυτά υπάρχουν πολλές δυνατότητες για παραλλαγή του τύπου αυτού, της κυκλοφορίας του αέρα στα υπόγεια κενά, που προσεγγίζουν την κίνηση του αέρα γύρω και μέσα στα κτήρια, όπου η κυκλοφορία του αέρα οφείλεται στις αλλαγές της βαρομετρικής πίεσης και της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα (Wilkening, 1990).

Ένα ακόμα παράδειγμα αναφέρεται σε ένα εγκαταλελειμμένο σχεδόν οριζόντιο τούνελ μήκους 172 μέτρων, ύψους περίπου 1 έως 2 μέτρων σε βάθος 30 μέτρων, σε ένα λόφο δυτικά του Socorro στο Νέο Μεξικό, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 17. Η είσοδος του είναι σχεδόν σφραγισμένη εκτός από ένα μικρό σωληνοειδές πέρασμα. Χωρίς να έχουν εντοπιστεί ίχνη ορυκτών ουρανίου. Ο αέρας κινείται μέσα και έξω από το τούνελ αυτό, λόγω της ημερήσιας και προσωρινής διακύμανσης της βαρομετρικής πίεσης και της τυρβώδους ροής του αέρα που κινείται μέσω των ρηγματώσεων των πετρωμάτων και του εδάφους. Το μεγαλύτερο μέρος της κυκλοφορίας του αέρα οφείλεται στις θερμοκρασιακές διαφορές του αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό χώρο του τούνελ, εξαιτίας ύπαρξης γεωθερμικής ανωμαλίας στην περιοχή. Η μέση θερμοκρασία στο τούνελ κατά την διάρκεια των μετρήσεων ήταν σταθερή και περίπου ίση με  $18^\circ\text{C}$ , ενώ η εξωτερική ημερήσια θερμοκρασία για την ίδια περίοδο ήταν  $14^\circ\text{C}$ , ενώ η χαμηλότερη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε ήταν  $5^\circ\text{C}$ . Η μέση ροή αέρα, που παρατηρήθηκε, σε περίοδο 21 ημερών, στο τούνελ, ήταν ισοδύναμη με  $930 \text{ m}^3$  αέρα/ημέρα, ενώ η μέση συγκέντρωση ραδονίου, που μετρήθηκε την περίοδο αυτή στο εσωτερικό του τούνελ, ήταν ίση με  $3.300 \text{ Bq/m}^3$ , με μέγιστη ημερήσια τιμή συγκέντρωσης ίση με  $7.400 \text{ Bq/m}^3$ .



**Σχήμα 17:** Απεικόνιση τούνελ μελέτης κυκλοφορίας αέρα (Wilkening, 1990).

Ένα πέρασμα χαμηλής πίεσης κατά την υπό μελέτη περίοδο ανέβασε τις τιμές έως τα 19.000 Bq/m<sup>3</sup>. Η τελευταία τιμή είναι κοντά στη τιμή συγκέντρωσης του ραδονίου στις ρωγμές και τις σχισμές των πετρωμάτων που περιβάλλουν το τούνελ. Το δίκτυο ροής αέρα στο τούνελ παρουσιάζει ότι ισοδύναμος όγκος αέρα πλούσιος σε ραδόνιο αντικαθίσταται ημερησίως από αέρα που κυκλοφορεί στις ρηγματώσεις των πετρωμάτων και του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι περίπου 220 Bq/m<sup>3</sup> ραδονίου προστίθεται ημερησίως στον εξωτερικό αέρα μέσω διάχυσης (Wilkening, 1990).

Αντίστοιχη έρευνα στην Ισπανία, αναφέρεται σε χώρους εργασίας και συγκεκριμένα σε τουριστικά σπήλαια, που κυρίως λόγω των χαμηλών επιπέδων εξαερισμού, οι συγκεντρώσεις είναι υψηλές. Τονίζεται ότι στις ανεπτυγμένες σπηλιές, όπου ξεναγοί παρέχουν ξεναγήσεις για το ευρύ κοινό χρειάζεται μεγάλη προσοχή για την ανάληψη διορθωτικών ενεργειών σχετικά με το ραδόνιο. Ο τεχνητός αερισμός μπορεί να μεταβάλλει την υγρασία στο εσωτερικό του σπηλαίου επηρεάζοντας κάποια από τα σπηλαιοαποθέματα και γενικά να επιβαρύνει το μικροκλίμα του σπηλαίου. Λόγω των περιβαλλοντικών συνήθων μέσα στα σπήλαια, η εφαρμογή των όποιων προστατευτικών δράσεων απαιτεί πολύ προσεχτικό σχεδιασμό (Sainz et al., 2007).

Παρατήρηση του φαινομένου συγκέντρωσης του ραδονίου και μετρήσεις στην ευρύτερη περιοχή της Φινολιάκας στον νομό Λασιθίου, έδειξαν ότι το καλοκαίρι και το φθινόπωρο είναι οι κατ' εξοχήν εποχές όπου η συγκέντρωση του ραδονίου επηρεάζεται από την μεταφορά αέριων μαζών. Μετρήσεις συγκέντρωσης του ραδονίου αναλύθηκαν μαζί με μετρήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων και όζοντος, καθώς η επιρροή της μεταβολής των μετεωρολογικών παραμέτρων στην συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού ραδονίου. Από την διερεύνηση της μεταφοράς του ραδονίου με βάση την προέλευση των αέριων μαζών, η μελέτη αυτή κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η κίνηση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και η ανάπτυξη του στρώματος ανάμειξης κατά την διάρκεια της ημέρας είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζει την ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου. Η έντονη ανάμειξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος διασκορπίζει την συγκέντρωση του ραδονίου και δεν το αφήνει να συσσωρευτεί, αλλά το ανεβάζει σε υψηλότερα στρώματα (Στρατάκη, 2009).

Σε ακόμη μία προσπάθεια ερμηνείας των φαινομένων αερισμού και κυκλοφορίας του αέρα στο περιβάλλον των σπηλαίων, οι Kowalczyk και Froelich, παρατήρησαν το 2010, το σπήλαιο Hollow Ridge Cave στην Φλόριντα, χρησιμοποιώντας το ραδόνιο για να εκτιμήσουν τον αερισμό του σπηλαίου και την συμπεριφορά του διοξειδίου του άνθρακα, η παρουσία του οποίου επηρεάζει τα σπηλαιοαποθέματα. Για τον σκοπό αυτό, τοποθετήθηκαν στον εσωτερικό

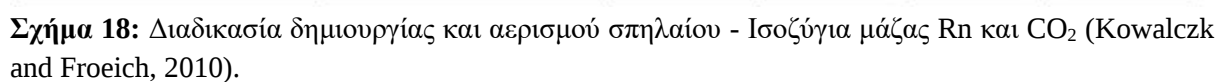
και εξωτερικό χώρο του σπηλαίου αισθητήρες συνεχούς καταγραφής των μετεωρολογικών συνθηκών και των μεταβολών της συγκέντρωσης του  $^{222}\text{Rn}$  και του  $\text{CO}_2$ . Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, δημιούργησαν τα παρακάτω μοντέλα ισοζυγίου μάζας των αερίων, τα οποία μαζί με την διαδικασία απορροής του ραδονίου και τους παράγοντες που ευνοούν το φαινόμενο της σπηλαιογένεσης παρουσιάζονται στη συνέχεια στο σχήμα 18. Οι κύριοι μηχανισμοί αερισμού σύμφωνα με τους ερευνητές για το συγκεκριμένο σπήλαιο αναφέρονται στην κίνηση του αέρα λόγω της διαφοράς πυκνότητας του αέρα του σπηλαίου και της ατμόσφαιρας και 2) τους ημερήσιους βαρομετρικούς ανέμους και 3) την θερμοκρασία (Kowalczyk and Froeich, 2010).

## 2.2 Η επιρροή της θερμοκρασίας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η διαφορά θερμοκρασίας του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα ενός σπηλαίου επηρεάζει τη συγκέντρωση ραδονίου σε αυτό. Για να εξεταστεί η συγκέντρωση του ραδονίου συναρτήσει της θερμοκρασίας του αέρα, συχνά οι ερευνητές χαρακτηρίζουν τις θερμοκρασιακές αλλαγές ως εποχιακές, καθώς κατά την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο, παρατηρούνται οι πιο έντονες μεταβολές. Οι εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης του ραδονίου έχουν επιβεβαιωθεί από πάρα πολλές έρευνες σε όλο τον κόσμο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτά των σπηλαίων της Πολωνίας και τις Ιαπωνίας (Przylibski, 1999; Tanahara et al., 1997), στην Ισπανία (Dumitru et al, 2005; Duenas et al, 2011), στην Ουγγαρία (Szerbin, 1996).

Οι αλλαγές της θερμοκρασίας στο κλειστό σύστημα των σπηλαίων στην διάρκεια μίας ημέρας είναι αμελητέες. Γενικά, θεωρείται ότι οι θερμοκρασιακές διαφορές, είναι μικρότερες των  $2^\circ\text{C}$ . Ειδικότερα, για τα ασβεστολιθικά πετρώματα, οι ημερήσιες θερμοκρασιακές μεταβολές είναι  $1^\circ\text{C}$  σε βάθος περίπου 60 εκατοστά και  $0,1^\circ\text{C}$  σε βάθος 1 μέτρου, ενώ οι ετήσιες μεταβολές φτάνουν  $1^\circ\text{C}$  σε 12 μέτρα στα ηπειρωτικά κλίματα.

Σε βάθη μεγαλύτερα του ορίου των θερμομετρικών αλλοιώσεων, όπως 25 μέτρα, δεν επηρεάζεται η θερμοκρασία των εγκοίλων από τις εξωτερικές μεταβολές της θερμοκρασίας. Σε σπήλαια που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια, και που επηρεάζονται από τις εξωτερικές συνθήκες, έχει παρατηρηθεί ότι η θερμοκρασία τους ανταποκρίνεται στην μέση ετήσια εξωτερική θερμοκρασία, η οποία ως γνωστό εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και από το απόλυτο υψόμετρο. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση κατά  $1^\circ\text{C}$  της θερμοκρασίας για κάθε 180 μέτρα υψομετρικής διαφοράς.



Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας σε °C, ο Choppy το 1980 πρότεινε την παρακάτω μαθηματική εξίσωση όπου L το γεωγραφικό πλάτος και h το απόλυτο υψόμετρο σε μέτρα (Γιαννόπουλος, 2000):

$$T = 54,3 - 0,91 L - 0,006 h \quad (10)$$

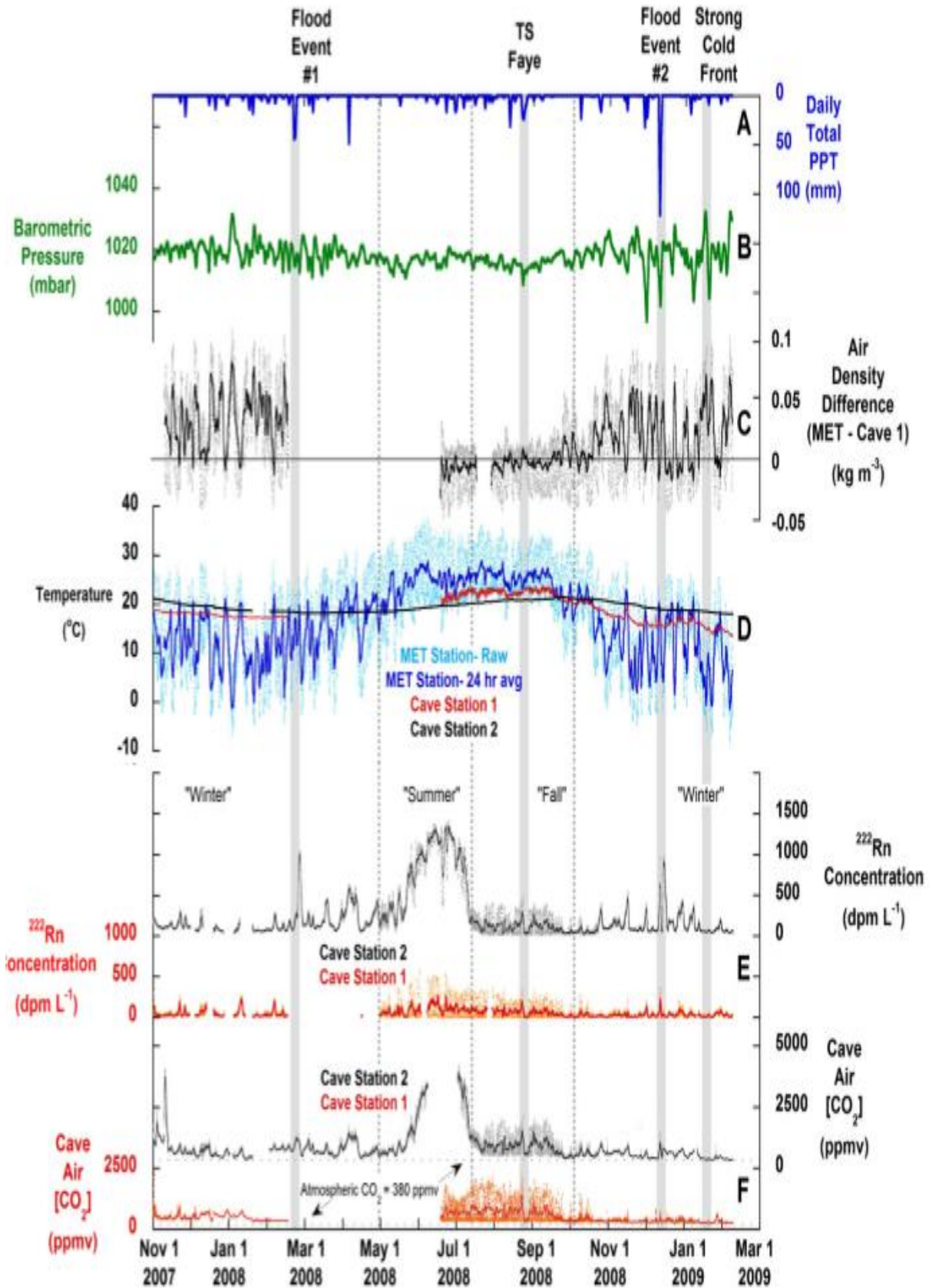
Οι καιρικές συνθήκες οδηγούν στον αερισμό του σπηλαίου με δύο τρόπους, όπως αναφέρουν οι Kowalczk και Froelich για το σπήλαιο Hollow Ridge Cave της Φλόριντας. Αρχικά, η διαφορά πυκνότητας του αέρα μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού του σπηλαίου έχει ως αποτέλεσμα την ανταλλαγή αέρα μεταξύ του σπηλαίου και της ατμόσφαιρα. Επειδή η πυκνότητα του αέρα όμως, ως γνωστόν, επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, ο αέρας διαφορετικής πυκνότητας συμπεριφέρεται ανάλογα με τις θερμοκρασιακές διαφορές. Επιπλέον, οι άνεμοι οδηγούν σε αερισμό. Η ροή του αέρα στην είσοδο του σπηλαίου έχει ημερήσια μεταβλητότητα τόσο κατεύθυνση όσο και μέγεθος, που εξαρτάται από τη χρονική στιγμή και το μέγεθος των διαφορετικών πυκνοτήτων του αέρα και τους ανέμους (Kowalczk and Froelich, 2010).

Σε γενικές γραμμές, η εποχιακή διακύμανση της συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια παρουσιάζει μέγιστη τιμή το καλοκαίρι και ελάχιστη τιμή το χειμώνα (Cigna, 2005). Υπάρχουν πολλές έρευνες που επιβεβαιώνουν το φαινόμενο αυτό, αν και δεν είναι απόλυτο. Στο σπήλαιο Hollow Ridge Cave της Φλόριντας κατά την διάρκεια του χειμώνα ο μέσος όρος συγκέντρωσης ραδονίου ήταν 50 DPM/L ενώ το καλοκαίρι ήταν 1400 DPM/L, όπου 1 DPM/L = 60 Bq/m<sup>3</sup>. Στο σχήμα 19, ακολουθεί γραφική απεικόνιση χρονοσειρών των μετεωρολογικών συνθηκών, θερμοκρασίας και πίεσης, και της σύστασης του αέρα μέσα και έξω από το σπήλαιο Hollow Ridge συναρτήσει της συγκέντρωσης του ραδονίου στο διάστημα 2007-2009 που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις (Kowalczk and Froelich, 2010).

Το σπήλαιο Manita Pec Cave της Κροατίας παρουσίασε τις εξής εποχιακές διακυμάνσεις, όπως αναφέρει ο παρακάτω πίνακας 19, επιβεβαιώνοντας ξανά το αρχικό πόρισμα (Radolic et al., 2011).

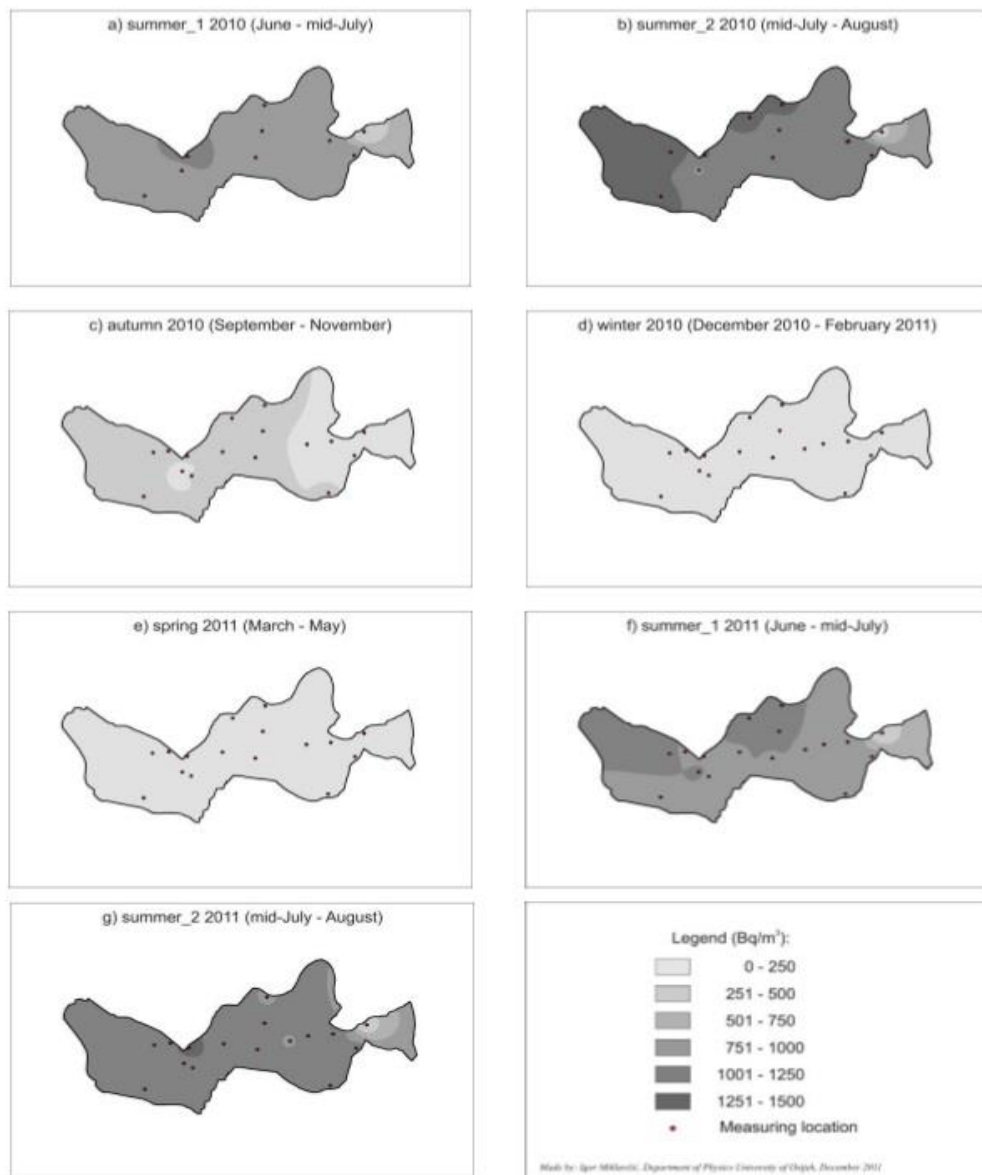
**Πίνακας 19:** Εποχιακή διακύμανση συγκέντρωσης ραδονίου στο Manita Pec Cave, της Κροατίας (Radolic et al., 2011).

|                      | C ± σc (Bq/m <sup>3</sup> ) |             |             |             |             |
|----------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                      | Summer 2010                 | Autumn 2010 | Winter 2010 | Spring 2011 | Summer 2011 |
| <b>Tourist route</b> | 1065 ± 135                  | 252 ± 54    | 31 ± 7      | 132 ± 32    | 1056 ± 150  |



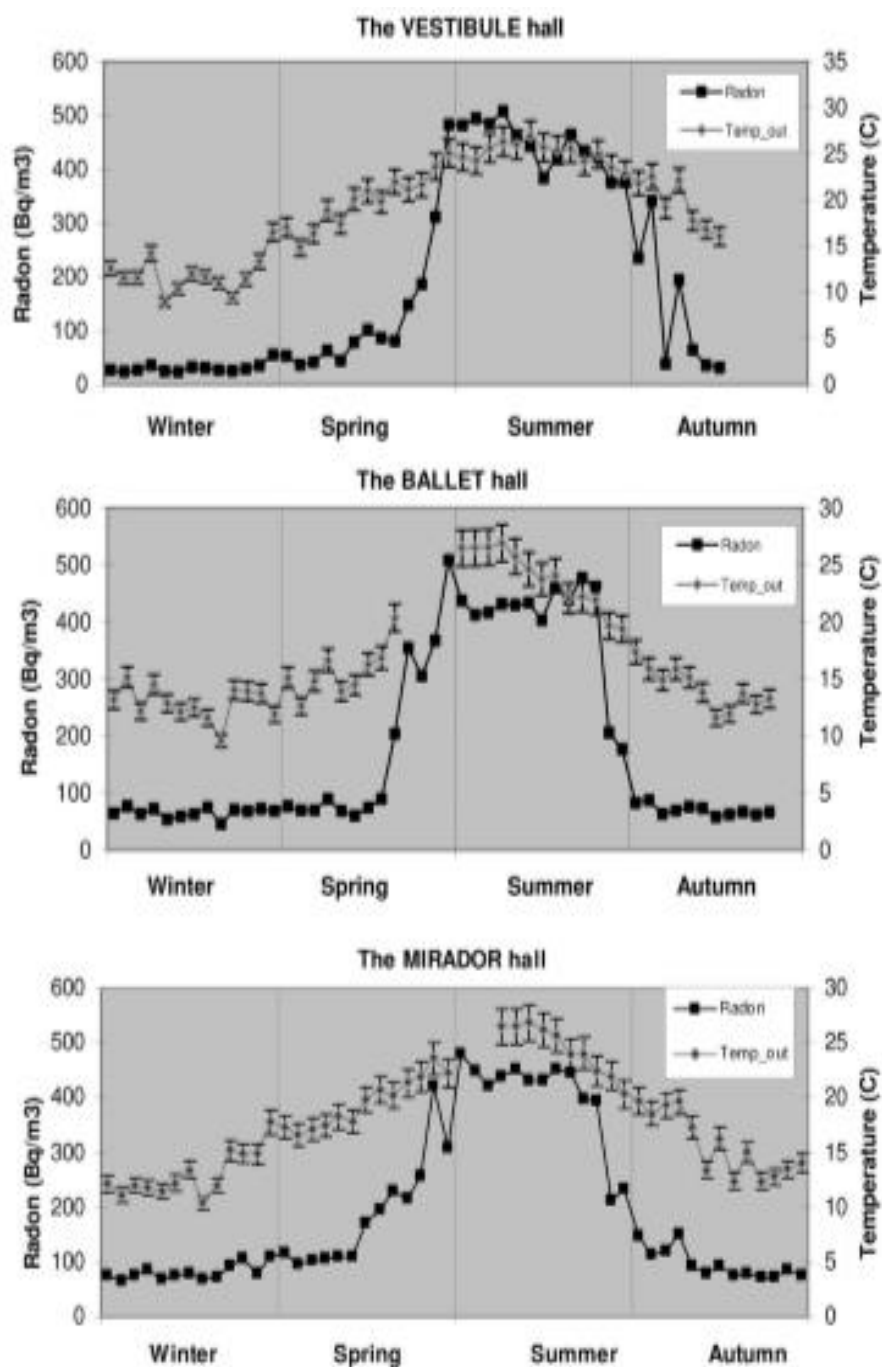
**Σχήμα 19:** Χρονοσειρές μετεωρολογικών συνθηκών και σύστασης αέρα στο σπήλαιο Hollow Ridge της Φλόριντας (Kowalczyk and Froeich, 2010).

Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια παρουσίασης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της συγκέντρωσης ραδονίου στο σπήλαιο συναρτήσει των εποχιακών διακυμάνσεων του φαινομένου όπως μετρήθηκαν το διάστημα 2010-2011, κατασκευάστηκε η παρακάτω χωρική κατανομή που παρουσιάζει το σχήμα 20.



**Σχήμα 20:** Χωρική κατανομή συγκέντρωσης ραδονίου συναρτήσει εποχιακής διακύμανσης στο σπήλαιο Manita Pec Cave, της Κροατίας (Radolic et al., 2011).

Τέλος, χαρακτηριστικό παράδειγμα του φαινομένου εποχιακής διακύμανσης στα σπήλαια αναφέρεται το σπήλαιο Nerja Cave, της Ισπανίας όπου σύμφωνα με τις εβδομαδιαίες μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου και θερμοκρασίας του αέρα εξωτερικά του σπηλαίου σε τρία διαφορετικά τμήματα του σπηλαίου κατασκευάστηκαν τα παρακάτω γραφήματα του σχήματος 21 (Duenas et al., 2011).



**Σχήμα 21:** Γραφήματα κατανομής εβδομαδιαίας  $C_{RN}$  και θερμοκρασίας στο σπήλαιο Nerja Cave, της Ισπανίας (Duenas et al, 2011).

Παρόλο όμως που οι περισσότερες έρευνες υποστηρίζουν υψηλότερη συγκέντρωση ραδονίου τους καλοκαιρινούς μήνες, το φαινόμενο αυτό δεν είναι απόλυτο καθώς αντίστοιχη έρευνα σε σπήλαιο της Βραζιλίας παρατήρησε αντίθετη συμπεριφορά (Albergi et al., 2005).

## 2.3 Ο ρόλος των ρηγμάτων

Είναι γεγονός ότι σπήλαια, συχνά περισσότερα από ένα, δημιουργούνται κατά μήκος σχηματισμών ρηγματωγόνων ζωνών. Έρευνες έχουν δείξει αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου στον εδαφικό αέρα και τα υπόγεια νερά επάνω από ζώνες διαρρήξεων και ρηγμάτων στο μητρικό πέτρωμα καθώς ότι η αυξημένη συγκέντρωση ραδονίου σχετίζεται με αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub>, He, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>. Τα αέρια αυτά, βοηθούν στην μετανάστευση του ραδονίου από περιοχές βαθιάς προέλευσης (Virk and Walia, 2001), ως αποτέλεσμα η ύπαρξη κι η μελέτη της συμπεριφοράς του ραδονίου να φαίνεται χρήσιμη στην χαρτογράφηση ενεργών ρηγμάτων (Ioannides et al., 2003). Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι η συγκέντρωση ραδονίου επηρεάζεται από τη σεισμικότητα (Οικονομόπουλος, 2008).

Γενικά, τα ρήγματα απαντώνται σε όλες τις κλίμακες, μετατοπίζοντας κρυστάλλους, στρώματα, ακολουθίες, ιζηματογενείς λεκάνες, μαγματικούς όγκους και μεγάλα ηπειρωτικά τεμάχια. Αναγνωρίζονται από το γεγονός ότι διακόπτεται η συνέχεια των πετρωμάτων και ότι συχνά έρχονται δίπλα δίπλα διαφορετικής λιθολογίας, δομής ή και ηλικίας πετρώματα. Η ρηξιγενής επιφάνεια έχει διεύθυνση και κλίση και είναι συχνά στιλβωμένη με ένα λεπτό επίχρισμα θρυμματισμένου πετρώματος. Τα ρήγματα συνοδεύονται από μια σειρά γεωλογικών χαρακτηριστικών όπως, σπασμένα και κατακερματισμένα πετρώματα, πυκνές δέσμες διακλάσεων και μικρορηγμάτων, με μικροκαμυλώσεις, εκατέρωθεν της ρηξιγενούς επιφάνειας, υδροθερμική εξαλοιώση κλπ (Doutsos et al, 1990).

Ένας ακόμη χαρακτηρισμός σχετικά με τα ρήγματα, σχετίζεται με την ενεργότητα τους. Γενικά ως ενεργά ρήγματα καλούνται εκείνα στα οποία η διαδικασία της διάρρηξης δεν έχει τελειώσει οριστικά. Αυτό σημαίνει ότι η παραμόρφωση του ευρύτερου χώρου συνεχίζεται, αφού η περιοχή βρίσκεται υπό την επίδραση τεκτονικών τάσεων και επομένως δεν πρέπει να αποκλείεται επαναδραστηριοποίηση τους στο άμεσο ή απώτερο μέλλον. Δεν έχει ακόμα καθοριστεί διεθνώς ποια ρήγματα πρέπει να χαρακτηρίζονται σαν ενεργά και ποια σαν ανενεργά. Για ορισμένα ρήγματα είναι εύκολο να αποφανθεί κανείς ότι οπωσδήποτε είναι ανενεργά, για άλλα όμως κάτι τέτοιο είναι δύσκολο. Βέβαια για χώρες που παρουσιάζονται τεκτονικά ανενεργές το πρόβλημα δεν είναι σημαντικό, για χώρες όμως, όπως η Ελλάδα και γενικά για χώρες που βρίσκονται στα περιθώρια των λιθοσφαιρικών πλακών, είναι πολύ σημαντική η γνώση των ρηγμάτων και γενικότερα ρηξιγενών ζωνών που είναι ενεργά. Τα ενεργά ρήγματα επομένως, είναι παλαιά ρήγματα στα οποία έχει παρατηρηθεί επαναδραστηριοποίηση της διάρρηξης κατά μήκος μιας προ υπάρχουσας ρηξιγενούς

επιφάνειας. Κατά την αναζωπύρωση αυτή της τεκτονικής δραστηριότητας, δεν έχουμε μόνο μετακίνηση των τεμαχών κατά μήκος ενός παλαιού ρήγματος αλλά είναι πιθανόν να δημιουργηθούν και νέα ρήγματα. Συνήθως τα νέα ρήγματα δεν είναι κύρια ρήγματα. Η επαναδραστηριοποίηση των ρηγμάτων είναι κοινή τεκτονική δραστηριότητα σε ενεργά τεκτονικές περιοχές, όπως είναι η Ελλάδα. Σχεδόν κάθε σεισμός μεγέθους πάνω από 5 βαθμούς της κλίμακας Richter συνοδεύεται και από κάποια επιφανειακή διάρρηξη που τις περισσότερες φορές πρόκειται για επαναδραστηριοποίηση παλαιάς ρηξιγενούς επιφάνειας. Στις αρχές του 20ου αιώνα ορισμένοι γεωλόγοι πρότειναν τον όρο «ενεργό ρήγμα» για «Ρήγματα που σχηματίστηκαν σε κάποια φάση κατά την γεωλογική εξέλιξη μιας περιοχής και έχουν διαρρήξει σχετικά πρόσφατα ιζήματα και έχουν προκαλέσει σεισμούς και επομένως είναι δυνατόν να κινηθούν και στο μέλλον, αλλά ο χρόνος δεν μπορεί να καθοριστεί σαφώς». Το 1965, ο C.R. Allen, πρότεινε σαν κατώτερο χρονικό όριο της κίνησης του ρήγματος τα  $10 \times 10^4$  έτη.

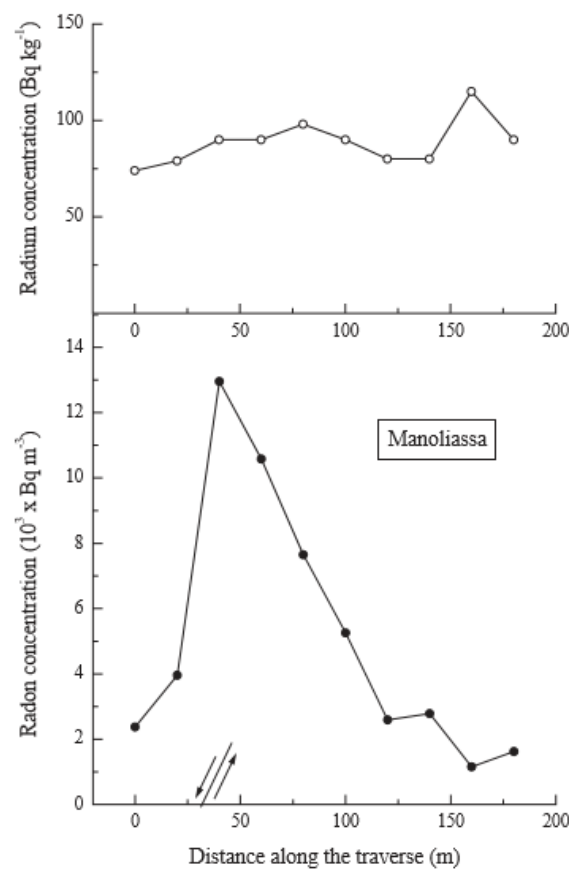
Ειδικότερα τα κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τον προσδιορισμό των ενεργών ρηγμάτων για τεχνικογεωλογικούς σκοπούς είναι τα εξής:

- Προσδιορισμός της ηλικίας της πλέον πρόσφατης δραστηριότητας
- Σεισμική εκδήλωση και η ένταση της
- Η ταχύτητα μετατόπισης (Μαριολάκος και Καροτσιέρη, 2001).

Τα ενεργά ρήγματα ευνοούν την διαφυγή αερίων, λόγω του ότι αυξάνουν την διαπερατότητα των εδαφών και διευκολύνουν την μετανάστευση των αερίων. Σχετική έρευνα αναφέρει ότι η έκλυση ραδονίου σε ενεργά ρήγματα είναι διπλάσια από εκείνη που προέρχεται από την κατακερματισμένη ζώνη. Επιπλέον, ο τύπος του ρήγματος επηρεάζει σημαντικά το ρυθμό έκλυσης ραδονίου. Τα κανονικά ρήγματα έχουν την τάση να αυξάνουν το ενεργό πορώδες, ανοίγοντας νέες ή διευρύνοντας παλαιότερες ρωγμές, ενώ τα ανάστροφα ρήγματα μειώνουν το ενεργό πορώδες, με αποτέλεσμα να ευνοούν την υψηλή ροή ρευστών όπως εκείνη του ραδονίου, συγκριτικά με τα κανονικά ρήγματα (King et al., 1993).

Το 2003, μια ομάδα ερευνητών μελέτησε τη συμπεριφορά του ραδονίου σε πέντε ενεργές ρηγματωγόνες ζώνες στη βόρεια και βορειοδυτική Ελλάδα. Συγκεκριμένα, στη περιοχή της Αλμωπίας, με το ομώνυμο ρήγμα, και τη λεκάνη της Μυγδονίας (ρήγματα Στίβος, Γερακάρου και Νικομίδινο) στη Μακεδονία και στην περιοχή του Σουλίου, με το ρήγμα Μανολιάσσα, στην Ήπειρο). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, χρησιμοποιώντας ανιχνευτές CR-39 (η αρχή λειτουργία τους θα αναλυθεί στην συνέχεια), παρουσιάζοντας αυξημένες τιμές ραδονίου στην περιοχή των ρηγμάτων. Η κατανομή του ραδονίου κατά μήκος των γραμμών που διέρχονται από τις

ρηξιγενείς ζώνες, αποκάλυψε ανωμαλίες, που συνδέονται με την τοπική τεκτονική δομή. Οι θέσεις που μελετήθηκαν στην συγκεκριμένη έρευνα επιλέχθηκαν σύμφωνα με την ύπαρξη ενεργών, κανονικών ρηγμάτων μη άμεσα συνδεόμενα με οποιαδήποτε σεισμική επιφάνεια και την ύπαρξη σεισμικών επιφανειών που έχουν χαρτογραφηθεί και δημιουργηθεί από παρελθοντικά σεισμικά γεγονότα. Ενδεικτικά, στο σχήμα 22, παρουσιάζονται διαγράμματα συγκέντρωσης ραδονίου και ραδίου συναρτήσει της απόστασης κατά μήκος του ρήγματος Μανολιάσσα. Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τη μελέτη αυτή δείχνει ότι το φαινόμενο συσσώρευσης ραδονίου συμβαίνει στις περιοχές ενεργών ρηγμάτων, συμπέρασμα που συμφωνεί με αντίστοιχες έρευνες (Fleischer, 1997; Tamini and Abumurad, 2001).



**Σχήμα 22:** Διάγραμμα συγκέντρωσης ραδονίου και ραδίου συναρτήσει της απόστασης κατά μήκος ρήγματος (Ioannides et al., 2003).

## 2.4 Έρευνες σε σπήλαια

Κάθε σπήλαιο είναι ένα περίπλοκο και μοναδικό περιβάλλον. Κάθε έρευνα σχετική με την συγκέντρωση ραδονίου στα σπήλαια, προσπαθεί να ερμηνεύσει το φαινόμενο έκλυσης και συγκέντρωσης ραδονίου, συναρτήσει των παραγόντων που το επηρεάζουν, οι οποίοι όπως αναφέρθηκε είναι πολλοί και δεν επιδρούν ανεξάρτητα, αντίθετα αλληλοεπιδρούν. Δύσκολα θα μπορούσε να βρεθεί ένα ενιαίο εννοιολογικό μοντέλο που να εξηγεί σε γενικό επίπεδο, την συγκέντρωση του ραδονίου σε όλα τα σπήλαια, καθώς μπορεί να έχουν εξεταστεί οι παράγοντες που την επηρεάζουν, αλλά σε κάθε περίπτωση ο βαθμός που αλληλοεπιδρούν είναι διαφορετικός. Στην συνέχεια, παρατίθενται αποτελέσματα ερευνών σε παγκόσμιο επίπεδο, που εξετάζουν μονοδιάστατα ή πολυδιάστατα το φαινόμενο αυτό σε σπήλαια.

Για παράδειγμα, στο πιο σημαντικό σπήλαιο της Ιταλίας «Grande Grotta del Vento», πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων της συγκέντρωσης ραδονίου σε τμήμα τουριστικής διαδρομής. Οι χαμηλότερες τιμές βρέθηκαν σε χώρους κοντά σε τμήματα που οι επισκέπτες αποτελούν πηγή μικροσωματιδίων, όπως σκόνη και χνούδι, τα οποία αποτελούν μορφές ρύπανσης του περιβάλλοντος του σπηλαίου (Cigna, 2005).

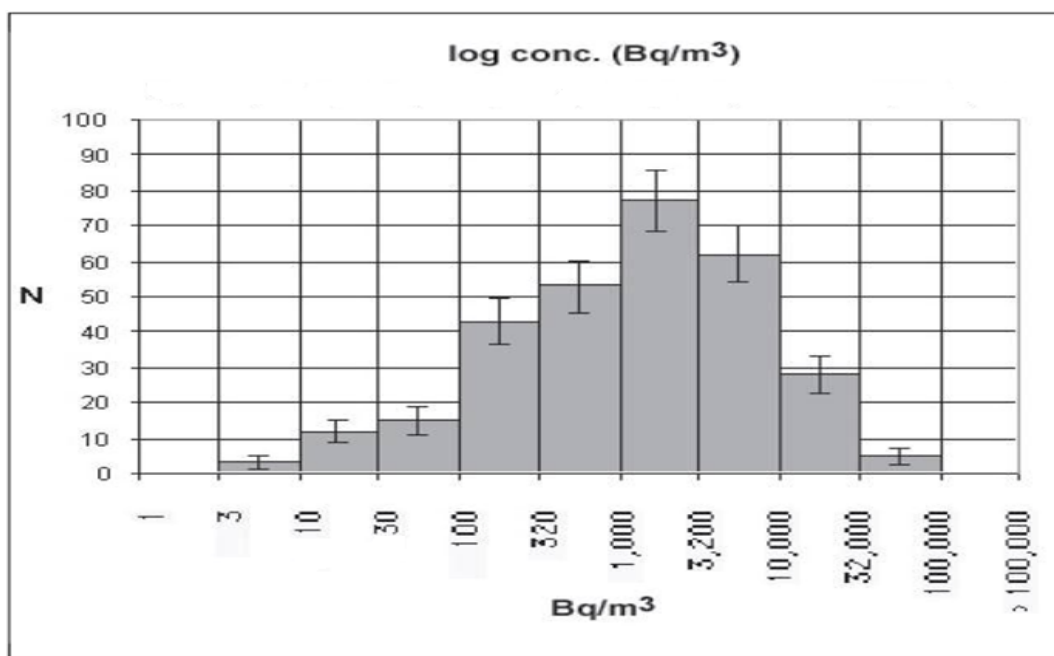
Τα αποτελέσματα της έρευνας στο σπήλαιο Cango της Νότιας Αφρικής, έδειξαν ότι τα σπήλαια μπορούν να διαιρεθούν σε κατηγορίες ανάλογα με τη ραδιενεργότητα των πετρωμάτων και του εδάφους. Μια προτεινόμενη κατάταξη των διαφόρων περιοχών ενός σπηλαίου λοιπόν είναι η εξής: αμελητέα, φυσιολογική, υψηλή και πολύ υψηλή.

- **Αμελητέα** μπορεί να χαρακτηριστεί μια περιοχή ενός σπηλαίου αν αποτελείται από έδαφος ή πετρώματα με περιεχόμενη συγκέντρωση ραδίου μικρότερη από 35 Bq/kg. Ειδικότερα όταν αποτελείται από πετρώματα όπως διορίτης, ψαμμίτης, αργιλικός σχιστόλιθος και πετρώματα που προέρχονται από αυτά ή ασβεστόλιθο όταν δεν υπάρχει υποκείμενος ραδιενεργός σχηματισμός.
- **Φυσιολογική** μπορεί να θεωρηθεί μια περιοχή όταν περιέχει σε μεγάλο βαθμό, έδαφος ή πετρώματα, με περιεκτικότητα ραδίου από 35 έως 100 Bq/Kg ή σχηματισμούς sand and silt με περιεκτικότητα των πόρων σε ραδόνιο από 10 έως 50 kBq/m<sup>3</sup> καθώς ρωγμές και κατακερματισμένες περιοχές στο πέτρωμα που καλύπτονται από στρώμα εδάφους πάχους τουλάχιστον 2 m.
- **Υψηλή** θεωρείται μία περιοχή όταν περιέχει σε μεγάλο βαθμό έδαφος και πετρώματα με περιεκτικότητα ραδονίου μεταξύ 100 έως 500 Bq/kg, εδάφη με περιεκτικότητα ραδίου στους πόρους από 50 – 250 kBq/m<sup>3</sup> και υψηλή διαπερατότητα ή γενικές

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

- **Πολύ υψηλή** θεωρείται μία περιοχή όταν περιέχει σε μεγάλο βαθμό εδάφη και πετρώματα με πολύ υψηλή περιεκτικότητα ραδίου  $>500 \text{ Bq/kg}$ , εδάφη με περιεκτικότητα ραδονίου στους πόρους μεγαλύτερη από  $>250 \text{ kBq/m}^3$  και πολύ υψηλή διαπερατότητα ή ρωγμές και κατακερματισμένες ζώνες σε πετρώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε ουράνιο (Nemangwele, 2005).

Στο παρακάτω ιστόγραμμα του σχήματος 23, παρουσιάζεται η κατανομή του μέσου όρου τιμών συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια, από τον Hakl και τους συναδέλφους του, το 1995, οι οποίοι συνέλεξαν στοιχεία από 220 διαφορετικά σπήλαια που το καθένα επηρεάζει με διαφορετικές παραμέτρους την διαφυγή ραδονίου. Η λογαριθμική κανονική κατανομή είναι μια συνεχής κατανομή στην οποία η λογάριθμος μιας μεταβλητής έχει μια κανονική κατανομή. Τα αποτελέσματα μιας κανονικής λογαριθμικής κατανομής συνδέονται φυσιολογικά με τα αποτελέσματα της κατανομής, αν η μεταβλητή είναι προϊόν μεγάλου αριθμού ανεξάρτητων πανομοιότυπων κατανεμημένων μεταβλητών. Απαντάται συχνά σύνδεση κανονικών κατανομών και γεωλογικών χαρακτηριστικών, όπως ρήγματα.



**Σχήμα 23:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της κατανομής της συγκέντρωσης του ραδονίου σε σχέση με την λογαριθμική κατανομή περιεκτικότητας ραδονίου σε 220 σπήλαια παγκόσμιας κλίμακας (Cigna, 2005).

Δεδομένου ότι αυτή είναι η περίπτωση της συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια, έχει υπολογισθεί η λογαριθμοκανονική κατανομή των στοιχείων βάση του Hakl, σύμφωνα με την

οποία, η μέση τιμή είναι περίπου  $1.200 \text{ Bq/m}^3$ , αλλά το παρόν σχήμα της Gaussian κατανομής δεν είναι συμμετρικό, γεγονός που υποδηλώνει ότι υπάρχει διαφορετικός μηχανισμός διάχυσης ραδονίου στα σπήλαια. Προφανώς μια πιο σωστή έρευνα σχετικά με την κατανομή της συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη πολλαπλές μετρήσεις από επιμέρους σπηλαιώματα και να χρησιμοποιεί μια μέση τιμή σε αυτές τις περιπτώσεις. Ιδιαίτερα στις χαμηλές τιμές, είναι προφανής η επίδραση των γεωχημικών χαρακτηριστικών του πετρώματος, κυρίως του ασβεστόλιθου, στο οποίο είναι δύσκολη να υπάρχει χαμηλή συγκέντρωση  $^{226}\text{Ra}$  (Cigna, 2005).

Στην συνέχεια ο πίνακας 20 παρουσιάζει αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης ραδονίου σε όλον τον κόσμο καθώς και την εποχιακή διακύμανση των τιμών αυτών (Papachristodoulou et al., 2004) καθώς έχει ενημερωθεί από αποτελέσματα πιο πρόσφατων ερευνών και σε επιπλέον χώρες. Παρατηρώντας λοιπόν τα αποτελέσματα αυτά, συμπεραίνουμε πως το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας αυξάνεται και όλο και περισσότερες μελέτες ασχολούνται με την συγκέντρωση του ραδονίου σε σπήλαια, καθώς μερικά εξ αυτών αναφέρουν τιμές που πλησιάζουν τα  $88.000 \text{ Bq/m}^3$ .

**Πίνακας 20:** Καταγραφή αποτελεσμάτων συγκέντρωσης ραδονίου από διεθνής έρευνες σε σπήλαια ((X): Χειμώνας (A): Άνοιξη (K): Καλοκαίρι (E): Ετήσια) (Ανανεωμένος από: Papachristodoulou et al., 2004).

| Χώρα      | Αριθμός σπηλαίων        | Ελάχιστη τιμή ( $\text{Bq/m}^3$ ) | Μέγιστη τιμή ( $\text{Bq/m}^3$ ) | Μέση Ετήσια ( $\text{Bq/m}^3$ ) | Πηγή                           |
|-----------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Αυστραλία | 57                      | 500 (X)                           | 795 (A)<br>6.330 (E)             |                                 | Solomon et al., 1996           |
| Ελλάδα    | Σπήλαιο Πετραλώνων      | 785                               | 88.000                           | 25.340                          | Papastefanou et al., 1986      |
|           | Σπήλαιο Περάματος       | 197                               | 1.929                            | 1.311(X)<br>925 (K)             | Papachristodoulou et al., 2004 |
|           |                         | $368 \pm 8$                       | $2012 \pm 14$                    |                                 | Πατήρης, 2009                  |
|           | LO 21 (Lion)            |                                   |                                  | $637 \pm 25$                    | SELAS Caving Club, 2013        |
|           | Σπήλαιο Κρυονερίδας     |                                   |                                  | 2207                            | Τσουκαλά, 2013                 |
|           | Σπήλαιο Περιστερέ       |                                   |                                  | 275                             | Τσουκαλά, 2013                 |
|           | Σπήλαιο του Καβρού      |                                   |                                  | 110                             | Τσουκαλά, 2013                 |
|           | Σπήλαιο των Κουρουπήδων |                                   |                                  | 1374                            | Τσουκαλά, 2013                 |

|                   |                         |         |                            |                                 |
|-------------------|-------------------------|---------|----------------------------|---------------------------------|
|                   | Σπήλαιο<br>Καραβότοπος  |         | 1687                       | Τσουκαλά, 2013                  |
|                   | Σπήλαιο<br>Αγίου Ιωάννη |         | 74                         | Τσουκαλά, 2013                  |
| <b>Κροατία</b>    | Manita Pec<br>Cave      | 31 ± 7  | 1065 ± 135                 | Radolic et al., 2011            |
| <b>Ουγγαρία</b>   | 4                       | 600     | 3000                       | Hakl et al., 1990               |
|                   | 17                      |         | 70 –<br>14.000             | Hunyadi et al., 1991            |
| <b>Ιρλανδία</b>   | 3                       | 488     | 11.285                     | Duffy et al., 2001              |
| <b>Πολωνία</b>    | 2                       | 100 (X) | 3.600 (K)                  | Przylibski, 1999                |
| <b>Σλοβενία</b>   | 12                      | 20 (E)  | 5.920 (E)                  | Kobal et al., 1987              |
|                   | Postojna cave           |         | 500 (X)<br>6000 (K)        | Vaupotic et al., 2001           |
| <b>Κόσοβο</b>     | Gadime Cave             |         | 400 -<br>1.000             | Bahtijari et al., 2007          |
| <b>Ισπανία</b>    | Nerja Cave              |         | 168 (K)<br>48 (X)          | Duenas et al, 1999              |
|                   | Altamira Cave           | 186     | 7120                       | Lario et al., 2005              |
| <b>Η.Π.Α</b>      | Mystery Cave            |         | 20.000 (X)<br>25.000 (K)   | Lively and Krafthefer,<br>1995  |
|                   | Carlsbad<br>caverns     |         | 1258                       | Wilkening and Watkins,<br>1976  |
|                   | Mammoth<br>Cave         |         | 3600 (Φ)<br>2600 (K)       | Eheman et al., 1991             |
|                   | Lechuguilla<br>cave     | 185     | 3515                       | Cunningham and la rock,<br>1991 |
| <b>Βενεζουέλα</b> |                         | 100     | 80.000                     | Sajo – Bohus et al., 1997       |
| <b>Ν. Αφρική</b>  | Cango Cave              | 800     | 2.600                      | Nemangwele, 2005                |
| <b>Μεξικό</b>     | 3                       |         | 1,28<br>KBq/m <sup>3</sup> | Borau et al., 1993              |
| <b>Σ. Αραβία</b>  | 5                       | 74-114  | 74-451                     | Al-Mustafaa et al., 2005        |
| <b>Αγγλία</b>     | 47                      | 9       | 46.080                     | Hyland and Gunn, 1994           |
|                   | 3                       | 32      | 12.552                     | Sperrin et al., 2000            |

Επιπρόσθετα, όσον αφορά την δόση ακτινοβολίας που δέχεται ο άνθρωπος κατά την παραμονή του στον εσωτερικό χώρο των σπηλαίων έχουν γίνει πολλές έρευνες με σκοπό την ασφαλή παραμονή τους σε αυτά. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα ερευνών αναφέρονται στα σπήλαια της Ουγγαρίας όπου παρουσίασαν τιμή απορροφούμενης δόσης ίση με 19,7 mSv για διάρκεια παραμονής 470 ώρες/χρόνο (Kavasi et al., 2010), στην Gadime Cave στο Κόσοβο υπολόγισαν ότι η δόση που δέχεται κάποιος με χρόνο παραμονής 90 λεπτά ήταν 3,7 mSv για την καλοκαιρινή περίοδο και 2,5 mSv για την χειμερινή (Bahtijari et al., 2007). Σε αντίστοιχη έρευνα στο τουριστικό σπήλαιο Castanar της Ισπανίας οι ξεναγοί δέχονται 6,41 mSv σε

τέσσερις μήνες (Alvarez-Gallego et al., 2015) ενώ στην Αυστραλία η μέγιστη δόση που υπολογίστηκε σε μία σειρά σπηλαίων ήταν 5,9 mSv (Solomon et al., 1996). Στην Αγγλία τα Creswell Crags με ετήσια επισκεψιμότητα που αγγίζει τους 40.000 επισκέπτες οδηγούν σε δόση 0,0016 mSv ανά επίσκεψη για τους επισκέπτες με μικρό χρόνο παραμονής, ενώ για τους εργαζόμενους ξεναγούς η ενεργή δόση ανάγεται σε 0,06 mSv (Gillmore et al., 2002).

Για την Ελλάδα, ο Πατήρης, μελέτησε, εκτός από την συγκέντρωση ραδονίου στο σπήλαιο του Περάματος, Ιωαννίνων, την δόση ακτινοβολίας που δέχεται ένας επισκέπτης και ένας εργαζόμενος στο σπήλαιο αυτό. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ως μέση τιμή για το διάστημα Ιανουαρίου – Φεβρουαρίου τιμή ίση με  $778 \pm 256 \text{ Bq/m}^3$  ενώ για το διάστημα Μαρτίου – Ιουνίου του ίδιου έτους, η συγκέντρωση εκτιμήθηκε ίση με  $886 \pm 387 \text{ Bq/m}^3$ . Οι τιμές αυτές, όπως αναφέρεται, συγκρινόμενες με διεθνή δεδομένα κρίνονται όχι ιδιαίτερα υψηλές και παρουσιάζουν μικρή διακύμανση (Πατήρης, 2009).

Πιο συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της ενεργής δόσης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (3). Ορίζοντας τον παράγοντα μετατροπής της ενεργής δόσης (DCF) ίσο με  $1.4 \text{ mSv/mJ h-m}^3$ , τον παράγοντα μετατροπής των μονάδων (u) ίσο με  $5.6 \times 10^{-6} \text{ mJ m}^{-3}/\text{Bq m}^{-3}$  (I.C.R.P., 1994) και τον παράγοντα ισοδυναμίας ίσο με 0.5, μια τιμή που έχει συχνά χρησιμοποιηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για σπήλαια με μικρό ρυθμό εξαερισμού. Καθώς κάνοντας την παραδοχή ότι οι επισκέπτες του σπηλαίου παραμένουν 1 ώρα κατά την ξενάγησή τους, ενώ για τους μόνιμα απασχολούμενους εργαζόμενους του σπηλαίου ο χρόνος παραμονής είναι σημαντικά μεγαλύτερος. Για τον λόγο αυτό, λήφθηκε υπόψη ότι ο κάθε εργαζόμενος πραγματοποιεί κατά μέσο όρο τρεις φορές το γύρο του σπηλαίου ημερησίως, εργαζόμενος 6 ημέρες την εβδομάδα, συνολικό χρονικό διάστημα που ισούται με 972 ώρες παραμονής στο σπήλαιο ετησίως. Τα παραπάνω είχαν ως αποτέλεσμα ο μιν επισκέπτης να λαμβάνει κατά μέσο όρο από  $3,05 \pm 1.00 \text{ μSv/year}$  έως  $3,47 \pm 1.52 \text{ μSv/year}$  ανά διαδρομή και ο μόνιμα απασχολούμενος εργαζόμενος από  $2.96 \pm 0.98 \text{ mSv/year}$  έως  $3.38 \pm 1.48 \text{ mSv/year}$ . Οι τιμές αυτές δεν ξεπερνούν το άνω όριο που θέτει η διεθνής επιτροπή ακτινοπροστασίας (I.C.R.P., 1994) και η οποία προτείνει ότι το επίπεδο ετήσιας δόσης πάνω από το οποίο θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα 3-10 mSv/year. Στην περίπτωση των επισκεπτών, συνήθως, το ποσό είναι πολύ μικρό για να αποτελέσει κίνδυνο για την υγεία τους. Από την άλλη όσο αφορά τους μόνιμα εργαζόμενους, θα πρέπει να συνυπολογισθεί το ποσό ενεργού δόσης που λαμβάνουν από την φυσική ραδιενέργεια σε χώρους εκτός σπηλαίου (2,4 mSv). Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η δόση που δέχονται στο χώρο εργασίας τους αγγίζει το 60% του συνόλου που δέχονται από όλες τις φυσικές πηγές κατά τη διάρκεια ενός έτους (I.C.R.P., 1994; Πατήρης, 2009).

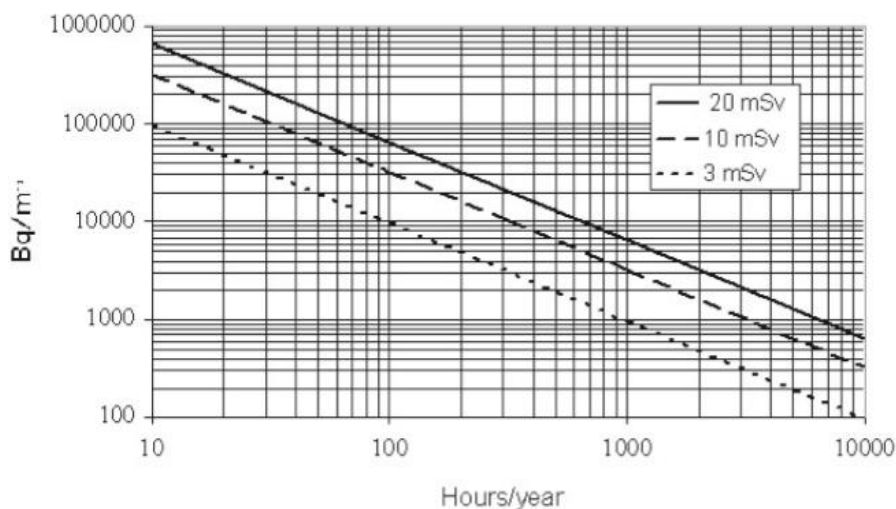
Αντίστοιχη έρευνα με επικεντρωμένο το ενδιαφέρον της στην προστασία των ατόμων

που αφιερώνουν μεγάλο ή μικρό χρονικό διάστημα παραμονής στα περιβάλλοντα των σπηλαίων, εκτίμησε την ετήσια ενεργή δόση που δέχεται ένας σπηλαιολόγος που επισκέπτεται το σπήλαιο για ψυχαγωγικούς ή επαγγελματικούς λόγους καθώς και την ενεργή δόση που δέχεται ένας εργαζόμενος στο χώρο των σπηλαίων είτε είναι πλήρους είτε μερικής απασχόλησης και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 22 ανά κράτος. Τα στοιχεία του πίνακα αυτού υπολογίστηκαν με την χρήση του μοντέλου Lungdose  $F_{90}$  (Nikezic and Yu, 1998) και σύμφωνα με τις εξής παραδοχές για τους χρόνους παραμονής της κάθε κατηγορίας επισκέπτη, όπως παρουσιάζει ο πίνακας 21 (Field, 2007). Τέλος, σύμφωνα με την μελέτη του Cigna, η παρακάτω σχέση έχει σκοπό τον υπολογισμό του χρόνου παραμονής  $T$  σε Hours/year ενός επισκέπτη σε ένα σπήλαιο:

$$T = \frac{10^6 \cdot D}{7.784 \cdot F \cdot C} \quad (11)$$

Όπου:  $D$  (ετήσιο όριο ενεργής δόσης) σε mSv,  $F$  (παράγοντας ισοδυναμίας) και  $C$  (μέση τιμή συγκέντρωσης ραδονίου) σε Bq/m<sup>3</sup>.

Ενώ το γράφημα του σχήματος 24, παρουσιάζει την επιτρεπόμενη διάρκεια παραμονής σε ώρες ανά έτος για έναν επισκέπτη, σύμφωνα με τρία διαφορετικά ετήσια επιτρεπόμενα όρια ακτινοβολίας που ορίζουν διαφορετικοί οργανισμοί για αντίστοιχη συγκέντρωση ραδονίου, όπως μελετήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία, με παράγοντα ισοδυναμίας  $F=0,4$ , καθώς και όπως αναφέρθηκε είναι δύσκολο έως απίθανο να αλλάξουν οι συνθήκες που επικρατούν σε ένα σπήλαιο, χωρίς να προκληθούν καταστροφές στο φυσικό περιβάλλον του, ενώ εύκολα μπορεί να περιοριστεί η διάρκεια παραμονής ενός επισκέπτη με σκοπό την προστασία του.



**Σχήμα 24:** Γράφημα συσχέτισης χρόνου παραμονής (ώρες/έτος) για αντίστοιχη συγκέντρωση ραδονίου σύμφωνα με ετήσια όρια επιτρεπόμενης ενεργής δόσης με  $F=0,4$  (Cigna, 2005).

**Πίνακας 21:** Παραδοχές χρόνου παραμονής αντίστοιχα με την κατηγορία επισκέπτη (Field, 2007).

| Κατηγορία επισκέπτη           |                    | Χρόνος παραμονής<br>(Hours/Year) |
|-------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| Ερασιτέχνες<br>σπηλαιολόγοι   | Recreational Caver | 50                               |
| Επαγγελματίες<br>σπηλαιολόγοι | Professional Caver | 600                              |
| Εργαζόμενοι                   | Worker             |                                  |
| Μερικής απασχόλησης           | Part time          | 1760                             |
| Πλήρους απασχόλησης           | Full time          | 2000                             |

**Πίνακας 22:** Εκτιμώμενη δόση ακτινοβολίας σε αντίστοιχο χρόνο παραμονής ανά κράτος (Field, 2007).

|                           | Recreational<br>Caver |         | Professional<br>Caver |         | Part-Time Cave<br>Worker |         | Full-Time Cave<br>Worker |         |
|---------------------------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|
| Country                   | (mSv/y)               | (WLM/y) | (mSv/y)               | (WLM/y) | (mSv/y)                  | (WLM/y) | (mSv/y)                  | (WLM/y) |
| <b>Australia</b>          | 0.14                  | 0.03    | 1.73                  | 0.35    | 5.07                     | 1.01    | 5.77                     | 1.15    |
| <b>China</b>              | 0.03                  | 0.01    | 0.40                  | 0.08    | 1.17                     | 0.23    | 1.33                     | 0.27    |
| <b>Czech<br/>Republic</b> | 0.29                  | 0.06    | 3.50                  | 0.70    | 10.27                    | 2.05    | 11.67                    | 2.33    |
| <b>Great<br/>Britain</b>  | 0.69                  | 0.14    | 8.24                  | 1.65    | 24.18                    | 4.84    | 27.48                    | 5.50    |
| <b>Greece</b>             | 5.95                  | 1.19    | 71.40                 | 14.28   | 209.44                   | 41.89   | 238.00                   | 47.60   |
| <b>Hungary</b>            | 0.78                  | 0.16    | 9.36                  | 1.87    | 27.45                    | 5.49    | 31.19                    | 6.24    |
| <b>Ireland</b>            | 0.98                  | 0.20    | 11.70                 | 2.34    | 34.33                    | 6.87    | 39.01                    | 7.80    |
| <b>Japan</b>              | <0.01                 | <0.01   | 0.03                  | 0.01    | 0.09                     | 0.02    | 0.10                     | 0.02    |
| <b>Malaysia</b>           | 0.14                  | 0.03    | 1.69                  | 0.34    | 4.96                     | 0.99    | 5.63                     | 1.13    |
| <b>Poland</b>             | 0.28                  | 0.06    | 3.31                  | 0.66    | 9.70                     | 1.94    | 11.02                    | 2.20    |
| <b>Russia</b>             | 0.56                  | 0.11    | 6.78                  | 1.36    | 19.88                    | 3.98    | 22.59                    | 4.52    |
| <b>Slovenia</b>           | 0.33                  | 0.07    | 4.00                  | 0.80    | 11.75                    | 2.35    | 13.35                    | 2.67    |
| <b>Spain</b>              | 0.03                  | 0.01    | 0.31                  | 0.06    | 0.90                     | 0.18    | 1.02                     | 0.20    |
| <b>South<br/>Africa</b>   | 0.06                  | 0.01    | 0.76                  | 0.15    | 2.22                     | 0.44    | 2.52                     | 0.50    |
| <b>Switzerland</b>        | 5.91                  | 1.18    | 70.89                 | 14.18   | 207.95                   | 41.59   | 236.31                   | 47.26   |
| <b>United<br/>States</b>  | 0.46                  | 0.09    | 5.46                  | 1.09    | 16.03                    | 3.21    | 18.21                    | 3.64    |

## Κεφάλαιο 3

### Μετρητικές διατάξεις ανίχνευσης ραδονίου

Η μεγάλη συχνότητα με την οποία απαντά το ραδόνιο στο περιβάλλον, σε συνδυασμό με τις σημαντικές επιπτώσεις του στην ανθρώπινη υγεία, οδήγησαν στην ανάπτυξη πολλών μεθόδων για την ανίχνευση του ραδονίου, η πλειονότητα των οποίων στηρίζεται στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας  $\alpha$  και  $\gamma$  με τον εκάστοτε ανιχνευτή. Συγκεκριμένα, βασίζονται στην ανίχνευση  $\alpha$ -σωματιδίων που εκπέμπονται από τα ραδιονουκλίδια αυτά κατά τη ραδιενεργό διάσπασή τους. Οι μετρήσεις ραδονίου πραγματοποιούνται με διάφορα ανιχνευτικά συστήματα, που βασίζονται σε παθητικές ή ενεργητικές μεθόδους ανίχνευσης. Κατάλληλοι συντελεστές βαθμονόμησης, χρησιμοποιούνται ώστε το σύνολο των  $\alpha$  ή  $\gamma$  εκπομπών που καταγράφονται, να μετατρέπεται σε συγκέντρωση ραδονίου. Τεχνική που να μετρά τη συγκέντρωση ραδονίου, αποκλειστικά από τις διασπάσεις του ίδιου του ραδονίου, δεν έχει αναφερθεί. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου ονομάζονται ανιχνευτές ή μετρητές ραδονίου.

Ανεξάρτητα με τη μέθοδο που χρησιμοποιεί το κάθε όργανο, η φιλοσοφία λειτουργίας του εντάσσεται σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες:

➤ **Τεχνικές συλλογής δείγματος.**

Αέρας συλλέγεται και αναλύεται σε εργαστήριο.

➤ **Τεχνικές συνεχούς μέτρησης.**

Σε τακτά χρονικά διαστήματα πραγματοποιείται δειγματοληψία σε αέρα και έτσι παρέχονται πληροφορίες για την διακύμανση των τιμών του ραδονίου στο δείγμα για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

➤ **Τεχνικές ολοκληρωμένων μετρήσεων.**

Οι τεχνικές αυτές, για μεγάλες περιόδους της τάξης ημερών έως μηνών, καταγράφουν τη μέση συγκέντρωση ραδονίου.

➤ **Τεχνικές προσδιορισμού μέσω θυγατρικών.**

Μετά την αποκατάσταση ραδιενεργούς ισορροπίας, η ενεργότητα των θυγατρικών ισούται με αυτή του ραδονίου σε προγενέστερες περιόδους.

### 3.1 Ενεργητικοί ανιχνευτές

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει ανιχνευτές που καταγράφουν τη συγκέντρωση ραδονίου σε πραγματικό χρόνο. Στις ενεργητικές τεχνικές (*active techniques*) είναι αναγκαία η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και συνήθως η χρήση αντλιών αέρα. Σε κάθε περίπτωση πάντως, αποτελούνται από ένα κατάλληλο θάλαμο εντός του οποίου εισέρχεται αέρας και συνεπώς ραδόνιο. Ανάλογα με τον τύπο θαλάμου και τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο, υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση του ραδονίου κατά τη διάρκεια της μέτρησης, η οποία μπορεί να αναγνωσθεί σε κατάλληλη οθόνη επί της συσκευής. Οι ανιχνευτές της κατηγορίας αυτής συνεπάγονται υψηλό κόστος οργάνων και προσωπικού καθώς και περιορισμό στην μετακίνηση, καθώς συνήθως καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο και βάρος. Οι κυριότεροι τύποι θαλάμων που χρησιμοποιούνται σε ενεργητικούς ανιχνευτές είναι α) σπινθηρισμών, β) ιοντισμού και γ) ημιαγώγιμων τοιχωμάτων.

#### α) Θάλαμοι σπινθηρισμού

*Στην περίπτωση των θαλάμων σπινθηρισμού, ο θάλαμος φέρει τμηματική ή ολική επίστρωση από κάποιο ειδικό σπινθηριστή, ευαίσθητο σε α-σωματίδια ή γ-ακτινοβολία. Αναλόγως της ανίχνευσης, προσμετράτε, με τη βοήθεια κατάλληλων ηλεκτρονικών μέσων, πλήθος γεγονότων που αντιστοιχούν σε διασπάσεις αλυσίδας ραδονίου και από εκεί υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση ραδονίου κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Το ραδόνιο στην περίπτωση αυτή εισέρχεται με δειγματοληψία αερίου μάζας, η οποία και κατακρατείται εντός του θαλάμου, μέχρι το πέρας της μέτρησης. Πρόκειται δηλαδή για μέθοδο στιγμιαίας δειγματοληψίας. Στο τέλος ο θάλαμος καθαρίζεται με διοχέτευση ρεύματος αζώτου στο εσωτερικό του (Νικολόπουλος, 2000).*

#### β) Θάλαμοι ιοντισμού

*Σε αυτήν την περίπτωση, εντός του θαλάμου υπάρχει κατάλληλα φορτισμένο ηλεκτρόδιο, εντός του οποίου συλλέγονται ιόντα, τα οποία δημιουργούνται από τους ιοντισμούς που προκαλούνται από τις ραδιενεργές διασπάσεις της αλυσίδας του ραδονίου, το οποίο υπάρχει στο θάλαμο. Η είσοδος του ραδονίου γίνεται με ελεύθερη διάχυση διαμέσω κατάλληλου πορώδους φίλτρου. Από τον τρόπο εισόδου του ραδονίου εντός του θαλάμου, διαφαίνεται ότι η τεχνική μέτρησης είναι συνεχούς επιτήρησης. Από τη μεταβολή του δυναμικού του ηλεκτροδίου, με χρήση*

κατάλληλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση ραδονίου εντός του χρονικού διαστήματος μέτρησης (Νικολόπουλος, 2000).

### **γ) Θάλαμοι ημιαγώγιμων τοιχωμάτων**

Σε αυτήν την περίπτωση, ο θάλαμος φέρει στα τοιχώματά του ημιαγώγιμα υλικά τα οποία καταμετρούν α-διασπάσεις, ώστε να υπολογιστεί η μέση συγκέντρωση ραδονίου. Η είσοδος του ραδονίου γίνεται και εδώ με ελεύθερη διάχυση διαμέσω κατάλληλου πορώδους φίλτρου ή με δειγματοληψία αερίων μαζών. Η τεχνική μέτρησης μπορεί να είναι συνεχούς επιτήρησης ή στιγμιαίας δειγματοληψίας (Bocicchio et al., 1995).

*Όπως φάνηκε από την παραπάνω ανάλυση, οι ενεργητικοί ανιχνευτές χρησιμοποιούνται είτε για στιγμιαίες δειγματοληψίες, είτε για συνεχή παρακολούθηση της συγκέντρωσης του ραδονίου. Ειδικά για την τελευταία περίπτωση, παρουσιάζονται κατά την τελευταία πενταετία, πολύ εξελιγμένα όργανα μετρήσεων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα γρήγορης απόκρισης - μεταξύ 5 και 10 λεπτών- εξαιρετικού εύρους αποκρίσεων - από λίγα έως εκατομμύρια Bq/m<sup>3</sup> και μεγάλου αποθηκευτικού χώρου δεδομένων. Ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να γίνεται διαρκής παρακολούθηση της συγκέντρωσης του ραδονίου, από λίγες ώρες έως και δύο ή τρεις μήνες. Επιπρόσθετα, είναι πολύ φιλικά προς το χρήστη και συνοδεύονται από κατάλληλο λογισμικό εύκολης επεξεργασίας δεδομένων σε προσωπικό υπολογιστή. Στα πιο εξελιγμένα όργανα, είναι δυνατή η διοχέτευση και δειγμάτων αέρα εντός των θαλάμων με τη βοήθεια αντλιών, οπότε είναι δυνατός ο υπολογισμός και της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου με α φασματοσκοπικές μεθόδους. Έτσι, καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση και των μεταβολών της συγκέντρωσης των θυγατρικών στον αέρα. Τονίζεται τέλος, ότι τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί όργανα που έχουν τη δυνατότητα να διακρίνουν στοιχεία ακόμη και μεταξύ των ελεύθερων θυγατρικών και εκείνων που βρίσκονται προσκολλημένα σε σωματίδια αεροζόλ (Νικολόπουλος, 2000).*

### 3.2 Παθητικοί ανιχνευτές

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ανιχνευτές που παρέχουν ολοκληρωμένες τιμές ραδονίου σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα (ανιχνευτές SSNTD και E-PERM). Παθητικές είναι οι τεχνικές στις οποίες δεν απαιτείται η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για την εκτέλεση της μέτρησης. Οι παθητικές τεχνικές (*passive techniques*) είναι συνήθως απλές, με ανταγωνιστικό κόστος και εύκολη χρήση. Είναι κατάλληλες για ερευνητική δουλειά και για μακροχρόνιες μετρήσεις και ενδείκνυνται για εύκολη μεταφορά και δυσπρόσιτα πεδία έρευνας όπως τα σπήλαια. Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης ραδονίου με παθητικούς ανιχνευτές εκφράζεται σε  $\text{Bq/m}^3$  και εκφράζει την μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου που είναι και η πλέον αντιπροσωπευτική για τον εσωτερικό αέρα του χώρου. Οι κυριότεροι παθητικοί ανιχνευτές είναι οι : α) ανιχνευτές καταγραφής ιχνών, β) ανιχνευτές ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα και γ) ανιχνευτές ηλεκτρίσιμων υλικών.

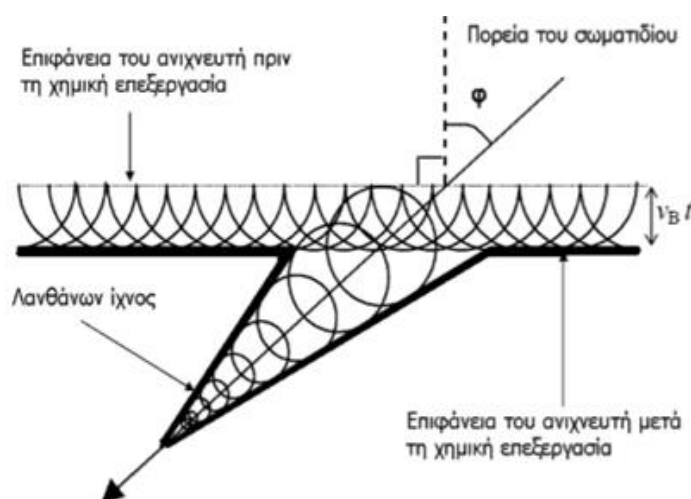
#### α) Ανιχνευτές καταγραφής ιχνών

Σήμερα είναι διαθέσιμος ένας μεγάλος αριθμός από πολυμερή υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να διατηρούν μόνιμη την πρωταρχική καταστροφή που τους προκαλεί το χτύπημα ενός πυρηνικού σωματιδίου, η οποία με κατάλληλη διαδικασία χημικής επεξεργασίας μπορεί να γίνει ορατή σαν ίχνος. Τα υλικά αυτά καλούνται **Ανιχνευτές Πυρηνικών Ιχνών** (Solid State Nuclear Track Detectors). Οι πιο συνηθισμένοι τύποι τέτοιων ανιχνευτών είναι τα πολυμερή LR-115, CR-39, το Makrofoil και προσφάτως το SR-86. Η διαδρομή ενός σωματιδίου μέσα από ένα SSNTD προκαλεί μία στενή καταστροφή κατά μήκος της τροχιάς του, η οποία δεν είναι αρχικά ορατή. Η παραγωγή ενός οπτικά παρατηρήσιμου ίχνους, γίνεται με τη βοήθεια ειδικού χημικού διαβρωτικού, το οποίο διαβρώνει επιλεκτικά το υλικό ανίχνευσης, με αποτέλεσμα τη διεύρυνσή της, διαδικασία γνωστή ως χημική διάβρωση (Najzer and Sutej, 1990; Sohrabi and Zainali, 1995; Πατήρης, 2009). Σχηματική αναπαράσταση της επιφάνειας ανιχνευτή πυρηνικών ιχνών μετά από χημική επεξεργασία για χρονικό διάστημα  $t$  παρουσιάζεται στα σχήματα 25 και 26.

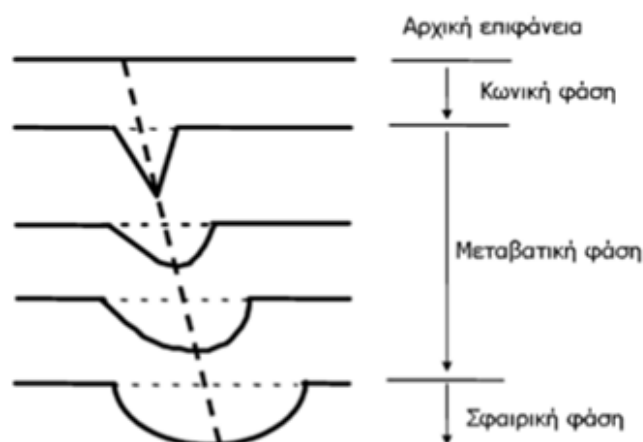
Αν επιπρόσθετα κατά τη διαδικασία της χημικής διάβρωσης εφαρμοστεί και κατάλληλο εναλλασσόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, τότε τα ίχνη αποκτούν μια διαφορετική, πιο χαρακτηριστική, μορφή. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως ηλεκτροχημική διάβρωση. Τα ίχνη που δημιουργούνται με αυτόν τον τρόπο είναι πολύ χαρακτηριστικά και εμφανίζονται σαν συγκεκριμένου τύπου οπές είτε σε οπτικό μικροσκόπιο είτε με τη βοήθεια ειδικών

συστημάτων αυτόματης ανάλυσης εικόνας (Bocicchio et al., 1995; Πατήρης, 2009).

Η χρήση αυτής της κατηγορίας ανιχνευτών έχει τον περιορισμό ότι πρέπει να καταγραφεί μεγάλη ποσότητα ιχνών, γεγονός που προκαλεί χρονική καθυστέρηση ακόμη και για μεγάλες συγκεντρώσεις ραδονίου. Έτσι, η χρήση τους γίνεται για ολοκληρωτικές μετρήσεις μεγάλου χρονικού διαστήματος, 1-12 μήνες, και όχι για παρατήρηση διακυμάνσεων της τιμής συγκέντρωσης ραδονίου (*monitoring*) (Nikezic and Yu, 1998; Danis et al., 2001; Βογιάννης, 2005). Ο ανιχνευτής τοποθετείται μέσα σε ένα μικρό θάλαμο λίγων  $\text{cm}^3$ , όπου και κλείνεται σχεδόν αεροστεγώς. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια διάταξη η οποία είναι γνωστή ως **ανιχνευτής ραδονίου καταγραφής ιχνών** (radon track etch detector). Ανάλογα με την κατασκευή του θαλάμου, το ραδόνιο διαχέεται μέσα σε αυτόν είτε μέσα από μικρές οπές, είτε και από το ίδιο το υλικό κατασκευής του (Πατήρης, 2009).



**Σχήμα 25:** Σχηματική αναπαράσταση της επιφάνειας ανιχνευτή πυρηνικών ιχνών μετά από χημική επεξεργασία για χρονικό διάστημα  $t$  (από Πατήρη, 2009).



**Σχήμα 26:** Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων που διέρχεται το σχήμα του ίχνους κατά τη διαδικασία της χημικής επεξεργασίας του ανιχνευτή (από Πατήρη, 2009).

*Η διάταξη συνήθως εμποδίζει την είσοδο θυγατρικών από το περιβάλλον. Τα α-σωματίδια που παράγονται από τις διασπάσεις της αλυσίδας του ραδονίου που διαχέονται προς το θάλαμο, καταγράφονται στο SSNTD καθ'όλη τη διάρκεια της τοποθέτησής τους. Με την καταμέτρηση των καταγεγραμμένων ιχνών στο SSNTD είναι δυνατός ο υπολογισμός της μέσης συγκέντρωσης του ραδονίου στο χώρο τοποθέτησης του μετρητή (Πατήρης, 2009).*

Εκτός από της χρήση SSNTD's για τη μέτρηση ραδονίου, έχουν αναφερθεί και χρήσεις για μέτρηση θυγατρικών ραδονίου. Συνήθως οι ανιχνευτές εκτίθενται γυμνοί, ή εντός πολύ ειδικών κατασκευών που επιτρέπουν επιλεκτική μέτρηση α-σωματιδίων. Η τεχνική είναι ολοκληρωτική και μάλιστα η μόνη τέτοιου τύπου τεχνική η οποία υφίσταται σήμερα για μέτρηση θυγατρικών ραδονίου (Handler and Paulo, 1994) και γενικά κρίνεται ανεπαρκής από μόνη της και πρέπει να συνοδεύεται από πλήθος ταυτοχρόνως μετρούμενων παραγόντων για να δώσει κάποια αποτελέσματα (C.E.C., 1994).

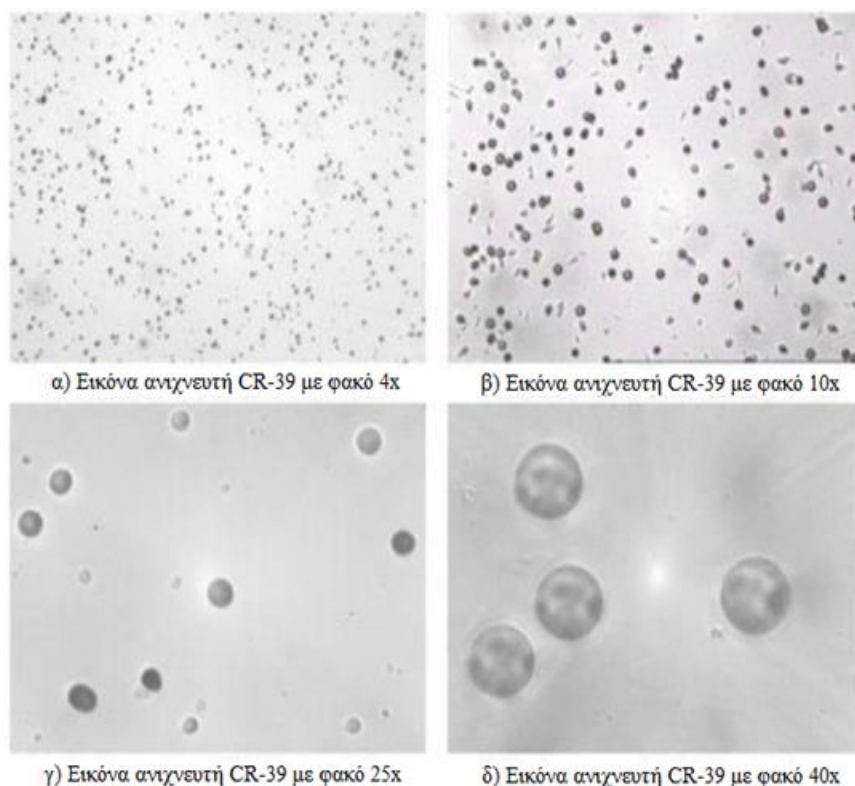
Σε γενικές γραμμές μπορεί να υποστηριχτεί ότι τα ίχνη διαστάσεων ραδονίου σε ανιχνευτές CR- 39, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι : α) κυκλικά, β) σχετικώς ελλειψοειδή, γ) αιχμηρούς μορφής και δ) σχήματος πεπλατυσμένου κώνου. Αναλόγως με το επίπεδο εστίασης και με το χρόνο διάβρωσης, είναι δυνατό σε ορισμένα ίχνη να είναι ευδιάκριτη μία λευκή, σχετικά κυκλική, εσωτερική περιοχή. Τυπική εικόνα των ιχνών διασπάσεων ραδονίου σε σχηματική αναπαράσταση δίνονται στην εικόνα 2. Εκτός όμως από τα ίχνη διασπάσεων ραδονίου, υπάρχει μια πλειάδα από ίχνη τα οποία οφείλονται σε καταστροφές του υλικού ή την αλληλεπίδραση με άλλη ακτινοβολία, οι οποίες καλούνται θόρυβος.

Μερικά από τα ίχνη αυτά μοιάζουν με αχνά και μικρά ίχνη διασπάσεων ραδονίου, ενώ κάποια άλλα με σκούρα και μεγάλα. Εμφανίζονται δε και πολύ μεγάλα ίχνη, τα οποία είναι γνωστά υπό την ονομασία κρατήρες (craters) και τα οποία για μεγάλους χρόνους διάβρωσης μπορεί, μοιάζοντας με μεγάλα ίχνη ραδονίου και να καταμετρηθούν (Νικολόπουλος, 2000).

## **β) Ανιχνευτές ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα**

Η προσρόφηση του ραδονίου από ενεργοποιημένο ξυλάνθρακα χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια ως τεχνική μέτρησης ραδονίου (Cohen and Nason, 1986). Για τη μέτρηση ραδονίου στον αέρα, κατάλληλη ποσότητα ενεργοποιημένου άνθρακα κλείνεται σε επίπεδο μεταλλικό δοχείο όγκου περίπου 400 cm<sup>3</sup>. 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 του (Bochichio et al., 1995). Μετά το τέλος της έκθεσης το κάνιστρο μετράτε σε κάποιον ειδικό ανιχνευτή που συνήθως είναι ένας ανιχνευτής NaI (TI) ή ένας ανιχνευτής Ge και γίνεται



**Εικόνα 2:** Εικόνες από ίχνη διασπάσεων ραδονίου σε διαφορετικές αναλύσεις (από Νικολόπουλο, 2000).

καταγραφή της γ-ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τις διασπάσεις της αλυσίδας του ραδονίου.

Η τεχνική είναι ολοκληρωτική, χαμηλού κόστους και ικανοποιητικής ακρίβειας και επιπρόσθετα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο να δίνει αποτελέσματα γρήγορα. 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. Οι ανιχνευτές πρέπει να στέλνονται σε κατάλληλο εργαστήριο για τη μέτρηση τους και μάλιστα όσο το δυνατό συντομότερα, έτσι ώστε ο ρυθμός εκπομπής ακτινοβολίας από τις διασπάσεις της αλυσίδας του ραδονίου να είναι μετρήσιμος. Μετά την καταμέτρηση ο ανιχνευτής θερμαίνεται για την απελευθέρωση της υγρασίας και έτσι μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί. Η μέθοδος αυτή δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση θυγατρικών ραδονίου (Νικολόπουλος και συν., 1997).

### γ) Ανιχνευτές ηλεκτρίσιμων υλικών

Ένα ηλεκτρίσιμο υλικό (electret) είναι ένα υλικό το οποίο όταν φορτιστεί μπορεί να κρατήσει

το φορτίο του και το συνδεδεμένο με αυτό ηλεκτρικό δυναμικό, για μια μεγάλη περίοδο ενός χρόνου ή παραπάνω. Τέτοια υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σαν ηλεκτροστατικοί συλλέκτες φορτισμένων θυγατρικών παραγώγων ραδονίου από τον αέρα, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να μετρηθούν σε έναν ανιχνευτή σπινθηρισμών ή κάποιον άλλο κατάλληλο μετρητή. Το ηλεκτρίσιμο υλικό φορτίζεται σε κάποιο μεγάλο δυναμικό και τοποθετείται εντός κατάλληλα κατασκευασμένου δοχείου. Το δοχείο έχει τη δυνατότητα να κλείνει και να ανοίγει με τη βοήθεια περιστροφικού πώματος, έτσι ώστε όταν το πώμα είναι κλειστό, ο ανιχνευτής να μην απορροφά ραδόνιο, ενώ όταν αυτό είναι ανοικτό, να απορροφά. Το διασπώμενο ραδόνιο που απορροφάτε, ιοντίζει τον αέρα, παράγοντας ιόντα τα οποία κτυπούν το ηλεκτρίσιμο υλικό και μεταβάλλουν το δυναμικό του. Από τη μεταβολή του δυναμικού στο χρόνο μέτρησης, είναι δυνατός ο υπολογισμός της συγκέντρωσης ραδονίου. Το κόστος του είναι χαμηλό και η ακρίβειά ικανοποιητική αλλά μικρότερη από αυτή των άλλων παθητικών ανιχνευτών. Η τεχνική είναι ολοκληρωτική με χρονική διάρκεια μερικές μέρες και δεν χρησιμοποιείται για τη μέτρηση θυγατρικών ραδονίου (Νικολόπουλος και συν., 1997).

Η επιλογή λοιπόν μιας εκ των παραπάνω κατηγοριών ανιχνευτών και κατ' επέκταση ενός συγκεκριμένου οργάνου έγκειται στο κόστος, τον επιθυμητό χρόνο των μετρήσεων, το είδος των πληροφοριών και την ακρίβεια, καθώς και την αυτονομία του. Σύνοψη των παραπάνω μεθόδων ανίχνευσης και των χαρακτηριστικών τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 23:** Σύνοψη κυριότερων χαρακτηριστικών ανιχνευτών ραδονίου (Νικολόπουλος, 2000).

| Ανιχνευτής                 | Στιγμιαία | Ολοκληρωτική | Συνεχής | Ενεργός | Παθητική |
|----------------------------|-----------|--------------|---------|---------|----------|
| Καταγραφής Ιχνών           | -         | Ναι          | -       | -       | Ναι      |
| Ενεργοποιημένου Ξυλάνθρακα | -         | Ναι          | -       | -       | Ναι      |
| Ηλεκτρίσιμου Υλικού        | -         | Ναι          | -       | -       | Ναι      |
| Θαλάμου Σπινθηρισμών       | Ναι       | -            | Ναι     | Ναι     | -        |
| Θαλάμου Ιοντισμού          | Ναι       | -            | Ναι     | Ναι     | -        |
| Θαλάμου Ημιαγωγού          | Ναι       | -            | Ναι     | Ναι     | -        |

### 3.2.1 Αρχή Λειτουργίας Ανιχνευτή CR-39

Για τις μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου στα σπήλαια της Δυτικής Κρήτης έγινε χρήση παθητικών ανιχνευτών τύπου CR-39. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου ανιχνευτή έγινε με κριτήρια το χαμηλό κόστος, την ευκολία χρήσης, μεταφοράς και τοποθέτησης, καθώς ορισμένα από τα σπήλαια βρίσκονται σε δυσπρόσιτα σημεία, το μικρό όγκο και βάρος, την μέτρηση ολοκληρωτικής τιμής της συγκέντρωσης ραδονίου, την αυτονομία και την ανεξαρτησία τους από ηλεκτρικό ρεύμα. Η χρήση μετρητή CR-39 είναι διαδεδομένη σε αντίστοιχες μελέτες συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια σε πολλές χώρες όπως την Ισπανία (Sainz et al., 2007), το Μεξικό (Espinosa et al., 2008; Borau et al., 1993), την Σαουδική Αραβία (Al-Mustafaa et al., 2005), την Ουγγαρία (Szerbin, 1996) κ.α.

Το πολυμερές CR-39 χρησιμοποιήθηκε ως ανιχνευτής για πρώτη φορά το 1978 (Cartwright et al., 1978). Το αρκτικόλεξο CR-39 είναι συντόμευση του *Columbia Resin 39 trademark* που είναι η εμπορική ονομασία του πολυμερούς πλαστικού ανθρακικής αλλυλ-διγλυκόλης (*allyl diglycol carbonate*) (Stejny, 1987).

Οι συγκεκριμένοι ανιχνευτές CR-39 αποτελούνται από ένα μικρό κομμάτι πλαστικού-φίλμ, διαστάσεων 13 × 37 mm και πάχους 1 mm, προμηθευόμενο από τη TASL-UK. Ο ανιχνευτής δρα σε θάλαμος διάχυσης ραδονίου αποκλείοντας την είσοδο στα θυγατρικά του ραδονίου, την σκόνη και την υγρασία επιτρέποντας αποκλειστικά την είσοδο στο ραδόνιο. Τα φίλμ αυτά τοποθετούνται σε μικρό δοχείο, όπως αυτό της εικόνας 3. Η οπή του τελευταίου καλύπτεται από φίλτρο που αποτρέπει την είσοδο θυγατρικών και σκόνης. Κατά τη διάρκεια τοποθέτησης του μετρητή στο πεδίο, σωματίδια 2α, προερχόμενα από τη διάσπαση του ραδονίου και των θυγατρικών του, προσπίπτουν στο φίλμ και αφήνουν ίχνη. Μετά την πάροδο του χρόνου έκθεσης (διάρκειας 1-12 μήνες) ο ανιχνευτής αφαιρείται και υποβάλλεται σε χημική διαδικασία επιλεκτικής διάβρωσης (*chemical etching*) με διάλυμα σταθερής θερμοκρασίας. Με κατάλληλη βαθμονόμηση η πυκνότητα ιχνών του ανιχνευτή (ίχνη/cm<sup>2</sup>) μετατρέπεται σε συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m<sup>3</sup>) του εσωτερικού αέρα των σπηλαίων στα οποία ήταν τοποθετημένοι και εκφράζει τη μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου που είναι και η πλέον αντιπροσωπευτική.

Συγκεκριμένα, η μέθοδος μέτρησης ραδονίου βασίστηκε στη μέθοδο που περιγράφεται στο NRPB – R283 «*NRPB Etched-Track Detectors for Area Monitoring of Radon*» (Hardcastle et al. 1996) προσαρμοσμένη στα σύγχρονα επιστημονικά δεδομένα και είναι εναρμονισμένη με το ISO 11665-4:2012.

Για την αποφυγή σφαλμάτων, το πρώτο βήμα, αυτό της εγκατάστασης του ανιχνευτή,

θα πρέπει να πραγματοποιείται όπως ορίζεται στο πρότυπο ISO 11665-1. Στην ειδική περίπτωση των εσωτερικών μετρήσεων (*indoor*), αλλά και γενικά, ο ανιχνευτής πρέπει να τοποθετηθεί σε μια σαφή επιφάνεια μεταξύ 1-2 m πάνω από το έδαφος, υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις: α) Σε ελεύθερο χώρο τουλάχιστον 20 cm γύρω από τον ανιχνευτή για να αποφευχθεί η επίδραση του θορονίου από τα τοιχώματα β) Ο ανιχνευτής θα πρέπει να είναι μακριά από πηγές θερμότητας (καλοριφέρ, καμινάδα, ηλεκτρικές συσκευές, τηλεόραση, άμεσο ηλιακό φως, κλπ) στην περίπτωση των κτηρίων και από περιοχές κυκλοφορίας αέρα, όπως πόρτες και παράθυρα και φυσικές πηγές εξαερισμού. Στην περίπτωση των σπηλαίων δηλαδή, μακριά από την είσοδο του, καθώς τα αποτελέσματα θα επηρεαστούν από τον εξωτερικό αέρα. γ) Ο ανιχνευτής δεν πρέπει να διαταραχθεί κατά τη διάρκεια της μέτρησης από πτώσεις αντικειμένων ή μετακινήσεις, ώστε να αποφευχθεί η αλλαγή των συνθηκών δειγματοληψίας, δ) Ο ανιχνευτής θα πρέπει επίσης να είναι ασφαλής κατά τη διάρκεια της μέτρησης, προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε ζημιά.

Όσον αφορά την βαθμονόμηση, το σύστημα μέτρησης δηλαδή αισθητήρας και σύστημα ανίχνευσης, θα πρέπει να ρυθμίζεται όπως ορίζεται στο πρότυπο ISO 11665-1. Η σχέση μεταξύ της φυσικής ποσότητας που καταγράφεται από τον ανιχνευτή όπως ο αριθμός ιχνών, αριθμός των ηλεκτρικών φορτίων, καταμέτρηση παλμών και της συγκέντρωσης του ραδονίου στον αέρα βασίζεται στη μέτρηση της τιμής αναφοράς του ραδονίου για την ατμόσφαιρα.



**Εικόνα 3:** Παθητικών ανιχνευτής τύπου CR-39.

Η μέση συγκέντρωση ραδονίου  $\bar{C}$  υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο σε Bq/m<sup>3</sup>:

$$\bar{C} = (n_g - n_b) \cdot \frac{1}{t \cdot S_{SSNTD} \cdot F_C} \quad (12)$$

Όπου:

$F_C$ : συντελεστής βαθμονόμησης

$n_g$ : ο αριθμός των ιχνών

$n_b$ : μέσος όρος των ιχνών του υποβάθρου

$S_{SSNTD}$ : επιφάνεια που μετρήθηκε (cm<sup>2</sup>)

Μετά την απομάκρυνση του μετρητή από το πεδίο μέτρησης, τα φιλμ τοποθετούνται στο ψυγείο σε αεροστεγή συσκευασία για την μείωση του υποβάθρου. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται χημική διάβρωση με τοποθέτηση των στοιχείων σε καυστικό νάτριο NaOH στους 77°C για 6 ώρες. Τα διαβρωμένα στοιχεία μετρούνται σε μικροσκοπική διάταξη. Η διάταξη αυτή αποτελείται από μικροσκόπιο (4×μεγέθυνση) συνδεδεμένο με ψηφιακή κάμερα. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται αποθηκεύει τις διαδοχικές λήψεις και αθροίζει τα ίχνη σε εμβαδό 0,4cm<sup>2</sup> (0,8cm<sup>2</sup> για το υπόβαθρο). Επιπλέον παρέχει την δυνατότητα ορισμού των κριτηρίων επιλογής των ιχνών όπως το μέγεθος, τη διάμετρο και τη στρογγυλότητα. Σε κάθε διάβρωση προστίθενται και 2 στοιχεία εκτεθειμένα σε πρότυπη άλφα πηγή ακτινοβολίας για τον έλεγχο των συνθηκών διάβρωσης. Συγκεκριμένα εξετάζεται το πλήθος των ιχνών τους και η μορφολογία τους. Σε περίπτωση απόκλισης τα κριτήρια επιλογής- διαχωρισμού του λογισμικού προσαρμόζονται κατάλληλα. Οι συγκεκριμένες διαδικασίες έγιναν με την χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου Leica και του προγράμματος Image Analysis της ίδιας επωνυμίας, εικόνα 4.

*Ένα σημείο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής είναι η ύπαρξη λανθανόντων ιχνών - υποβάθρου (background tracks). Πρόκειται για ίχνη, τα οποία έχουν καταγραφεί από τον ανιχνευτή πριν εκτεθεί στο προς μέτρηση περιβάλλον. Τα ίχνη αυτά μπορούν να καταγραφούν σε διάφορα στάδια της διαδικασίας παραγωγής, της μεταφοράς και της αποθήκευσής τους. Κατά τη χημική επεξεργασία τα ίχνη υποβάθρου μεγεθύνονται και καταμετρώνται μαζί με τα ίχνη της μέτρησης, γεγονός που έχει ως συνέπεια την υπερεκτίμηση του αποτελέσματος. Οι πηγές αυτών των ιχνών ποικίλουν. Συνήθως, τα ίχνη υποβάθρου οφείλονται σε φυσικές πηγές ραδιενέργειας καθώς και στην αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με τα σωματίδια του αέρα ή και του ίδιου του ανιχνευτή. Το μεγαλύτερο ποσοστό τους, οφείλεται στην ύπαρξη ραδονίου στον χώρο αποθήκευσης.*

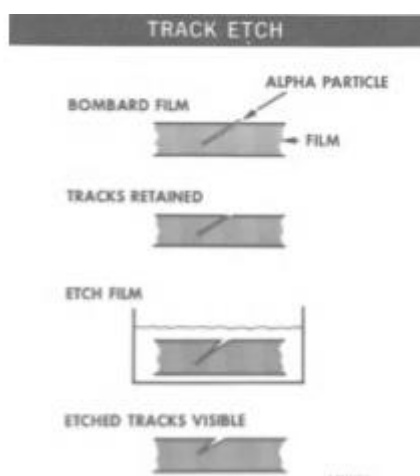
*Για το λόγο αυτό θα πρέπει να αποφεύγεται η παρατεταμένη αποθήκευση ειδικά σε*

χώρους με αυξημένη συγκέντρωση ραδονίου. Κάθε παραγγελία πρέπει να πραγματοποιείται λίγο καιρό πριν την πειραματική αξιοποίηση των ανιχνευτών. Ακόμα και όταν τηρηθούν όλα τα παραπάνω προληπτικά μέτρα, η εξάλειψη του υποβάθρου δεν είναι δυνατή. Πειραματικά μπορεί να προσδιορισθεί η μέση τιμή των ιχνών υποβάθρου από ανιχνευτές που δεν έχουν εκτεθεί στο περιβάλλον μέτρησης, η οποία εν συνεχεία πρέπει να αφαιρείται από όλες τις επόμενες μετρήσεις (Πατήρης, 2009).

Η επεξεργασία των ανιχνευτών για τις μετρήσεις της συγκέντρωσης ραδονίου για την συγκεκριμένη μελέτη, έγιναν στο Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος ΙΠΤΑ - ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας.



**Εικόνα 4:** Μικροσκόπιο Leica.



**Σχήμα 27:** Σχηματική απεικόνιση ίχνους από σωματίδιο α (Cothorn and Smith, 1987).

## Κεφάλαιο 4

### Γεωλογική επισκόπηση Δυτικής Κρήτης

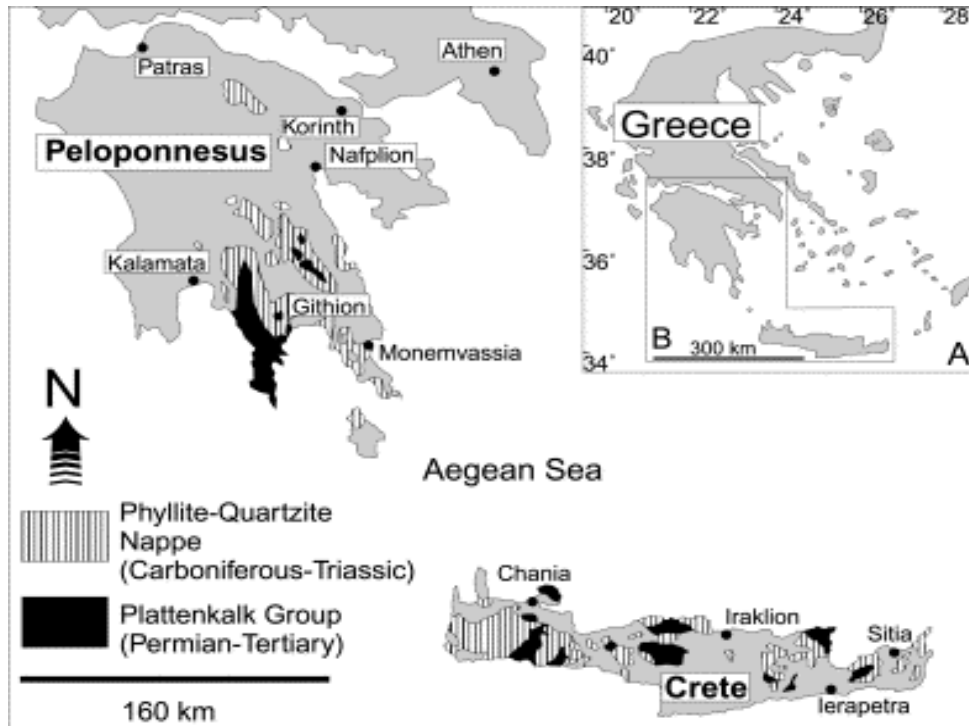
Κατά τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, οι γνώσεις μας για την γεωλογική δομή της Κρήτης έχουν αυξηθεί σημαντικά. Τα αποτελέσματα των ερευνών, στα πλαίσια μεγάλου αριθμού προγραμμάτων ευρωπαϊκών και εθνικών ερευνητικών ιδρυμάτων αλλά και μεμονωμένων ερευνητών, οδήγησε στην έκδοση του πρώτου συνοπτικού γεωλογικού χάρτη της Κρήτης, το 1977, σε κλίμακα 1:200.000 (Creutzburg, 1997), που παρουσιάζεται παρακάτω. Όπως φαίνεται στον χάρτη αυτόν, αλλά και στους επόμενους, που εκδόθηκαν από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, το μεγαλύτερο ποσοστό προνεογενούς ηλικίας πετρωμάτων που δομούν και εμφανίζονται στην Κρήτη, ανήκουν σε μια ακολουθία μεταμορφωμένων πετρωμάτων που για δεκαετίες ήταν γνωστή στη βιβλιογραφία σαν «Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι», η παλαιογεωγραφική τοποθέτηση των οποίων παραμένει ένα ανοικτό γεωλογικό κεφάλαιο. Παρόμοια είναι τα προβλήματα που σχετίζονται με τα καλύμματα της ενότητας του Τρυπαλίου και του Φυλλιτικού Καλύμματος (Μανούτσογλου, 2008). Η εικόνα 5, παρουσιάζει τμήμα του γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:500.000., όπου με κίτρινες και πράσινες αποχρώσεις απεικονίζονται οι λεκάνες του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς.

Πιο συγκεκριμένα, η Κρήτη συγκροτείται από την κατώτερη τεκτονική ενότητα η οποία αποτελείται από ένα αυτόχθονο έως παραυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων που περιλαμβάνει την μεταμορφωμένη Ομάδα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων (Plattenkalk) με ηλικία από το Άνω Πέρμιο έως το Ολιγόκαινο. Με τεκτονική επαφή, ακολουθεί ένα αλλόχθονο σύστημα επωθημένο πάνω στο (παρα)αυτόχθονο, υπό τη μορφή αλληπαλλήλων τεκτονικών καλυμμάτων αλπικών ενοτήτων, και με χαρακτηριστική λεπιοειδή διάταξη.

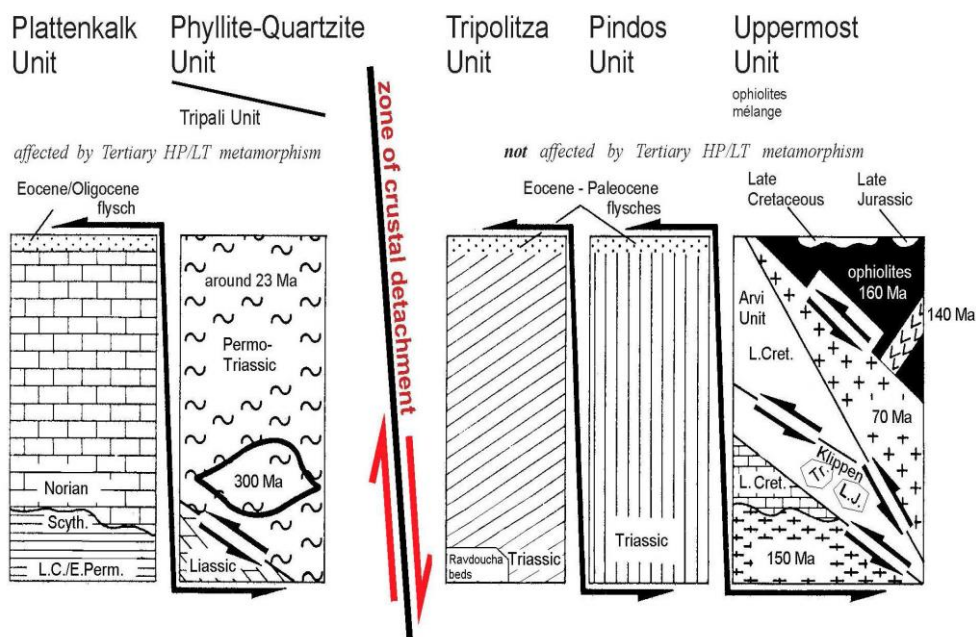


Εικόνα 5: Τμήμα του Γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:500.000 (Ι.Γ.Μ.Ε, 1993).

Στα σχήματα 28 και 29, παρουσιάζονται οι εμφανίσεις της Ομάδας Πλακωδών Ασβεστολίθων και του Φυλλιτικού Καλύμματος στην Πελοπόννησο και την Κρήτη και η τεκτονική διάταξη των τεκτονοστρωματογραφικών ενοτήτων στην Κρήτη.



**Σχήμα 28:** Εμφανίσεις της Ομάδας Πλακωδών Ασβεστολίθων και του Φυλλιτικού Καλύμματος στην Πελοπόννησο και την Κρήτη (Dornsiepen et al., 2001).



**Σχήμα 29:** Τεκτονική διάταξη των τεκτονοστρωματογραφικών ενοτήτων στην Κρήτη (τροποποιημένη από: Seidel et al., 1982).

Τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο τοποθετούνται με την ακόλουθη σειρά από το υποκείμενο προς το υπερκείμενο:

Ενότητα Τρυπαλίου αποτελούμενη από ημιμεταμορφωμένα έως μεταμορφωμένα κυρίως ανθρακικά πετρώματα ηλικίας Τριαδικό έως Λιάσιο.

Ακολουθώς, η Ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών «Φυλλιτικό Κάλυμμα» κατά τους Dornsiepen and Manutsoglu, το 1994, με ηλικία Άνω Πέρμιο έως και το Κάρνιο όπου στα κατώτερα τμήματα παρουσιάζονται εντός δολομιτών και ραουβάκων, εμφανίσεις γύψου και ανυδρίτου και στα ανώτερα, εναλλαγές φυλλιτών με στρώσεις χαλαζιτών και στρώσεις μετα-ηφαιστίτων.

Έπεται η ενότητα Τρίπολης, με το κατώτερο τμήμα να αποτελείται από την αργιλοσχιστολιθική – ανθρακική σειρά Ραβδούχα, το ανώτερο τμήμα από την ανθρακική σειρά της Τρίπολης και τέλος, στο ανώτατο τμήμα της σειράς παρουσιάζεται ο φλύσχος της ενότητας της Τρίπολης. Η ηλικία της ενότητας τοποθετείται στο Μέσο - Άνω Τριαδικό.

Ακολουθεί η Ενότητα Ωλονού – Πίνδου, όπου στην Κρήτη εντοπίζεται με τρεις σειρές: Πίνδου στη Δυτική Κρήτη με την τυπική στρωματογραφική ακολουθία της ενότητας της Πίνδου, Εθιάς στην Κεντρική Κρήτη και Μαγκασσά στην Ανατολική Κρήτη. Η ηλικία της ενότητας τοποθετείται από το Άνω Τριαδικό έως και το Μέσο Παλαιόκαινο (Φυτρολάκης, 1980).

Πάνω από τις παραπάνω αναφερόμενες **εξωτερικές ζώνες**, υπάρχουν σε ανώτερη τεκτονική θέση αλλόχθονα τεκτονικά λείπια των **εσωτερικών ζωνών**, ένα σύνθετο πολύμεικτο λιθοφασικά τεκτονικό σύμπλεγμα που αποτελείται από επαλληλία καλυμμάτων (Bonneau, 1984). Τα διάφορα καλύμματα τα οποία είναι επωθημένα το ένα επάνω στο άλλο από το υπερκείμενο προς το υποκείμενο είναι τα εξής:

- Οφειολιθικό κάλυμμα με σερπεντινιωμένους περιδοτίτες, γάββρους, διορίτες, δολερίτες και διαβάσες, ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού.
- Κάλυμμα Αστερούσιων με μετα-ιλυολιθικούς, διμαρμαρυγιακούς, χλωριτικούς, επιδοτιτικούς γνεύσιους και σχιστολίθους, αμφιβολίτες και μάρμαρα, ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού.
- Κάλυμμα Βάτου με εναλλαγές τεφρών ιλυολίθων και πάγκους από ψαμμιτικούς ασβεστολίθους και ψαμμίτες, ηλικίας Ανωτέρου Ιουρασικού.
- Κάλυμμα Άρβης με βασάλτες σε «μαξιλαροειδείς λάβες», ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού.
- Τέλος, πάνω από τους αλπικούς σχηματισμούς βρίσκονται πετρώματα του Νεογενούς και Τεταρτογενούς τα οποία συνήθως έχουν κυμαινόμενο πάχος και εξάπλωση στις

διάφορες περιοχές της Κρήτης. Τα πετρώματα αυτά σχετίζονται με τις μετεορεγενετικές διεργασίες που επέδρασαν στην περιοχή. Οι απόψεις για το είδος, την διαδοχή και εύρος αυτών των διεργασιών δίστανται στην βιβλιογραφία.

#### 4.1 Σχηματισμοί Ομάδας Πλακωδών Ασβεστόλιθων και ενότητας Τρυπαλίου

Στην προχώρα των Ελληνίδων, ως κατώτερη τεκτονικά ενότητα, εμφανίζεται μια ακολουθία μεταμορφωμένων πετρωμάτων που αποτελείται από μια κλαστική/ανθρακική ακολουθία του άνω παλαιοζωικού, που εξελίσσεται σε ανθρακικούς σχηματισμούς που εμπεριέχουν κερατολίθους του μεσοζωικού και μια δεύτερη κλαστική ακολουθία που χαρακτηρίστηκε από την πλειονότητα των ερευνητών σαν φλύσχη. Στην πάροδο των ετών, οι διάφορες ερευνητικές ομάδες αλλά και μεμονωμένοι ερευνητές, στην προσπάθεια τους να καταγράψουν και να περιγράψουν συστηματικά τις ιδιομορφίες των διαφόρων αυτών ενότητων, εισήγαγαν έναν πολύ μεγάλο αριθμό ονοματολογιών: «*krystallinen Kalkeder Halbinsel Mani*» (Phillippson, 1992), «*Plattenkalk*» (Chalikiopoulos, 1903), «*zentralpeloponnesisch-kretisches Massiv*» (Renz, 1940), «*Talea Ori-Serie*» (Epting et al., 1972), «*Ida Zone*» (Bonneau, 1973), «*Talea Ori-Gruppe*» (Kuss and Thorbecke, 1974), «*Plattenkalk-Serie*» (Creutzburg and Seidel, 1975), «*Σειρά/Ζώνη Κρήτης – Μάνης*» (Φυτρολάκης, 1980). Για πολλές δεκαετίες στην διεθνή βιβλιογραφία επικράτησε η ονοματολογία «*Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι*» (***Plattenkalk***) (Chalikiopoulos, 1903).

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος προτάθηκε ο όρος «*Ομάδα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων*» (*Plattenkalk-Gruppe*), μετά από την συγγραφή εργασιών, όπου τεκμηριώθηκε η αναγκαιότητα της εισαγωγής μιας ενιαίας ονοματολογίας, βασισμένης σε λιθοστρωματογραφικά κριτήρια (Manutsoglu et al., 1995), όπως παρουσιάζει ο πίνακας 24.

Τα πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστόλιθων εμφανίζονται στην Πελοπόννησο δομώντας τους ορεινούς όγκους του Πάρωνα, του Ταϋγέτου και ολόκληρης της χερσονήσου της Μάνης. Μέσω της Κρήτης, όπου και δομούν πάνω από το 70% της νήσου, (Λευκά Όρη στην Δυτική Κρήτη, Ταλλαία Όρη και Ψηλορείτης στην Κεντρική Κρήτη, Χερσόνησος της Ελούντας – Μιράμπελλου, Όρη Σελένας, Δίκτυ και Όρνον στην Ανατολική Κρήτη) και συνεχίζουν την εμφάνιση τους στην Κάσο, Κάρπαθο και Ρόδο. Ολόκληρη η ακολουθία χαρακτηρίζεται κυρίως από τεκτονική συμπίεσης με έντονη πτύχωση, λεπίωση, επιπτεύσεις και συγκινηματική μεταμόρφωση (Manutsoglu, 1990; Manutsoglu et al., 2003).

**Πίνακας 24:** Ονοματολογία του μεταμορφωμένου συστήματος της Κρήτης (Manutsoglu et al., 1995).

|                         |                                                                                                                                                                              |                          |                                                                   |                     |                                                                                   |                   |                                                                           |                                                                      |                                                                                                                      |                                                                                |  |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--|
| Cayeux (1902)           |                                                                                                                                                                              | Wurm (1950)              |                                                                   | Eping et al. (1972) |                                                                                   | Bonneau (1973)    |                                                                           | Kus & Thorbecke (1974)                                               |                                                                                                                      | Creutzburg & Seidel (1975)                                                     |  |
| Tripolitzakalk          |                                                                                                                                                                              | Tripolitzakalk           |                                                                   | Tripolitzza-Serie   |                                                                                   | Tripolitzza Decke |                                                                           | Tripolitzza-Phylit<br>Tripolitzza-Kalk                               |                                                                                                                      | Tripolitzza-Serie                                                              |  |
| terrains metamorphiques | Schwarze Tonchiefer<br>Obere Quarzit und Phyllitserie<br>Cipolline und Konglomerate<br>Untere Quarzit-Phyllitserie<br>Phyllitische Kalk<br>Dolomite und Rauchwacken<br>Gipse | Kretisches Metamorphikum | Phyllit-Quarzit-Tonchieferserie<br><br>Gips-Rauchwacken-Formation | Tales Ori-Phyllit   | Quarzit,<br>Sericit-Quarzit,<br>Quarzphyllite und<br>Sericit-Chloritischiefer     |                   |                                                                           | Tripolitzza-Gruppe<br><br>Tripolitzza-Phyllit<br><br>Galinos-Phyllit |                                                                                                                      | Phyllit-Quarzit-Serie<br><br>Gips-Rauchwacken-Formation<br><br>Tripoli-Einheit |  |
|                         |                                                                                                                                                                              |                          |                                                                   |                     |                                                                                   |                   |                                                                           |                                                                      |                                                                                                                      |                                                                                |  |
| Metamorphe Karbonate    |                                                                                                                                                                              |                          |                                                                   | Tales Ori-Serie     | Plattenkalk<br>Stromatolithischer Dolomit<br>Sissos Schichten<br>Fodele Schichten | Ida-Zone          | Couches de passages/Kalavros-Schichten<br>Plattenkalk<br>div. Formationen | Tales Ori-Gruppe                                                     | Kalkphyllit<br>Tales Ori-Plattenkalk<br>Tales Ori-Stromatolithischer Dolomit<br>Sissos-Formation<br>Fodele-Formation | Plattenkalk-Serie                                                              |  |

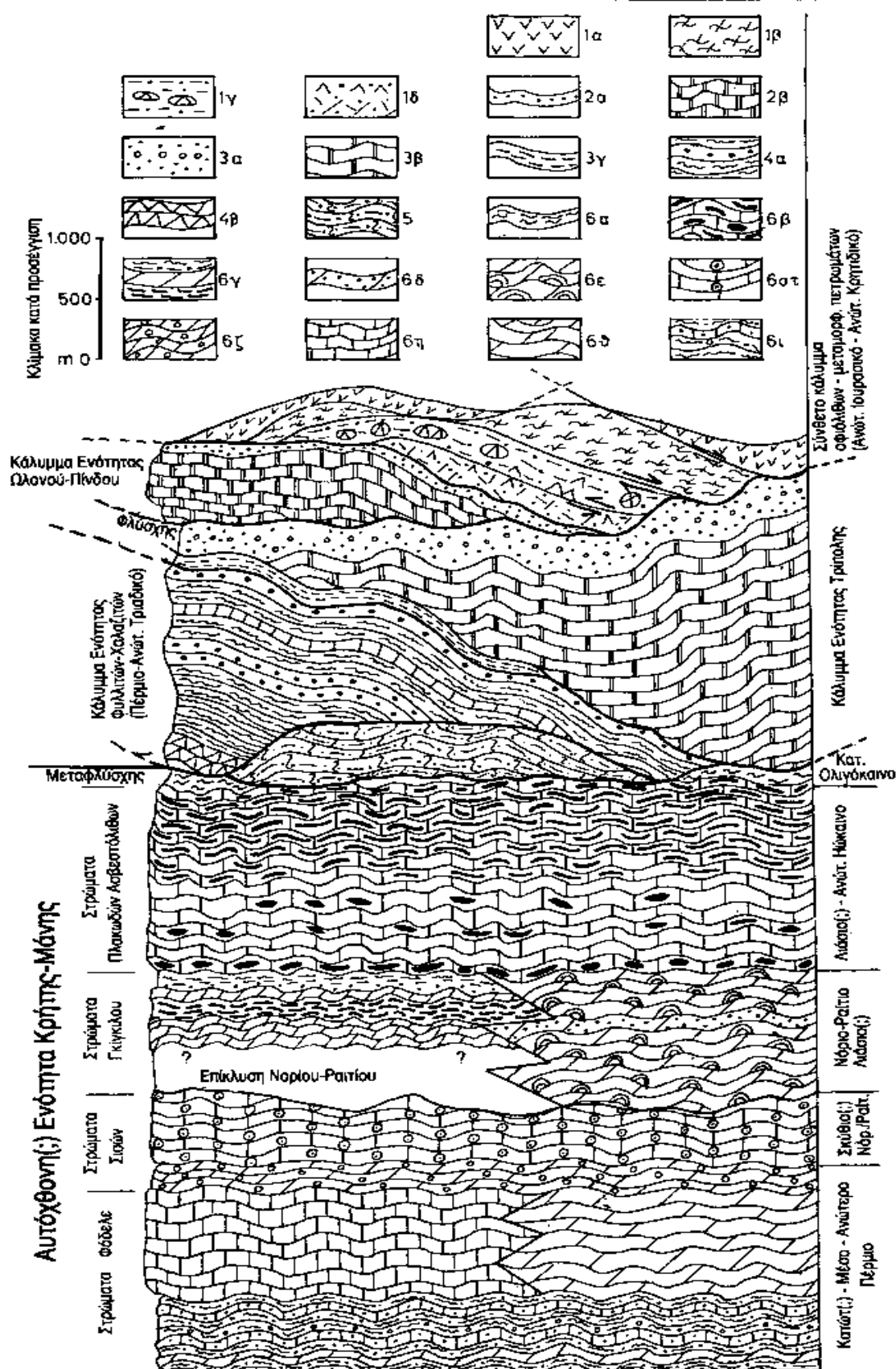
|                                                 |  |                                                                                                                       |  |                                          |  |                                          |  |                                                                                                                                                                                 |  |                                                            |  |
|-------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------|--|------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------|--|
| Sannemann & Seidel (1976)                       |  | Baumann et al. (1977)                                                                                                 |  | Seidel (1977)                            |  | Kopp & Ott (1977)                        |  | Fytrolakis (1978, 1980)                                                                                                                                                         |  | König & Kuss (1980)                                        |  |
| Tripolitzakalk<br>Trias-Schichten von Rawdoucha |  | Tripolitzza-Kalk<br>Rawdoucha-Schichten                                                                               |  |                                          |  | Tripolitzza-Serie<br>Rawdoucha-Schichten |  | Tripolitzakalk/-Einheit                                                                                                                                                         |  |                                                            |  |
| Phyllit-Quarzit-Serie                           |  | Phyllit-Serie                                                                                                         |  | Phyllit-Quarzit-Serie<br>Kalamos-Sequenz |  | Phyllit-Serie                            |  | Phyllit-Quarzit-Einheit<br>Tonchiefer-Karbonatserie der Tripolitzza-Zone<br>Phyllit-Quarzit-Einheit<br>Phyllitserie der Trypali-Einheit<br>Metakalk der Kreta Mani-Zone         |  |                                                            |  |
|                                                 |  |                                                                                                                       |  |                                          |  |                                          |  |                                                                                                                                                                                 |  |                                                            |  |
|                                                 |  | Kalkphyllit (Kalavros)<br>Tales Ori Plattenkalk<br>Stromatolithischer Dolomit<br>Sissos Schichten<br>Fodele Schichten |  | Trypallikalk                             |  | Trypali-Einheit                          |  | Kreta Mani-Zone/-Einheit<br>Metakalk der Plattenkalk<br>Plattenkalk<br>Stromatolithischer Dolomit und flyschoides Sedimente - Gigilos-Schichten<br>Sissos-Serie<br>Fodele-Serie |  | Tales Ori-Gruppe<br>Fodele Formation<br>Galinos Tonchiefer |  |

|                       |                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                |                                                                                                                                                                       |  |                                                                                                                                                                       |  |                                |  |                                                                                    |                   |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Kopp & Wernado (1983) |                                                                                                                                      | Krahl et al. (1983)                                                                                                                                                                                    |                                                                                                | Richter & Kopp (1983)                                                                                                                                                 |  | Krahl et al. (1986)                                                                                                                                                   |  | Krahl et al. (1988)            |  | Domasien & Manutsoglu (1994)                                                       |                   |
|                       |                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                |                                                                                                                                                                       |  |                                                                                                                                                                       |  |                                |  | Tripolitzza-Serie                                                                  |                   |
| Phyllit-Gruppe        | Mana-Formation<br>Violettchiefer-Formation<br>W. Varietikum<br>Oberer Quarzit<br>Mittlerer Phyllit<br>Unterer Quarzit<br>Etage mixte | Phyllit-Gruppe<br>Mana-Konglomerat<br>Mana-Dolomit<br>Mana-Kalkphyllit<br>Oberer Quarzit<br>Sfinari Schiefer<br>Mittlerer Quarzit<br>Rambi Seli Schiefer<br>Unterer Quarzit<br>Basaler Dolomit<br>Gips | Phyllit-Gruppe<br>Grünschiefer von Achlada<br>Vanikoro-Marmor<br>Quarzit-Phyllit-Folge (Q 1-6) | Phyllit-Gruppe<br>Tripokefala-Schichten<br>Skopi-Einheit<br>Chameni-Schichten<br>Varietikum<br>Agrilos-Schichten<br>Mirani-Einheit<br>Amor-Schichten<br>Sfaka-Dolomit |  | Phyllit-Gruppe<br>Tripokefala-Schichten<br>Skopi-Einheit<br>Chameni-Schichten<br>Varietikum<br>Agrilos-Schichten<br>Mirani-Einheit<br>Amor-Schichten<br>Sfaka-Dolomit |  | Kreta Stockwerk<br>vgl. Tab. 2 |  | Phyllit-Decke<br>Varietikum<br>Phyllit-Quarzit-Serie<br>Gips-Rauchwacken-Formation | Plattenkalk-Serie |
|                       |                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                |                                                                                                                                                                       |  |                                                                                                                                                                       |  |                                |  |                                                                                    |                   |

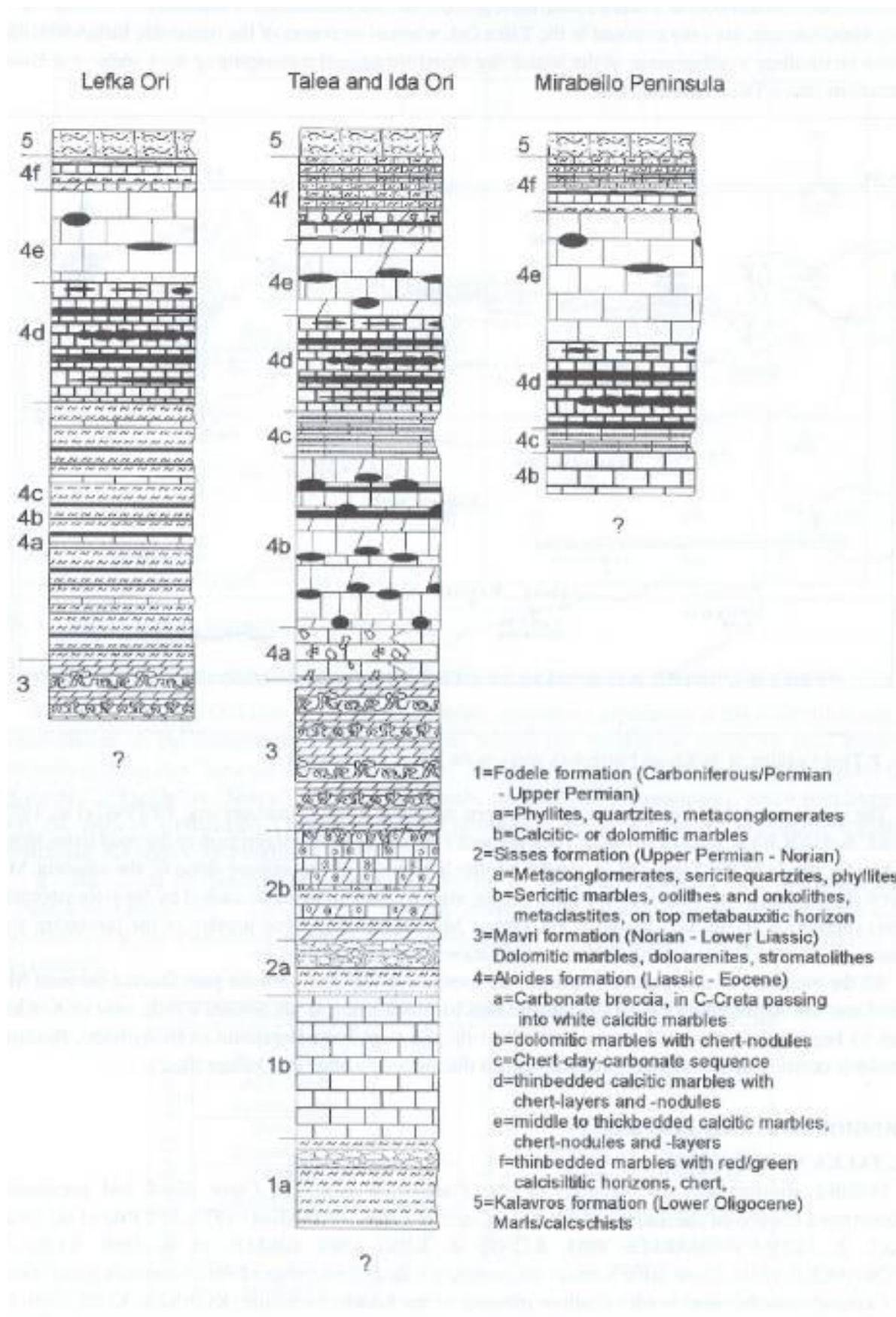
Στην Κρήτη, παλαιότερα σε ηλικία πετρώματα της ομάδας αυτής, βρίσκονται σε ανάστροφη στρωματογραφικά θέση, στα Ταλλαία Όρη της κεντρικής Κρήτης, αποτελούμενα από τους ανθρακικούς-κλαστικούς σχηματισμούς των Φόδελε και Σίσσες, που με την βοήθεια απολιθωμάτων (τρηματοφόρα, βρυόζωα, φύκη και κωνόδοντα) χρονολογήθηκαν ηλικίας Ανωτέρου Πέρμιου. Σαν το παλαιότερο, σε ηλικία τμήμα των σχηματισμών αυτών, περιγράφηκαν οι σχιστόλιθοι του Γαληνού που εξαιτίας μιας πολύ πλούσιας απολιθωμένης πανίδας και χλωρίδας τοποθετήθηκαν χρονικά, στο όριο Ανώτερου Λιθανθρακοφόρου και Πέρμιου (Ertting et al., 1972; Koenig and Kuss, 1980). Προς το υπερκείμενο, μετά από ένα στρωματογραφικό κενό από το Ανίσιο μέχρι το Κάρνιο, ακολουθεί μια μεγάλου πάχους ακολουθία στρωματολιθικών δολομιτών που τα κατώτερα τμήματα της χρονολογήθηκαν Λιασίου ηλικίας. Στην συνέχεια, βρίσκεται η γνωστή ανθρακική ακολουθία των εναλλασσόμενων πλακωδών ασβεστόλιθων με κερατολίθους, από όπου και προήλθε και η ονοματολογία της ομάδας των πετρωμάτων αυτών και τέλος η ακολουθία του Καλαβρού, ένας κλαστικός σχηματισμός που διαφέρει εντελώς από τον φλύσχη των εξωτερικών Ελληνίδων. Στην βάση του βρέθηκαν τρηματοφόρα ηλικίας Κάτω Ολιγόκαινου (Φυτρολάκης, 1972; Bonneau, 1973). Μια συνοπτική στρωματογραφική στήλη από τις προϋπάρχουσες εργασίες έγινε για τους Πλακώδεις Ασβεστόλιθους από τον Φυτρολάκη, το 1980, και παρουσιάζεται στο σχήμα 30.

Οι Soujon και οι συνάδελφοί του, το 1998, κάνουν τις πρώτες λιθοστρωματογραφικές συγκρίσεις των πετρωμάτων της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστόλιθων στις διάφορες περιοχές της Κρήτης, στο σχήμα 31.

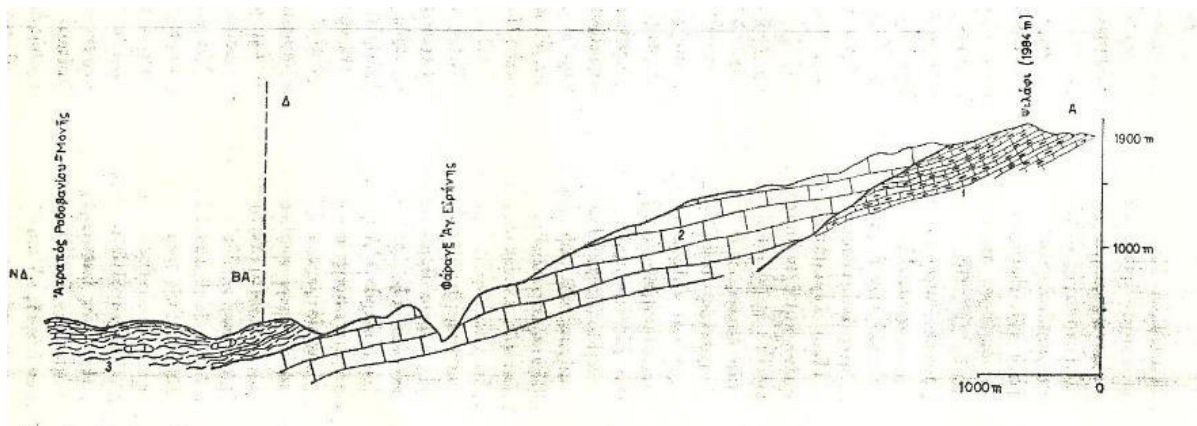
Στο βόρειο τμήμα της ευρύτερης περιοχής, με εμφανή στον υπάρχοντα χάρτη τεκτονική επαφή προς το υποκείμενο, εμφανίζονται γκρίζα και λευκά δολομιτικά μάρμαρα που εμπεριέχουν ένα χαρακτηριστικό βιτουμενιούχο δολομιτικό ορίζοντα, πάχους 2-3 μέτρων. Τα μάρμαρα προσομοιάζουν κατά θέσεις προς τους πλακώδεις κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, χωρίς όμως να εμπεριέχουν πυριτολίθους. Πρόκειται για τους μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους και δολομίτες της ενότητας Τρυπαλίου (Creutzburg and Seidel, 1975), των οποίων η γεωτεκτονική θέση είναι γνωστή (πάντα επωθημένοι πάνω σε τμήματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστόλιθων) αλλά η παλαιογεωγραφική τους θέση άγνωστη. Την υποκείμενη ενότητα στην περιοχή δομούν τα πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστόλιθων. Η πρώτη λεπτομερής λιθοστρωματογραφική περιγραφή για την ευρύτερη περιοχή των Σφακίων, που αναθεωρεί και την ηλικία που δίδεται από το χάρτη (Λιθανθρακοφόρο-Πέρμιο), έγινε από τον Φυτρολάκη (1978, 1980) και συμπληρώθηκε από τον Soujon και τους συναδέλφους του, το 1998.



**Σχήμα 30:** Στρωματογραφικές - τεκτονικές Ενότητες της νήσου Κρήτης (Ενότητα Plattenkalk, Ενότητα Τρυπαλίου, Φυλλιτική - Χαλαζιτική σειρά, ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης, ζώνη Πίνδου (Φυτρολάκης, 1980).



**Σχήμα 31:** Συγκριτικές λιθοστρωματογραφικές στήλες των Πλακωδών Ασβεστολίθων της Κρήτης (Soujon et al., 1998).



**Σχήμα 32:** Τομή με μεταμορφωμένα ανθρακικά της ενότητας Madarakalke που στην συνέχεια πήρε το όνομα ενότητα του Τρυπαλίου, τοποθετούνται ως υποκείμενα της ανώτερης σειράς των φυλλιτών, ραουβακών κτλ.

Οι Τάταρης και Χριστοδούλου, το 1965, περιγράφοντας την ανώτερη από τις δύο σειρές που υπέρκεινται των Πλακωδών ασβεστόλιθων στα Λευκά όρη, αναφέρουν την παρουσία, μέσα σε σκοτεινότεφρους λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους, μεγάλου αριθμού ελασματοβραγχίων του Ανώτερου Τριαδικού που ανήκουν στα γένη *Ostrea*, *Myophoria* και πιθανώς *Halobia* του Ανώτερου Τριαδικού. Οι ερευνητές αυτοί δίνουν και την πρώτη τομή νοτίως της πόλης του Ομαλού.

Οι Creutzburg and Seidel, το 1975, εισάγουν για το σύμπλεγμα των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της δυτικής Κρήτης τον όρο «Σειρά Φυλλιτών – Χαλαζιτών» και δέχονται ότι το σύμπλεγμα αυτό αντιστοιχεί στο «*terrains metamorphique*» (Cayeux, 1902), δηλαδή στο σχηματισμό «γύψων και ραουβακών και στη σειρά «φυλλιτών - χαλαζιτών - αργιλικών σχιστολίθων» (Wurm, 1950). Στη σειρά των «Φυλλιτών – Χαλαζιτών» των Creutzburg and Seidel, κυριαρχούν φυλλίτες διάφορης σύστασης, χαλαζίτες μικρού ή μεγάλου πάχους, κροκαλοπαγή, μαύροι πλακώδεις δολομιτικοί ασβεστόλιθοι, γύψοι, ραουβάκες, και μεταβασάλτες.

Οι ερευνητές αυτοί εισάγουν και ορίζουν την έννοια «Ενότητα του Τρυπαλίου» με την οποία χαρακτηρίζουν κυρίως ανθρακικής σύστασης πετρώματα όπως δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, σπανιότερα καθαρούς ασβεστόλιθους, ανθρακικής σύστασης λατυποπαγή έως ραουβάκες, σκουρόχρωμους κυψελώδεις δολομίτες, καθώς επίσης και λευκά ζαχαρώδους υφής μάρμαρα. Το σύνολο των ανωτέρω πετρωμάτων έχει διάφορου βαθμού ανακρυστάλλωση. Η λιθολογική εξέλιξη της ενότητας (ανθρακικά, γύψοι) υποστηριζόμενη από απολιθώματα (άλγη, κοράλια, γαστερόποδα) οδήγησε τους ερευνητές να δεχθούν την δημιουργία των πετρωμάτων αυτών σε ένα αποθετικό πεδίο ρηχών υδάτων. Η λιθοφασική αυτή εξέλιξη πιστοποιήθηκε από παρατηρήσεις πεδίου σε διάφορες περιοχές της Δυτικής Κρήτης (δυτικά της Χώρας Σφακίων βρέθηκαν γύψοι σε ραουβάκες και λεπτοπλακώδεις δολομιτικούς ασβεστόλιθους). Στην ενότητα

αυτή συμπεριέλαβαν μια θέση με γύψους του φύλλου χάρτη Αλικιανού, παρατίθεται στο παράρτημα, βορειοανατολικά της Κανδάνου καθώς επίσης, και τις εμφανίσεις γύψου και ραουβακών δυτικά των Λευκών Ορέων που περιέγραψε ο Wurm, το 1950 από το Στόμιο έως την Σούγια.

Όσον αφορά την σχέση μετάβασης των ανθρακικών σχηματισμών της ενότητας του Τρυπαλίου με τους μετακλαστικούς σχηματισμούς της «Φυλλιτικής-Χαλαζιακής Σειράς» οι ερευνητές εκπλήσσουν με το τελικό τους συμπέρασμα. Ενώ στην περιοχή του Καλλικράτη, νοτίως των Λευκογίων, ανατολικά του οικισμού Χωστής και βόρεια και ανατολικά της Κανδάνου σημειώνουν ότι έχει κανείς την άποψη ότι υπάρχει κανονική μετάβαση της ενότητας του Τρυπαλίου στην «Φυλλιτική - Χαλαζιακή Σειρά» που όπως φαίνεται επιβεβαιώνεται και από πολλές άλλες θέσεις στην Νότια-Κεντρική Κρήτη (π.χ. νότια της Μονής-Αρκαδίου), τελικώς αμφισβητούν την ηλικία Ραϊτίου-Διάσιου που βρέθηκε για τα πετρώματα αυτά και επιτείνουν το γεγονός, ότι η επαφή με τους υποκείμενους Πλακώδεις Ασβεστόλιθους είναι καθαρά τεκτονική. Για τους λόγους αυτούς τοποθετούν την ενότητα αυτήν στην υποκείμενη της «Φυλλιτικής-Χαλαζιακής Σειράς» θεωρώντας την σαν ανεξάρτητη τεκτονική ενότητα. Αυτό φαίνεται άλλωστε και στην θεματική τομή, που παραθέτουν στο σχήμα 32.

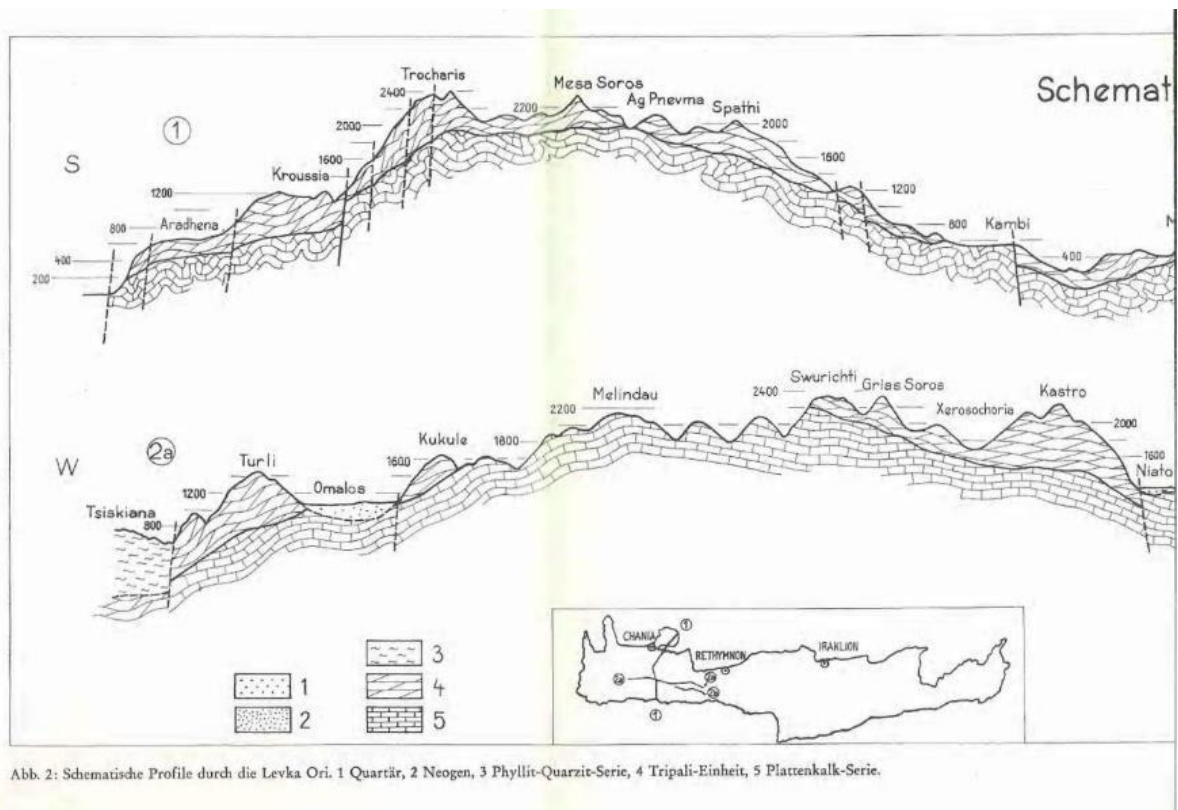
Συμπερασματικά, θα μπορούσε να πει κανείς ότι με την εργασία αυτή:

- Πρώτον, εισάγεται μια νέα τεκτονική ενότητα στο ήδη πολύπλοκο σύστημα των μεταμορφωμένων πετρωμάτων των Εξωτερικών Ελληνίδων, αυτής της Ενότητας του Τρυπαλίου,
- Δεύτερον, λιθοφασικά ίδιους σχηματισμούς (γύψους, ραουβάκες) τους εντάσσουν και στην «Φυλλιτική-Χαλαζιακή Σειρά» και στην «Ενότητα Τρυπαλίου»,
- Τρίτον, περιγράφεται λεπτομερέστερα η «Φυλλιτική-Χαλαζιακή Σειρά» και αναδεικνύεται ο σημαντικός ρόλος της ύπαρξης των μεταηφαιστειακών πετρωμάτων για την διαλεύκανση των συνθηκών μεταμόρφωσης.

Ο Xavier, το 1976, στον Ομαλό περιγράφει σχηματισμούς που άλλοι ερευνητές τους εντάσσουν στην ενότητα του Τρυπαλίου, αλλά τους τοποθετεί στα ανώτερα τμήματα της σειράς των Ταλλαίων Ορέων.

Οι Kopp and Ott, το 1977, επισημαίνουν ότι έπρεπε για τη σειρά Τρυπαλίου και Φυλλιτών να βρεθεί μια θέση μεταξύ των Ταλλαίων Ορέων και της ζώνης της Τρίπολης. Τοποθετούν τελικά την ενότητα Τρυπαλίου στην εξωτερική περιοχή της ζώνης της Τρίπολης.

Ο Jacobhagen και οι συνάδελφοί του, το 1978, θεωρούν ότι η ενότητα του Τρυπαλίου ανήκει είτε στην εξωτερικότερη περιοχή της ζώνης της Τρίπολης είτε στην Αδριατικοϊόνια ζώνη.



**Σχήμα 33:** Τομή με μεταμορφωμένα ανθρακικά της ενότητας του Τρυπαλίου τοποθετούνται δυτικά του Ομαλού με ρήγμα τεκτονικός υποκείμενα της Φυλλιτικής Χαλαζιτικής Σειράς.

Ο Karakitsios, το 1979, αναπτύσσοντας ένα προβληματισμό σχετικά με το εάν η ενότητα Τρυπαλίου μπορεί να συσχετισθεί με τους ορίζοντες του Αν. Τριαδικού - Λιασίου της ανθρακικής σειράς της Τρίπολης ή με το σύνολο των στρωματολιθικών δολομιτών της σειράς των Ταλλαίων ορέων κλίνει υπέρ της δεύτερης άποψης. Ο ίδιος συγγραφέας, το 1987, γράφει ότι η σειρά του Τρυπαλίου θυμίζει σχηματισμούς που συνοδεύουν τους εβαπορίτες της Ιόνιας ζώνης στην ηπειρωτική Ελλάδα, και ότι η σειρά αυτή αντιπροσωπεύει εφιππευμένα τμήματα του κατώτερου μέρους της παρά αυτόχθονης σειράς που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της επώθησης του καλύμματος της Τρίπολης.

#### 4.1.1 Νεογενείς Λεκάνες Β.Α. Κρήτης

Η επιφάνεια της Κρήτης η οποία αποτελεί τμήμα της ηπειρωτικής λιθόσφαιρας του Αιγαίου, χαρακτηρίζεται από τη δημιουργία ιζηματογενών λεκανών, οι οποίες να δημιουργήθηκαν από το Μέσο Μειόκαινο ή και νωρίτερα. Περισσότερο από το ένα τρίτο του νησιού καλύπτεται από Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα. Οι Νεογενείς αποθέσεις καλύπτουν ασύμφωνα το αλπικό υπόβαθρο.

Οι σημαντικότερες εμφανίσεις Νεογενών ιζημάτων βρίσκονται κατά μήκος της βόρειας πλευράς του νησιού (νομοί Χανίων και Ρεθύμνου), στο Ηράκλειο, ανάμεσα στον Αγ. Νικόλαο και στην Ιεράπετρα και στην περιοχή της Σητείας στην ανατολική Κρήτη. Διασκορπισμένες εμφανίσεις βρίσκονται σε όλο το νησί.

Παρατηρήσεις σχετικές με την ιζηματογένεση του Νεογενούς αποδεικνύουν την ύπαρξη σημαντικών μεταβολών στην παλαιογεωγραφική διαμόρφωση του νησιού οι οποίες τις περισσότερες φορές συνδέονται με μεγάλα τεκτονικά γεγονότα. Από το μέσο Μειόκαινο, η περιοχή της Κρήτης μεταβάλλεται σε ένα μωσαϊκό τεμαχών το οποίο αποτελείται από τεκτονικά κέρατα και τάφρους. Η πολύπλοκη αλληλεπίδραση των τεκτονικών κινήσεων με την ιζηματογένεση, είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλης ποικιλίας Νεογενών και νεότερης ηλικίας ιζημάτων καθώς και τις γρήγορες πλευρικές και κατακόρυφες λιθολογικές μεταβολές.

Πιο συγκεκριμένα, η πλειονότητα των Νεογενών εμφανίσεων της Κρήτης χαρακτηρίζεται από επιπλυσιγενείς ακολουθίες. Αυτό σημαίνει είτε ότι έγινε μια ανύψωση της θαλάσσιας στάθμης είτε ότι οι συσχετιζόμενες περιοχές υπέστησαν βύθιση. Αυτές οι σχετικές κατακόρυφες κινήσεις λίγο ή πολύ συμπίπτουν με πολύ σημαντικές ιζηματολογικές μεταβολές. Τα ιζήματα άλλαξαν από κυρίως κλαστικά, κατά την διάρκεια του Τορτόνιου, σε κυρίως ανθρακικά κατά το Μεσσήνιο. Επιπλέον χαρακτηρίζονται από σημαντική αύξηση των στρωματοποιημένων ιζημάτων.

Η γενική εικόνα δείχνει ότι η περίοδος από το ανώτερο Τορτόνιο έως το κατώτερο Μεσσήνιο, ήταν κυρίως περίοδος διαφορικής κατακόρυφης μετακίνησης τεμαχών. Η σχετική ανύψωση του βασικού επιπέδου διαβρώσεως μπορεί να εξηγήσει την ασύμφωνη επικάλυψη κανονικών ακολουθιών που σχηματίζουν τα ιζήματα αυτής της ηλικίας σε πολλές περιοχές. Αποδοχή αυτού του γεγονότος, εξηγεί τις γενικές μεταβολές που παρατηρούνται κατά την ιζηματογένεση. Πρώτος ο Drooger, το 1976, έδειξε ότι τα ιζήματα του Τορτονίου είναι κυρίως λεπτομερή κλαστικά με απόθεση αργίλου κατά θέσεις, καθώς επίσης, και βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι που επίσης βρίσκονται συγκεντρωμένοι κατά τόπους. Ο συνδυασμός ύπαρξης βιοκλαστικών ασβεστολίθων με λεπτόκοκκα κλαστικά ιζήματα υποδηλώνει τοπικά αρκετά ομαλό βαθυμετρικό ανάγλυφο της περιοχής απόθεσης και ταυτόχρονα σχετικά μικρά βάθη επικλινούς πλατφόρμας. Η σχετική ανύψωση της θαλάσσιας στάθμης κατά το ανώτερο Τορτόνιο – κατώτερο Μεσσήνιο ευνόησε αυτή την κατάσταση. Η ανύψωση του βασικού επιπέδου αποθέσεως προκάλεσε την μείωση εισροής κλαστικού υλικού και την αλλαγή από κλαστική σε ανθρακική ιζηματογένεση. Την αλλαγή αυτή, στον τύπο της ιζηματογένεσης ευνόησε και η απόσυρση της θάλασσας κατά το Μεσσήνιο, η οποία οφείλεται στην ευστατική πτώση της θαλάσσιας στάθμης που με την σειρά της έχει αποδοθεί σε κλιματικές αλλαγές κατά την περίοδο αυτή. Το κλίμα

γενικά, από ψυχρό και υγρό κατά την διάρκεια του Τορτονίου, έγινε θερμό και ξηρό κατά το Μεσσήνιο.

Οι Νεογενείς λεκάνες ιζηματογένεσης στην Δυτική Κρήτη είναι κυρίως τρείς. Βρίσκονται στις περιοχές Πλάτανος, Καστέλι και Μάλεμε (Βουκολίες). Σε αυτές ο Freudenthal, το 1969, χαρτογράφησε έξι νεογενείς σχηματισμούς.

#### ➤ Σχηματισμός Ρόκα

Αποτελείται κυρίως από κροκαλοπαγή, που περιέχουν άμμο έως ψαμμίτες και μαργαϊκούς βιογενείς ασβεστόλιθους. Οι στρώσεις του σχηματισμού της Ρόκας υπέρκεινται ανομοιογενώς των προνεογενών καλυμμάτων της Πίνδου και της Τρίπολης (διαβρωμένη και ακανόνιστη επαφή) και των μεταμορφωμένων στρωμάτων. Ειδικά στο χωριό Ρόκα, ο σχηματισμός σταδιακά υπέρκειται του σχηματισμού Μεσονήσι, ενώ νοτιοδυτικά του Κολυμπαρίου υπερκαλύπτει 25 περίπου μέτρα αδρομερών ποτάμιων κροκαλοπαγών που περιέχουν βασικά στοιχεία της Φυλλιτικής-Χαλαζιακής σειράς (κατώτερα κόκκινα κροκαλοπαγή του σχηματισμού Μεσονήσι). Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η ιζηματογένεση έγινε μετά την εκταφή της μεταμορφικής σειράς. Ο σχηματισμός Ρόκα διαδοχικά επικαλύπτεται από τους σχηματισμούς της Κισσάμου και των Χαιρετιανών ή της Κουκουναράς. Σύμφωνα με την άποψη των συγγραφέων, οι μεταγενέστεροι σχηματισμοί διεισδύουν και πλευρικός στον σχηματισμό της Ρόκας. Από την άλλη, κατά το τέλος του πρώτου κύκλου ιζηματογένεσης (μέσο Μεσσήνιο) οι βιογενείς ασβεστόλιθοι κατέπεσαν στις λεκάνες και πάλι και υπερκάλυψαν τις αμμούχες μάργες του σχηματισμού των Χαιρετιανών. Ο «ετεροχρονισμένος» σχηματισμός της Ρόκα υποδεικνύει ένα πολύ ρηχό, θαλάσσιο περιβάλλον απόθεσης (Freudenthal, 1969).

#### ➤ Σχηματισμός Κουκουναρά

Πολυμεικτικά θαλάσσια κροκαλοπαγή, μετρίως σκληρημένες και διαβαθμισμένες στρώσεις (τουρβιδίτες), ελασματοποιημένες και άμορφες μπλε μάργες, και αδρόκοκκοι έως πολύ αδρόκοκκοι ψαμμίτες συνθέτουν τον σχηματισμό Κουκουναρά. Ο σχηματισμός υπέρκειται μερικώς του σχηματισμού της Ρόκας, με την επαφή τους, να μην είναι εμφανής, ή αποτίθεται απευθείας στο προνεογενές. Σύμφωνα με παρατηρήσεις, ο σχηματισμός Κουκουναρά είναι μερικώς πλευρικός, αντίστοιχα με τον σχηματισμό Ρόκα, και μερικώς νεότερος στρωματογραφικά. Ο σχηματισμός αυτός είναι το αποτέλεσμα τουλάχιστον τριών διαφορετικών σειρών απόθεσης. Ο σχηματισμός Κουκουναρά, υπόκειται του σχηματισμού των Χαιρετιανών (Freudenthal, 1969).

#### ➤ Σχηματισμός Κισσάμου

Κυρίως άμορφες αλλά επίσης πολύ λεπτώς έως μετρίως διαστρωμένες άργιλοι και ιλυόλιθοι χρώματος μπλε-γκρι συνθέτουν τον σχηματισμό της Κισσάμου. Τα όρια των στρώσεων είναι

δυσδιάκριτα. Λεπτά στρώματα κλαστικού υλικού παρεμβάλλονται, τα οποία είναι σπανίως διαβαθμισμένα, κυρίως κοντά στα όρια της λεκάνης. Λεπιοειδείς δομές με οστρακοειδή θραύσματα και σφαιρικούς ιλυόλιθους συνυπάρχουν επίσης. Αυτός ο σχηματισμός υπέρκειται ή εμπλέκεται πλευρικά με τον σχηματισμό της Ρόκας (π.χ. στην Επισκοπή) αλλά γενικά η βάση του σχηματισμού δεν είναι εμφανής. Ο υπερκείμενος σχηματισμός είναι ο λίγο ή περισσότερο αμμώδης σχηματισμός των Χαιρεθιανών κυρίως στο Ανατολικό κομμάτι της λεκάνης της Κισσάμου. Η μετάβαση είναι συνήθως βαθμιαία, αν και παρατηρείται μια αλλαγή στο χρώμα από μπλε σε κίτρινο. Είναι πιθανό το νοτιοανατολικό όριο της λεκάνης της Κισσάμου να υπερκαλύπτεται από τον σχηματισμό Χάτζι. Θεωρείται ότι το περιβάλλον απόθεσης είναι αβυσσικό (Freudenthal, 1969).

#### ➤ Σχηματισμός Χάτζι

Το κατώτερο μέρος του σχηματισμού Χάτζι αποτελείται από κόκκινα κροκαλοπαγή με σχεδόν κανονικές παρεμβολές μαργών. Στο ανώτερο μέρος του σχηματισμού κυριαρχούν λεπτές καλά σχηματισμένες στρώσεις αργίλου με εμφανίσεις γύψου που παρεμβάλλονται τοπικά. Κύριο χαρακτηριστικό είναι το κόκκινο χρώμα όλων των ιζημάτων που οφείλεται στην ισχυρή επίδραση της χερσαίας λατεριτικής αποσάθρωσης, πάνω στην φυλλιτική-χαλαζιακή σειρά. Στο νότιο άκρο της λεκάνης του Κισσάμου, ο σχηματισμός Χάτζι υπέρκειται ανομοιογενώς του προνεογενούς υποβάθρου (όπως και ο σχηματισμός Ρόκα) (Freudenthal, 1969).

#### ➤ Σχηματισμός Χαιρετιανών

Ο σχηματισμός των Χαιρετιανών αποτελείται από κίτρινες, άμορφες, στρωματοποιημένες αργίλους (διατομίτες) και μάργες, σε εναλλαγή με λεπτές έως παχιές στρώσεις ψαμμιτών των οποίων το πάχος αυξάνεται προς την κορυφή. Στο κατώτερο μέρος του σχηματισμού παρεμβάλλονται στρώματα γύψου. Ο σχηματισμός των Χαιρετιανών υπέρκειται των σχηματισμών της Ρόκας, της Κισσάμου, του Κουκουναρά ή του Χάτζι αντιστοίχως (Freudenthal 1969). Η περεταίρω σχέση είναι μάλλον αμφισβητήσιμη.

Ο σχηματισμός του Ταυρωνίτη υπέρκειται του σχηματισμού των Χαιρεθιανών, ή ο τελευταίος είναι μερικές φορές το πλευρικό ισοδύναμο του σχηματισμού του Ταυρωνίτη. Σε αντίθετη περίπτωση ο σχηματισμός υποδεικνύει ένα τέλος της ρηχής θαλάσσιας ιζηματογένεσης (Freudenthal, 1969).

#### ➤ Σχηματισμός Ταυρωνίτη

Ο σχηματισμός Ταυρωνίτη αποτελείται από άμορφους έως μετρίως στρωματοποιημένους λευκούς ιλυόλιθους με λεπιοειδείς σχηματισμούς. Στα ανώτερα τμήματα παρατηρούνται σταδιακά κίτρινοι ψαμμίτες μετρίως στρωματοποιημένοι. Υπέρκειται κανονικά του σχηματισμού Χάτζι και θεωρείται το πλευρικό ισοδύναμο του σχηματισμού των Χαιρεθιανών. Ο σχηματισμός

του Ταυρωνίτη είναι δημιουργημένος κατά το Πλειόκαινο ενώ αυτός των Χαιρεθιανών κατά το Μεσσήνιο (Frydas, 1993).

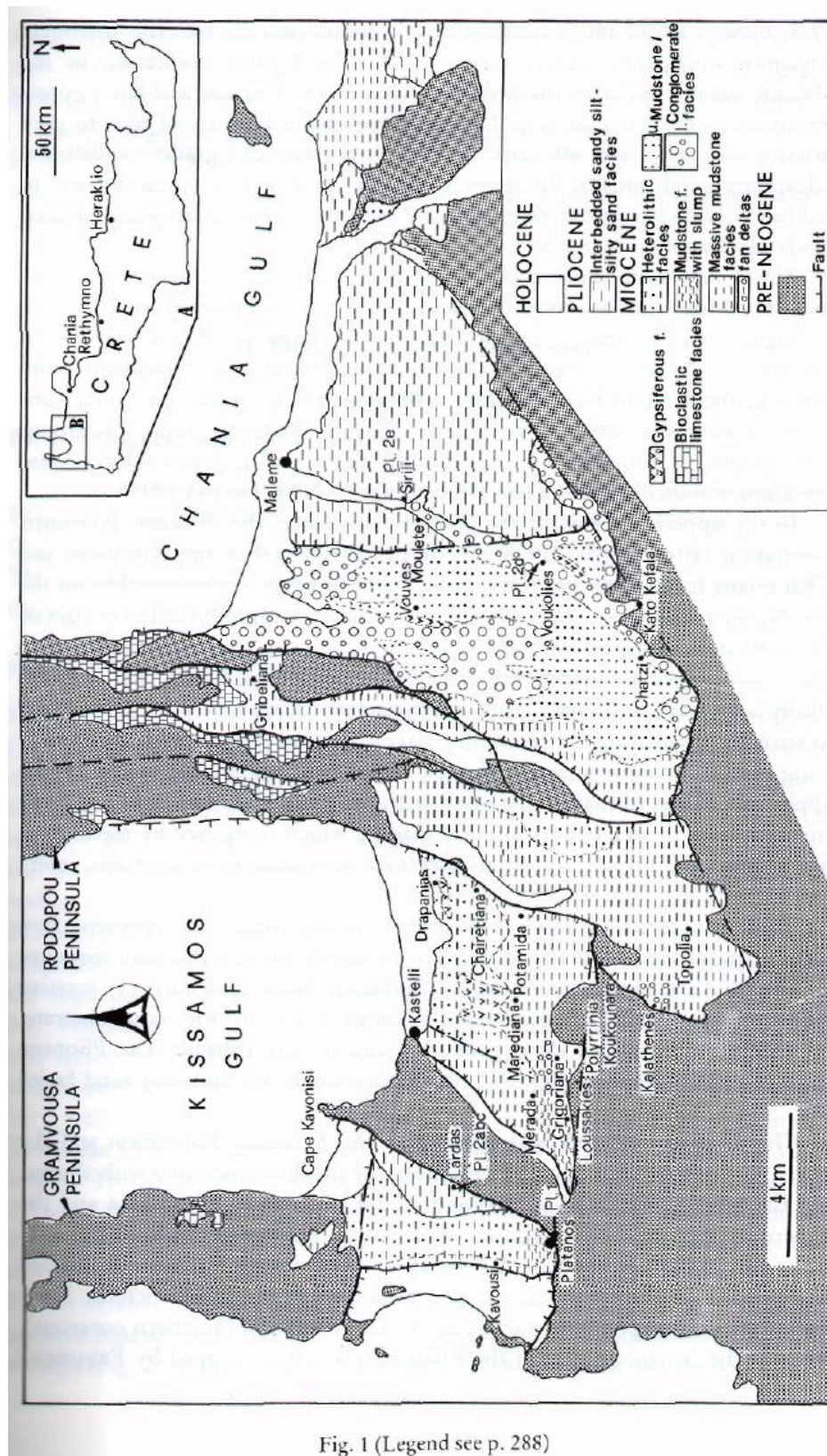


Fig. 1 (Legend see p. 288)

Σχήμα 34: Γεωλογικός Χάρτης των τριών Νεογενών λεκανών ιζηματογένεσης (Freudenthal, 1969).

## 4.2 Περιγραφή των προς μελέτη σπηλαίων

Στην ενότητα αυτή θα γίνει περιγράψουν πιο συγκεκριμένα τα γεωλογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά των προς μελέτη σπηλαίων, θα παρουσιαστούν χαρτογραφήσεις όσων εξ αυτών έχουν προς το παρόν πραγματοποιηθεί καθώς θα παρατεθούν πληροφορίες σχετικά με την ιστορική, παλαιοντολογική και αρχαιολογική τους σημασία, την τουριστική αξιοποίηση και την επισκεψιμότητα τους καθώς και την θρησκευτική τους χρήση.

Η απεικόνιση των σημείων εισόδου των σπηλαίων και σπηλαιοβαράθρων, στα οποίοι τοποθετήθηκαν οι μετρητές CR- 39, έγινε με τη χρήση του προγράμματος ArcGis 2010, αρχικά στον Γενικό Γεωλογικό Χάρτη Ελλάδος, Νήσος Κρήτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών υπό κλίμακα 1: 200.000 (Creutzburg, 1977), όπως παρατίθεται στην εικόνα 6-7, με σκοπό την αναγνώριση της λιθοστρωματογραφικής τους θέσης. Στην συνέχεια για την επιβεβαίωση της λιθοστρωματογραφίας για ορισμένα σπήλαια χρησιμοποιήθηκαν επίσης, τα γεωλογικά φύλλα χάρτου του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Έρευνών Αλικιανού, Βρυσσών, Καστελίου, Παλαιόχωρας, Πλατανιά, Ρεθύμνου και Χανίων, υπό κλίμακα 1:50.000, όπως αναπαριστούν οι εικόνες 31-37, στο παράρτημα, στο τέλος της εργασίας. Τέλος, για πιθανή συσχέτιση της αυξημένης συγκέντρωσης ραδονίου σε ορισμένα σπήλαια με την ύπαρξη ρηγμάτων, ενεργών ή μη, τα στίγματα των σπηλαίων του νομού Χανίων απεικονίστηκαν στον νεοτεκτονικό- γεωλογικό χάρτη της βόρειας ζώνης του νομού Χανίων Κρήτης υπό κλίμακα 1:50.000 (Μουντράκης και συν., 2002), της εικόνας 8-9.

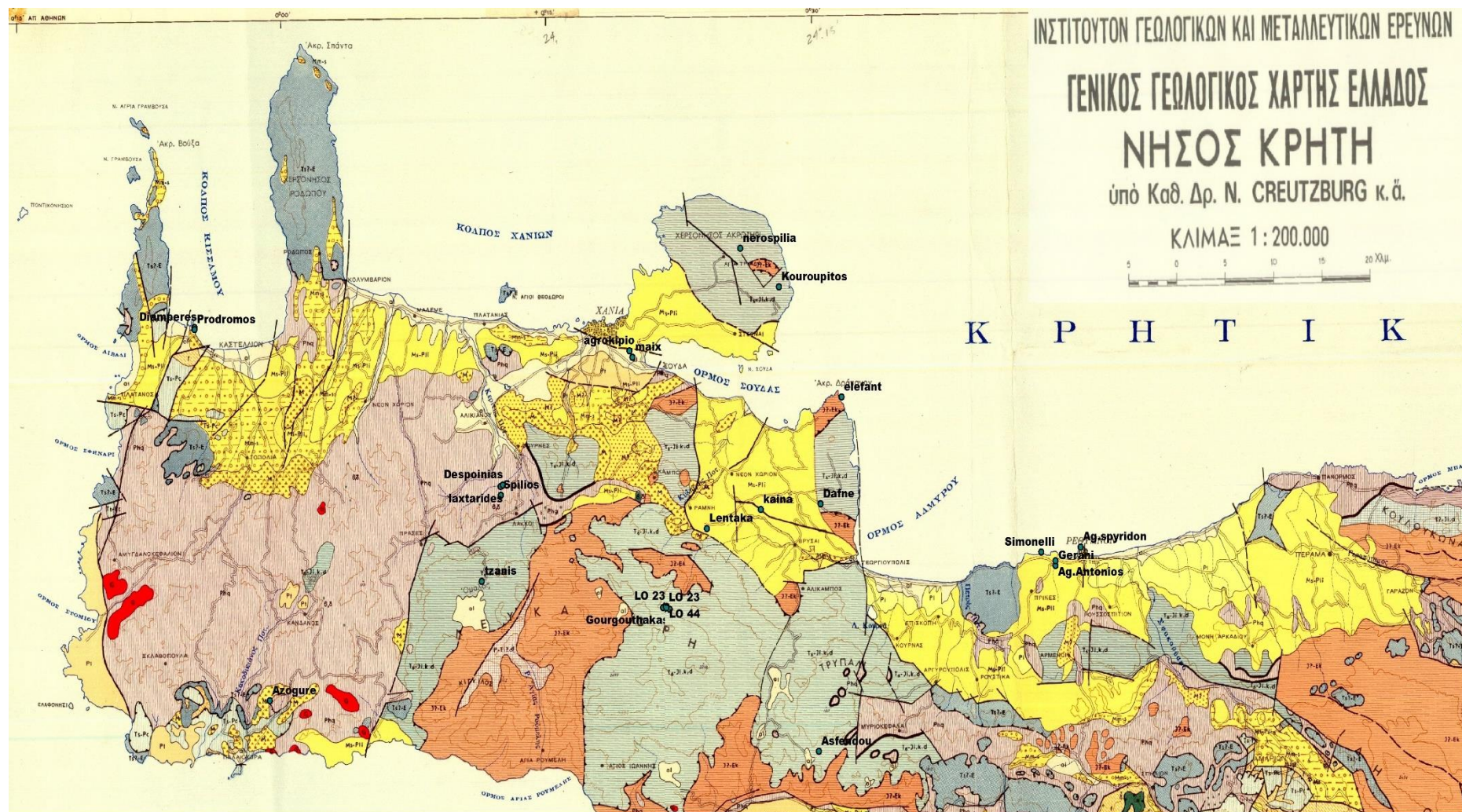
Για την είσοδο και τοποθέτηση των μετρητών στα συγκεκριμένα σπήλαια, ζητήθηκε και δόθηκε άδεια από την Εφορεία Παλαιοανθρωπολογίας και Σπηλαιολογίας, όπως αναφέρει η επιστολή που παρατίθεται στο παράρτημα.

Στον πίνακα 25, παρουσιάζονται τα ονόματα των σπηλαίων, η περιοχή και ο νομός που ανήκουν καθώς και το είδος του κάθε σπηλαίου. Ο χαρακτηρισμός που θα ακολουθήσει βασίζεται στην κατεύθυνση της κύριας ανάπτυξής τους. Αν δηλαδή το σπήλαιο αναπτύσσεται με οριζόντια κατεύθυνση κατά το μεγαλύτερο μέρος του, χαρακτηρίζεται ως οριζόντιο, ενώ αν η κατεύθυνση της κύριας ανάπτυξης του είναι κάθετη, τότε χαρακτηρίζεται ως σπηλαιοβάραθρο. Στον πίνακα 26, παρουσιάζονται τα στίγματα της εισόδου των σπηλαίων όπως λήφθηκαν κατά την διάρκεια των μετρήσεων από κοινό σύστημα ανίχνευσης προσδιορισμού συντεταγμένων με αποτέλεσμα η ακρίβειά των τιμών που αναφέρεται να εμπεριέχουν σφάλμα έως και 5 μέτρα. Στον πίνακα 27, παρουσιάζεται η

λιθοστρωματογραφική θέση του κάθε σπηλαίου, σύμφωνα τους γεωλογικούς χάρτες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως και την παρατήρησή τους στο πεδίο.

**Πίνακας 25:** Ονόματα των προς μελέτη σπηλαίων, περιοχή εμφάνισής τους και χαρακτηρισμός τους σύμφωνα με την διεύθυνση ανάπτυξής τους.

| <b>α/α</b> | <b>ΟΝΟΜΑ ΣΠΗΛΑΙΟΥ</b>         | <b>ΠΕΡΙΟΧΗ</b> | <b>ΝΟΜΟΣ</b> | <b>ΕΙΔΟΣ</b>   |
|------------|-------------------------------|----------------|--------------|----------------|
| <b>1</b>   | Σπήλαιο Ντάμιαλη              | Καστέλι        | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>2</b>   | Διαμπερές                     | Καστέλι        | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>3</b>   | Σπήλαιο στο ΜΑΙΧ              | Σούδα          | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>4</b>   | Σπήλαιο Αγροκήπιο             | Σούδα          | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>5</b>   | Σπήλαιο Λιθωμένης<br>Κοπελιάς | Καΐνα          | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>6</b>   | ΣΙΜΟΝΕΛΙ (Simonelli)          | Παράκτια       | Ρέθυμνο      | Οριζόντιο      |
| <b>7</b>   | Άγιος Αντώνιος                | Ατσιπόπουλο    | Ρέθυμνο      | Οριζόντιο      |
| <b>8</b>   | Άγιος Σπυρίδων Ιωάννης        | Κουμπές        | Ρέθυμνο      | Οριζόντιο      |
| <b>9</b>   | Σπήλαιο Γερανίου              | Γεράνι         | Ρέθυμνο      | Οριζόντιο      |
| <b>10</b>  | Τρύπα της Λεντάκα             | Μελιδόνι       | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>11</b>  | Σπήλαιο Αγίων 98 Πατέρων      | Παλαιόχωρα     | Χανιά        | Σπηλαιοβάραθρο |
| <b>12</b>  | Σπηλαιοβάραθρο του Τζανή      | Ομαλός         | Χανιά        | Σπηλαιοβάραθρο |
| <b>13</b>  | Νεροσπηλιά                    | Χορδάκι        | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>14</b>  | Σπήλαιο στον Κουρουπητό       | Κουρουπητός    | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>15</b>  | Σπήλαιο Λαχταριδέ             | Σκορδαλλού     | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>16</b>  | Της Δεσποινιάς ο σπήλιος      | Σκορδαλλού     | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>17</b>  | Σπήλιος                       | Σκορδαλλού     | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>18</b>  | Σπήλαιο Ελεφάντων             | Δράπανο        | Χανιά        | Υποθαλάσσιο    |
| <b>19</b>  | Σπήλαιο του Δαφνέ             | Λιτσάρδα       | Χανιά        | Σπηλαιοβάραθρο |
| <b>20</b>  | Σπήλαιο Ασφένδου              | Σκορδουλάκια   | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>21</b>  | Γουργούθακας                  | Λευκά Όρη      | Χανιά        | Σπηλαιοβάραθρο |
| <b>22</b>  | LO 1                          | Λευκά Όρη      | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>23</b>  | LO 44                         | Λευκά Όρη      | Χανιά        | Οριζόντιο      |
| <b>24</b>  | LO 23                         | Λευκά Όρη      | Χανιά        | Σπηλαιοβάραθρο |



**Εικόνα 6:** Γενικός Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδος, Νήσος Κρήτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών υπό κλίμακα 1: 200.000 και απεικόνιση των θέσεων των υπό μελέτη σπηλαίων (Creutzburg, 1977).

## QUATERNARY

14

POSTOROGENIC UPPER TERTIARY  
NEOGENE

[illegible]

### PREOROGENIC SEQUENCES

[illegible][illegible][illegible]

## EXPERIENTE PETROMATA

\* *Arctostaphylos* (v)  
"Olive bay" *Arctostaphylos* *laevis* Nutt.  
[partly, and possibly native.]

|                         |       |   |
|-------------------------|-------|---|
| Exposure (point) length | _____ | S |
| Pulse width             | _____ | F |
| Pulse rate              | _____ | F |

\_\_\_\_\_ 1

Textbook length \_\_\_\_\_ 1

ων

τικών ερ

## Μεταλλο

γικών κα

## του Γεωλ

Ενστίτοι

Κρήτη το

ς, Νήσοι

τη Ελλάδα

νικού Χά

ού Γεωλ

ημα γενι

## 7: Υπόμνημα

**Εικόν**  
104

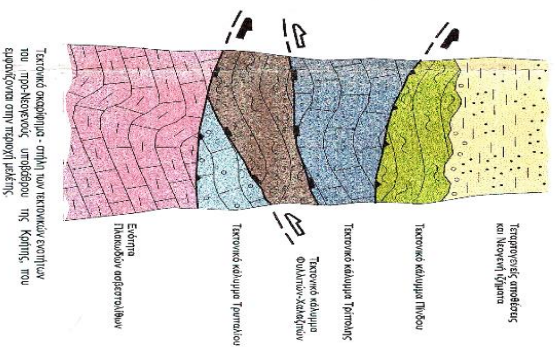
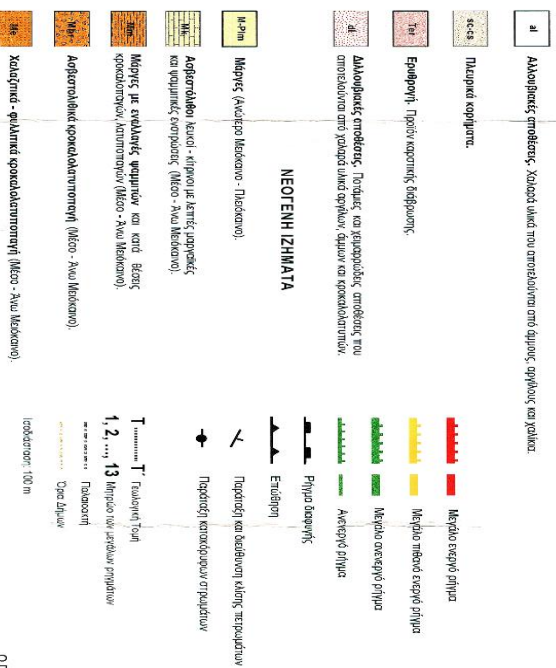
104



**Εικόνα 8:** Νεοτεκτονικός- γεωλογικός χάρτης της βόρειας ζώνης του νομού Χανίων Κρήτης υπό κλίμακα 1:50.000 και απεικόνιση των θέσεων των υπό μελέτη σπηλαίων (Μουντράκης και συν., 2002).

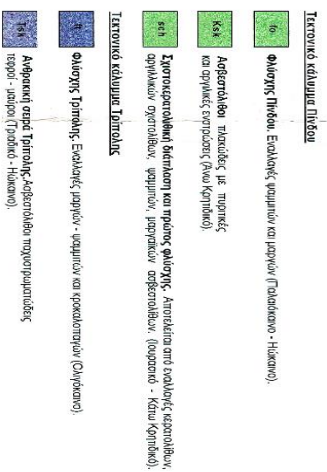
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

**TETAPTOFENEIS ANOΘEZEIS**



## ΠΡΟ-ΝΕΟΤΕΝΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

## Ανώτερες Τεκτονικές Ενότητες

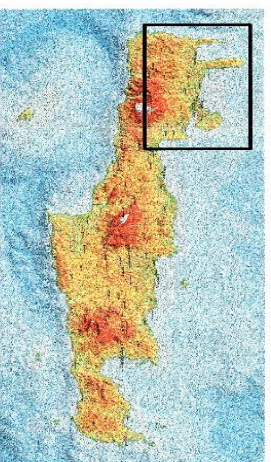


## Καλύτερες Τεκτονικές Ενότητες

## Τεκτονικό κάλυμμα Φυλλιδίων - Χαλαζιδίων



Ενότητα Πλακωδών Αρβεροειδών (Plattenkalk).

[illegible]

**Εικόνα 9:** Υπόμνημα Νεοτεκτονικού - γεωλογικού χάρτη της βόρειας ζώνης του νομού Χανίων Κρήτης (Μουντράκης και συν., 2002).

**Πίνακας 26:** Γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος της εισόδου των προς μελέτη σπηλαίων και σπηλαιοβαράθρων.

| <b>α/α</b> | <b>ΟΝΟΜΑ ΣΠΗΛΑΙΟΥ</b>         | <b>φ</b>     | <b>λ</b>     |
|------------|-------------------------------|--------------|--------------|
| <b>1</b>   | Σπήλαιο Ντάμιαλη              | 35°32'41.08" | 23°38'14.06" |
| <b>2</b>   | Διαμπερές                     | 35°30'46.62" | 23°38'13.63" |
| <b>3</b>   | Σπήλαιο στο ΜΑΙΧ              | 35°29'39.30" | 24° 2'56.51" |
| <b>4</b>   | Σπήλαιο Αγροκήπιο             | 35°29'54.13" | 24° 2'46.36" |
| <b>5</b>   | Σπήλαιο Λιθωμένης<br>Κοπελιάς | 35°24'41.85" | 23°55'38.46" |
| <b>6</b>   | ΣΙΜΟΝΕΛΙ (Simonelli)          | 35°22'6.10"  | 24°25'56.09" |
| <b>7</b>   | Άγιος Αντώνιος                | 35°21'45.30" | 24°26'44.23" |
| <b>8</b>   | Άγιος Σπυρίδων Ιωάννης        | 35°22'17.7"  | 24°28'08.9"  |
| <b>9</b>   | Σπήλαιο Γερανίου              | 35°22'17.7"  | 24°28'08.9"  |
| <b>10</b>  | Τρύπα της Λεντάκα             | 35°20'1.84"  | 24° 4'49.72" |
| <b>11</b>  | Σπήλαιο Αγίων 98 Πατέρων      | 35°16'18.19" | 23°42'32.00" |
| <b>12</b>  | Σπηλαιοβάραθρο του Τζανή      | 35°20'57.62" | 23°54'27.32" |
| <b>13</b>  | Νεροσπηλιά                    | 35°24'38.05" | 23°55'30.04" |
| <b>14</b>  | Σπήλαιο στον Κουρουπητό       | 35°33'55.98" | 24°9'0.04"   |
| <b>15</b>  | Σπήλαιο Λαχταριδέ             | 35°32'25.73" | 24°11'10.86" |
| <b>16</b>  | Της Δεσποινιάς ο σπήλιος      | 35°24'32.48" | 23°55'32.56" |
| <b>17</b>  | Σπήλιος                       | 35°24'17.92" | 23°55'31.30" |
| <b>18</b>  | Σπήλαιο Ελεφάντων             | 35°28'9.18"  | 24°14'41.70" |
| <b>19</b>  | Σπήλαιο του Δαφνέ             | 35°19'55.74" | 24° 5'0.42"  |
| <b>20</b>  | Σπήλαιο Ασφένδου              | 35°19'55.99" | 24° 4'40.37" |
| <b>21</b>  | Γουργούθακας                  | 35°19'58.91" | 24° 4'49.12" |
| <b>22</b>  | LO 1                          | 35°24'0.32"  | 23°13'30.94" |
| <b>23</b>  | LO 44                         | 35°14'23.53" | 24°13'24.67" |
| <b>24</b>  | LO 23                         | 35°23'3.55"  | 24°7'5.88"   |

**Πίνακας 27:** Ταξινόμηση σπηλαίων σύμφωνα με την λιθοστρωματογραφική τους θέση.

| <b>α/α</b> | <b>ΟΝΟΜΑ ΣΠΗΛΑΙΟΥ</b>      | <b>ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΟΣ<br/>ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ</b>    |
|------------|----------------------------|------------------------------------------------|
| <b>1</b>   | Σπήλαιο Ντάμιαλη           | Εντός των Νεογενών<br>Τεταρτογενών Σχηματισμών |
| <b>2</b>   | Διαμπερές                  |                                                |
| <b>3</b>   | Σπήλαιο στο ΜΑΙΧ           |                                                |
| <b>4</b>   | Σπήλαιο Αγροκήπιο          |                                                |
| <b>5</b>   | Σπήλαιο Λιθωμένης Κοπελιάς |                                                |
| <b>6</b>   | ΣΙΜΟΝΕΛΙ (Simonelli)       |                                                |
| <b>7</b>   | Άγιος Αντώνιος             |                                                |
| <b>8</b>   | Άγιος Σπυρίδων Ιωάννης     |                                                |
| <b>9</b>   | Σπήλαιο Γερανίου           |                                                |
| <b>10</b>  | Σπήλαιο Λεντάκα            |                                                |
| <b>11</b>  | Σπήλαιο Αγίων 98 Πατέρων   | Ζώνη Τρίπολης                                  |
| <b>12</b>  | Σπηλαιοβάραθρο του Τζανή   |                                                |
| <b>13</b>  | Νεροσπηλιά                 | Ενότητα Τρυπαλίου                              |
| <b>14</b>  | Σπήλαιο στον Κουρουπητό    |                                                |
| <b>15</b>  | Σπήλαιο Λαχταριδέ          |                                                |
| <b>16</b>  | Της Δεσποινιάς ο σπήλιος   |                                                |
| <b>17</b>  | Σπήλιος                    |                                                |
| <b>18</b>  | Σπήλαιο Ελεφάντων          |                                                |
| <b>19</b>  | Σπήλαιο του Δαφνέ          | Ομάδα Πλακωδών Ασβεστολίθων                    |
| <b>20</b>  | Σπήλαιο Ασφένδου           |                                                |
| <b>21</b>  | Γουργούθακας               |                                                |
| <b>22</b>  | LO 1                       |                                                |
| <b>23</b>  | LO 44                      |                                                |
| <b>24</b>  | LO 23                      |                                                |

### 1) Σπήλαιο Ντάμιαλης στο Καστέλι, Κισσάμου, Χανίων

Δυτικά της πόλης Κισάμου (Καστέλι) του νομού Χανίων, κατά μήκος του παραλιακού δρόμου που οδηγεί στο λιμάνι του Καβονησίου, αναπτύσσεται μια σειρά από βραχοσκεπές. Στο εσωτερικό μίας από τις μεγαλύτερες βραχοσκεπές που έχει σχηματιστεί κατά μήκος του παραλιακού αυτού δρόμου, βρίσκεται το εκκλησάκι του Αγίου Ιωάννη του Πρόδρομού αποτελώντας για χρόνια πόλο έλξης ως χώρος θρησκευτικής λατρείας, εμφανίζοντας έτσι συχνή επισκεψιμότητα. Το όνομα «Ντάμιαλη» προέρχεται από την ντάμια του Αλή δηλαδή τον στάβλο του Αλή. Στο εσωτερικό του παρατηρείται έντονη σταγονορροή. Στην περιοχή αυτή σύμφωνα με τον Νεοτεκτονικό- Γεωλογικό χάρτη της βόρειας ζώνης του νομού Χανίων (Μουντράκης και συν., 2002), όπως παρουσιάζεται προηγουμένως, υπάρχει μεγάλο ενεργό ρήγμα. Το σπήλαιο αναπτύσσεται εντός ανθρακικών αποθέσεων του Τεταρτογενούς.

### 2) Διαμπερές σπήλαιο στο Καστέλι, Κισσάμου, Ν.Χανίων

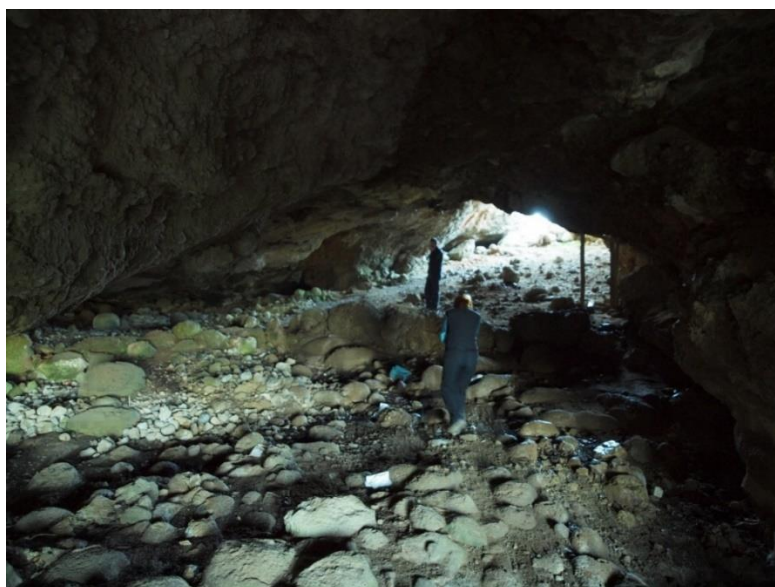
Κατά μήκος του ίδιου παραλιακού δρόμου που οδηγεί στο λιμάνι του Καβονησίου, αναπτύσσεται μια ακόμα βραχοσκεπή όπως απεικονίζει η παρακάτω φωτογραφία. Για την οποία προς το παρόν δεν υπάρχουν βιβλιογραφικά δεδομένα. Στην περιοχή αυτή σύμφωνα με τον Νεοτεκτονικό- Γεωλογικό χάρτη της βόρειας ζώνης του νομού Χανίων (Μουντράκης και συν., 2002), όπως παρουσιάζεται προηγουμένως, υπάρχει μεγάλο ενεργό ρήγμα. Το σπήλαιο αναπτύσσεται εντός ανθρακικών αποθέσεων του Τεταρτογενούς.



**Εικόνα 10:** Εκκλησάκι Αγίου Προδρόμου Ιωάννη – σπήλαιο Ντάμιαλης, στο Καστέλι, Χανίων.



**Εικόνα 11:** Η θέση του σπηλαίου Ντάμιαλη σε σχηματισμούς της ζώνης της Πίνδου στην περιοχή (φωτογραφία: Εμ. Μανούτσογλου).



**Εικόνα 12:** Διαμπερές σπήλαιο στο Καστέλι, Κισσάμου, νομός Χανίων.

### **3) Σπήλαιο στο Μ.Α.Ι.Χ στην Σούδα, Χανίων**

Το μικρό αυτό οριζόντιο σπήλαιο βρίσκεται εντός των εγκαταστάσεων του Μεσογειακού Αγρονομικού Ινστιτούτου Χανίων (Μ.Α.Ι.Χ), 2 χιλιόμετρα μακριά από το λιμάνι της Σούδας, με μικρό άνοιγμα εισόδου. Η απουσία σταγονορροής αιτιολογεί την απουσία σπηλαιολογίας καθώς η δημιουργία του ωφελείται σε ρήγμα, ανενεργό σύμφωνα με τον

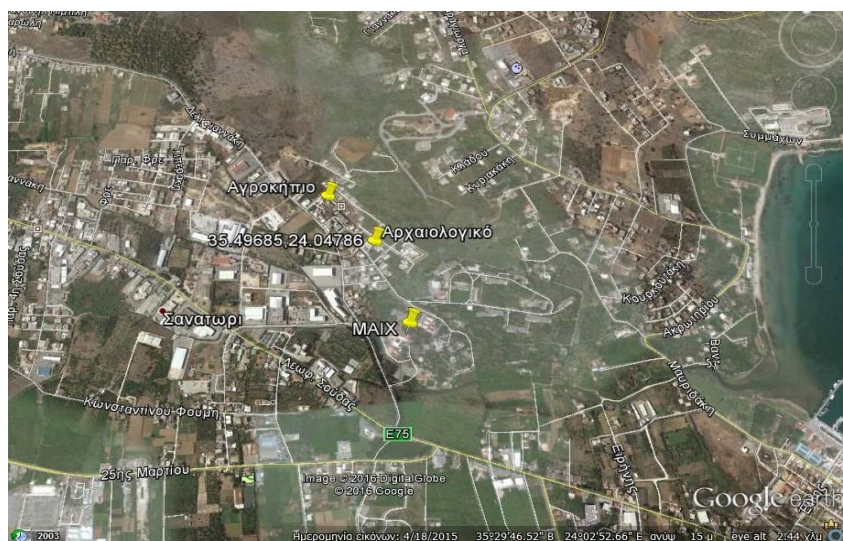
Νεοτεκτονικό- Γεωλογικό χάρτη της βόρειας ζώνης του νομού Χανίων (Μουντράκης και συν., 2002). Το σπήλαιο αναπτύσσεται εντός των ανθρακικών σχηματισμών του Νεογενούς.



**Εικόνα 13:** Είσοδος σπηλαίου Μ.Α.Ι.Χ. στην Σούδα, Χανίων (φωτογραφία: Gilbert Medawar).

#### **4) Σπήλαιο Αγροκήπιο στην Σούδα, Χανίων**

Λίγα μέτρα παρακάτω από τις εγκαταστάσεις του Μ.Α.Ι.Χ κατά μήκος του ίδιου ρήγματος έχει δημιουργηθεί ένα μεγαλύτερο οριζόντιο σπήλαιο, μικρής εισόδου, εντός κατοικημένης περιοχής και κάτω από ένα αγροκήπιο στην ύπαρξη του οποίου οφείλει το όνομά του. Κατά την ανάπτυξη του ίδιου ρήγματος έχει δημιουργηθεί και τρίτο σπήλαιο, αρχαιολογικής σημασίας που προστατεύεται από την αρχαιολογία. Τα σπήλαια αυτά αναπτύσσονται εντός των ανθρακικών σχηματισμών του Νεογενούς. Τα στίγματα των εισόδων τους απεικονίζονται στην παρακάτω αεροφωτογραφία.



**Εικόνα 14:** Αεροφωτογραφία απεικόνισης στίγματος εισόδου σπηλαίων στην Σούδα.

## 5) Σπήλαιο Λιθωμένης κοπελιάς στην Κάϊνα, Αποκορώνου, Χανίων

Το σπήλαιο της «Λιθωμένης κοπελιάς» είναι οριζόντιας ανάπτυξης και βρίσκεται στην περιοχή Κάϊνα, του Δήμου Αποκορώνου, στο νομό Χανίων. Το σπήλαιο αυτό θεωρούσαν οι θεοί ιερό, γεγονός που κατά την παράδοση δεν σεβάστηκε μια νεαρή κοπελιά στην προσπάθεια της να βρει την χαμένη αγελάδα της και τους μετέτρεψαν σε πέτρα, χαρακτηριστικό σταλαγμίτη που παρατηρεί κανείς στο εσωτερικό της μοναδικής αίθουσας του σπηλαίου. Την λατρευτική χρήση του σπηλαίου επαληθεύουν κομμάτια κεραμικών αγγείων που έχουν βρεθεί στο εσωτερικό του. Η μικρή είσοδος του σπηλαίου βρίσκεται πολύ κοντά σε ερείπια μινωικού οικισμού, όπου όστρακα κεραμικών και αρχαία δείγματα τοιχοποιίας σε συνδυασμό με μαρτυρίες ερευνητών υποστηρίζουν ότι τα ερείπια αυτά αποτελούν την αρχαία πόλη Καϊνών από όπου με παραφθορά της λέξης βγαίνει το σημερινό όνομα του χωριού Κάϊνα (Πλατάκης, 1962). Το σπήλαιο αναπτύσσεται εντός των ανθρακικών σχηματισμών του Νεογενούς.



**Εικόνα 15:** Είσοδος σπηλαίου «Λιθωμένης κοπελιάς» στην Κάϊνα, Αποκορώνου, Χανίων (φωτογραφία: Μαζωνάκης Γιώργος).

## 6) Σπήλαιο Σιμονέλι (Simonelli) στις παράκτιες περιοχές δυτικά της πόλης Ρεθύμνου

Το σπήλαιο «Σιμονέλι» συναντά κανείς στον παράκτιο δρόμο κάτω από την εθνική Χανίων - Ρεθύμνου. Οφείλει το όνομα του στο γεωλόγο Simonelli, ο οποίος ηγήθηκε ερευνητικής αποστολής, το 1893 και μαζί με άλλους επιστήμονες εξερεύνησαν την Κρήτη. Το σπήλαιο αυτό αποτελείται από τρεις μικρές αίθουσες οι δύο πρώτες με διάκοσμο. Το Πανεπιστήμιο της Ρώμης σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Θεσσαλονίκης (καθηγητές Παλαιοντολογίας Μαλατέστα και Μελέντης αντίστοιχα) πραγματοποίησαν, το 1971, την πρώτη και μοναδική ανασκαφή μέχρι σήμερα στο συγκεκριμένο σπήλαιο. Η ανασκαφή έγινε στην πρώτη αίθουσα με το μεγάλο άνοιγμα εισόδου και έφθασε μέχρι το 1 έως 1,5 μέτρο βάθος κάτω από δάπεδο του σπηλαίου. Έχουν βρεθεί απολιθώματα από νάνους ενδημικούς ελέφαντες και νάνο ελάφια, όπως οστά από *Elephas creutzburgi* (Poulakakis et al., 2002) και κρητικό ελάφι (Palombo and Zedda, 2016). Αυτό και άλλα παράκτια σπήλαια που βρίσκονται κατά μήκος της ίδιας ακτογραμμής στα δυτικά της πόλης του Ρεθύμνου, αναπτύσσονται εντός των Μειοκαινικών ιζημάτων του Νεογενούς, ενώ μερικές φορές διανοίγονται στο όριο μεταξύ μεσοζωικών ασβεστολίθων και υπερκείμενων σχηματισμών του Νεογενούς.



**Εικόνα 16:** Είσοδος σπηλαίου Σιμονέλι στα παράκτια του νομού Ρεθύμνης (φωτογραφία: Παντελιάς Αντώνιος).

### 7) Σπήλαιο Αγίου Αντωνίου στο Ατσιπόπουλο Ρεθύμνου

Στον κόμβο Ατσιπόπουλου του νομού Ρεθύμνου βρίσκεται το εκκλησάκι του Αγίου Αντωνίου χτισμένο στα τοιχώματα μικρού σπηλαίου, πλάτους 5 μέτρων και ύψους 3,5 μέτρων. Για το σπήλαιο αυτό έχουν γίνει αναφορές από τους Paul Faure το 1954 και τον Πλατάκη Ελευθέριο το 1961 και το 1970, στα αντίστοιχα Δελτία της Ελληνικής σπηλαιολογικής εταιρείας. Το σπήλαιο αυτό αναπτύσσεται εντός των Μειοκαινικών ιζημάτων του Νεογενούς.



Εικόνα 17: Σπήλαιο και εκκλησάκι Αγίου Αντωνίου στο Ατσιπόπουλο, Ρεθύμνου.

### 8) Σπήλαιο Αγίου Σπυρίδωνα, Κουμπέ, Ρεθύμνου

Πρόκειται για σπηλαιώδη και μερικώς υπόσκαφο ναό με δύο κλίτη αφιερωμένα το βόρειο στον Άγιο Ιωάννη το Θεολόγο και το νότιο στον Άγιο Σπυρίδωνα. Ανοίγεται σε υψόμετρο περίπου 15 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας και περί τα 12 μέτρα από την ερυθρά του δρόμου στην περιοχή Κουμπέ, Ρεθύμνου. Το σπήλαιο εμφανίζεται στην είσοδο του βραχοσκεπές στα ανατολικά, ενώ έχουν γίνει διαμορφώσεις και υποσκαφές στα δυτικά βραχώδη τμήματα, προκειμένου να δημιουργηθεί ένας στεγασμένος χώρος. Στο κέντρο του νότιου κλίτους συνεχίζεται η σπηλαιώση με μικρή κατηφορική αίθουσα-διάδρομο που οδηγεί σε μια μεγαλύτερη και υψομετρικά χαμηλότερη αίθουσα πληρωμένη από ιζήματα (τεταρτογενείς αποθέσεις με απολιθώματα θηλαστικών). Έχει έντονη σταγονορροή, σχετικά φτωχό διάκοσμο με κυρίως σταλαγμίτες και μικρές κολώνες. Για το σπήλαιο αυτό έχουν γίνει αναφορές από τους Paul Faure το 1954 και τον Πλατάκη Ελευθέριο το 1961 και το 1970, στα αντίστοιχα Δελτία της Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας. Επίσης, στα πλαίσια του 4<sup>ου</sup> Παγκρήτιου Σπηλαιολογικού Συμποσίου στα Ζωνιανά από τους Σιμιτζή Βασίλη και Αρετάκη

Κωνσταντίνα, το 2008. Το σπήλαιο αυτό αναπτύσσεται εντός των Μειοκαινικών ιζημάτων του Νεογενούς.

### 9) Σπήλαιο Γερανίου στο Γεράνι, Ρεθύμνου

Το σπήλαιο Γερανίου βρίσκεται 7 χιλιόμετρα δυτικά του Ρεθύμνου, στη βόρεια ακτή της Κρήτης, στην περιοχή Κυανή Ακτή, σε υψόμετρο 23 μέτρων. Το σπήλαιο ανακαλύφθηκε τυχαία το 1969 κατά τη διάρκεια κατασκευής της νέας εθνικής οδού. Η σημερινή είσοδος του δεν είναι η αρχική, αλλά ανοίχθηκε από τα εκρηκτικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη διάνοιξη της οδού. Η αρχική είσοδος εντοπίστηκε κατά τη διάρκεια της ανασκαφής. Επειδή το σπήλαιο ήταν σφραγισμένο, η στρωματογραφία της πρώιμης Νεολιθικής II, της μέσης Νεολιθικής και της ύστερης Νεολιθικής περιόδου ήταν εξαιρετική. Η έκταση που καλύπτει το σπήλαιο είναι 1200 τ.μ. και έχει χωριστεί σε έξι θαλάμους. Οι πέντε θάλαμοι είναι διαδοχικοί κατά μήκος και χωρίζονται από μεγάλους σταλακτίτες και σταλαγμίτες, ενώ ο έκτος θάλαμος είναι παράλληλος του πρώτου προς τα αριστερά. Στο σπήλαιο παρατηρείται μέγιστο πλάτος 17 μέτρα, ύψος 5 μέτρα και μήκος 50 μέτρα. Στο σπήλαιο αυτό έχουν αναφερθεί οι ερευνητές P. Faure και Πλατάκης Ε. όπως αναφέρει στο σχετικό Δ.Ε.Σ.Ε, το 1969, ο Χρήστος Μακρής καθώς και η πρωτοπόρος σπηλαιολόγος Α. Πετροχείλου, το 1980. Κατά την ανασκαφή βρέθηκαν εστίες κι από τις τρεις περιόδους, που περιβάλλονταν από αγγεία, εργαλεία και οστά ζώων. Επίσης βρέθηκαν ανθρώπινοι σκελετοί και άφθονα όστρακα (Palombo and Zedda, 2016). Το σπήλαιο αυτό με τη μικρή είσοδο, είχε χρησιμοποιηθεί ως κατοικία μόνο σποραδικά κατά τη διάρκεια του έτους, πιθανώς σε συνδυασμό με την καλλιέργεια, την κτηνοτροφία και ίσως την αλιεία. Το σπήλαιο αναπτύσσεται εντός των Μειοκαινικών σχηματισμών του Νεογενούς.



**Εικόνα 18:** Είσοδος σπηλαιού Γερανίου στο Γεράνι, Χανίων (Φωτογραφία: Παντελιάς Αντώνιος).



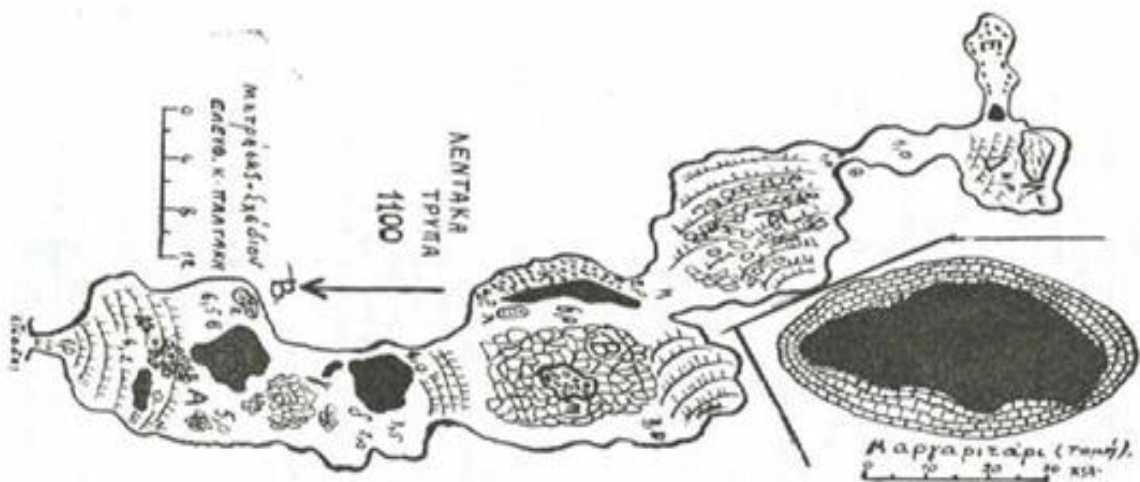
**Σχήμα 35:** Κάτοψη σπηλαίου Γερανίου, Ρεθύμνου (Πετροχείλου, 1980).

### 10) Σπήλαιο Τρύπα της Λεντάκα στο Μελιδόνι, Αποκορώνου, Χανίων

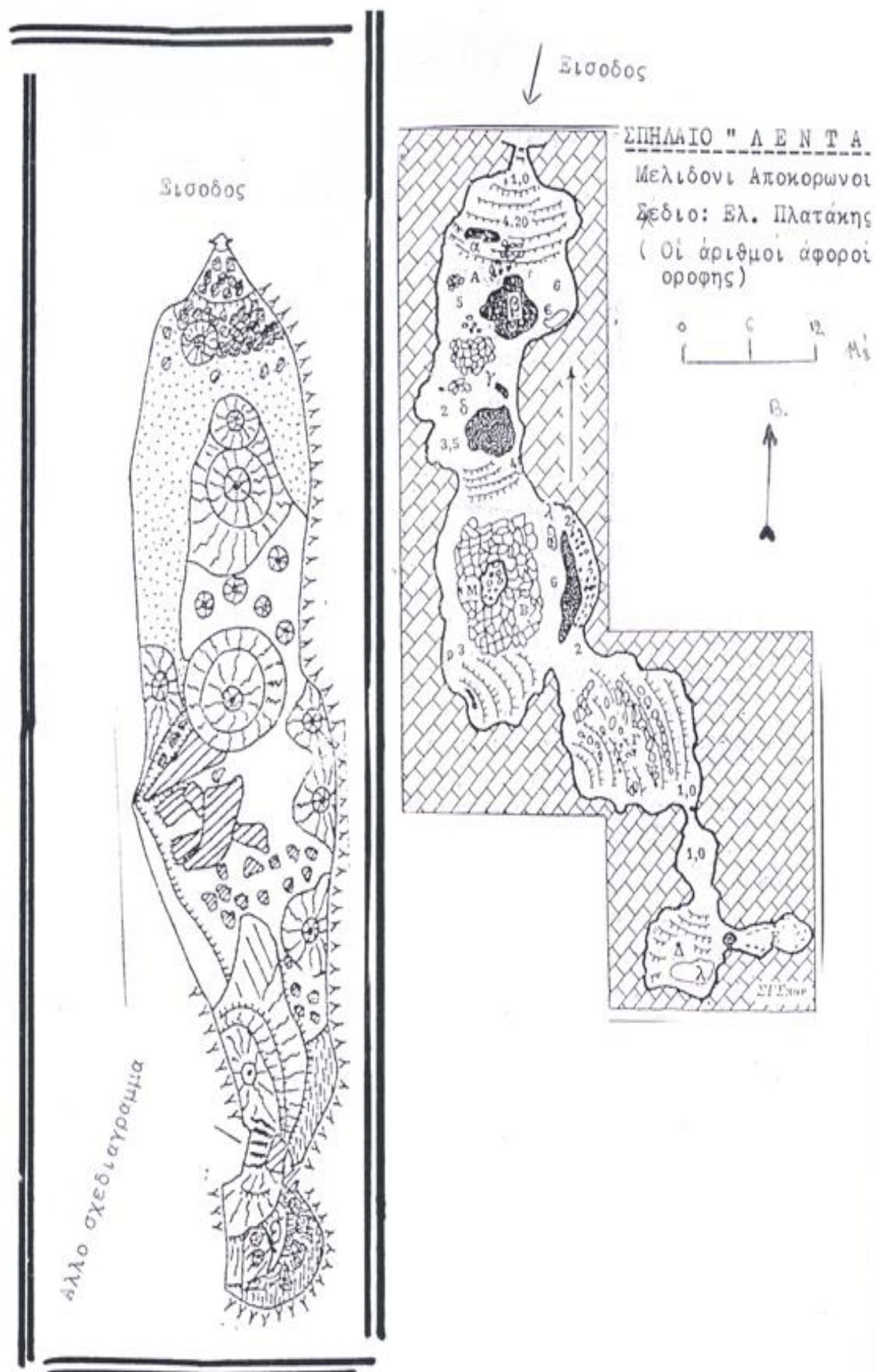
Το οριζόντιο σπήλαιο «Τρύπα της Λεντάκα» στο Μελιδόνι, Αποκορώνου στο νομό Χανίων βρίσκεται σε υψόμετρο 370 μέτρα (Πλατάκης, 1970). Η είσοδος του στενή ενώ η κάθοδος στο εσωτερικό του πραγματοποιείται με μια αρκετά κατηφορική διαδρομή καλυμμένη από πολλές πέτρες, που καταλήγει σε μια μεγάλη αίθουσα μήκους 60 μέτρων περίπου και πλάτους 15 μέτρων, το ύψος σε ορισμένα σημεία φτάνει ακόμα και τα 10 μέτρα (Πλατάκης, 1963). Το σπήλαιο αυτό παρουσιάζει έντονο διάκοσμο ενώ αποτέλεσε καταφύγιο κατά την περίοδο της Γερμανικής κατοχής. Επίσης στο εσωτερικό του εντοπίστηκαν όστρακα αγγείων της Υστερομινωικής, Κλασσικής και Ρωμαϊκής περιόδου. Εξερευνήθηκε και χαρτογραφήθηκε από την Ε.Σ.Ε (Ελ. Πλατάκη) και την Σπηλαιολογική Ομάδα Χανίων (Πλυμάκης, 2002). Το σπήλαιο αναπτύσσεται εντός των Μειοκαινικών ιζημάτων του Νεογενούς.



**Εικόνα 19:** Είσοδος Σπηλαίου Τρύπα της Λεντάκα στο Μελιδόνι, Αποκορώνου, Χανίων (Φωτογραφία: Χριστόφορος Χειλαδάκης).



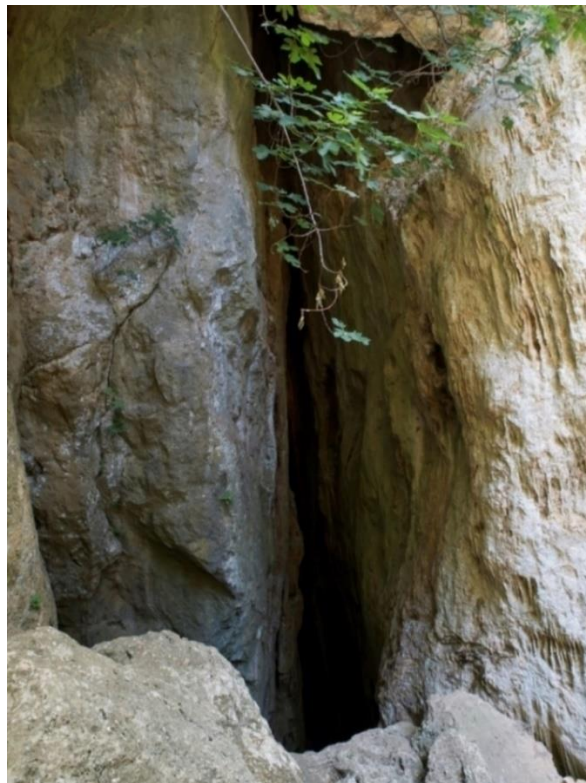
**Σχήμα 36:** Χαρτογράφηση σπηλαίου Λεντάκα, Λιτσάρδα, Χανίων (Πλατάκης, 1963).



Σχήμα 37: Χαρτογράφηση σπηλαίου Λεντάκα, Λιτσάρδα, Χανίων (Πλυμάκης, 2002).

### **11) Το σπήλαιοβάραθρο Ζουρές ή των Αγίων 98 Πατέρων στον Αζογυρέ, Σελίνου, Χανίων**

Το σπηλαιοβάραθρο του «Ζουρέ» είναι από τα σπουδαιότερα θρησκευτικά σπήλαια του νομού Χανίων, σε υψόμετρο 535 μέτρων στον Αζογυρέ Σελίνου, όπου αγροτικός δρόμος φτάνει κοντά στην διπλή του είσοδο με το χαρακτηριστικό στενό κυκλικό βαθούλωμα ανάμεσα σε βράχους, όπως παρουσιάζει η παρακάτω φωτογραφία. Το όνομά του πήρε από τους 98 Άγιους Πατέρες που μόνασαν σε αυτό το 16<sup>ο</sup> αιώνα, εικονοστάσι προς τιμήν των οποίων βρίσκεται στην πρώτη μεγάλη αίθουσα και στο τέλος της διαδρομής του σπηλαίου (Πλυμάκης, 2002). Το σπηλαιοβάραθρο παρουσιάζει μέγιστο βάθος 25 μέτρα και μήκος 95 μέτρα. Με το σπήλαιο αυτό έχουν ασχοληθεί ο P.Faure (1964) και Ε. Πλατάκης (1962) και Ι.Ιωάννου (1970). Το σπήλαιο αυτό αναπτύσσεται εντός της ζώνης της Τρίπολης.



**Εικόνα 20:** Είσοδος σπηλαίου Ζουρές ή των Αγίων 98 Πατέρων στον Αζογυρέ, Σελίνου, Χανίων (φωτογραφία: Μαζωνάκης Γιώργος).

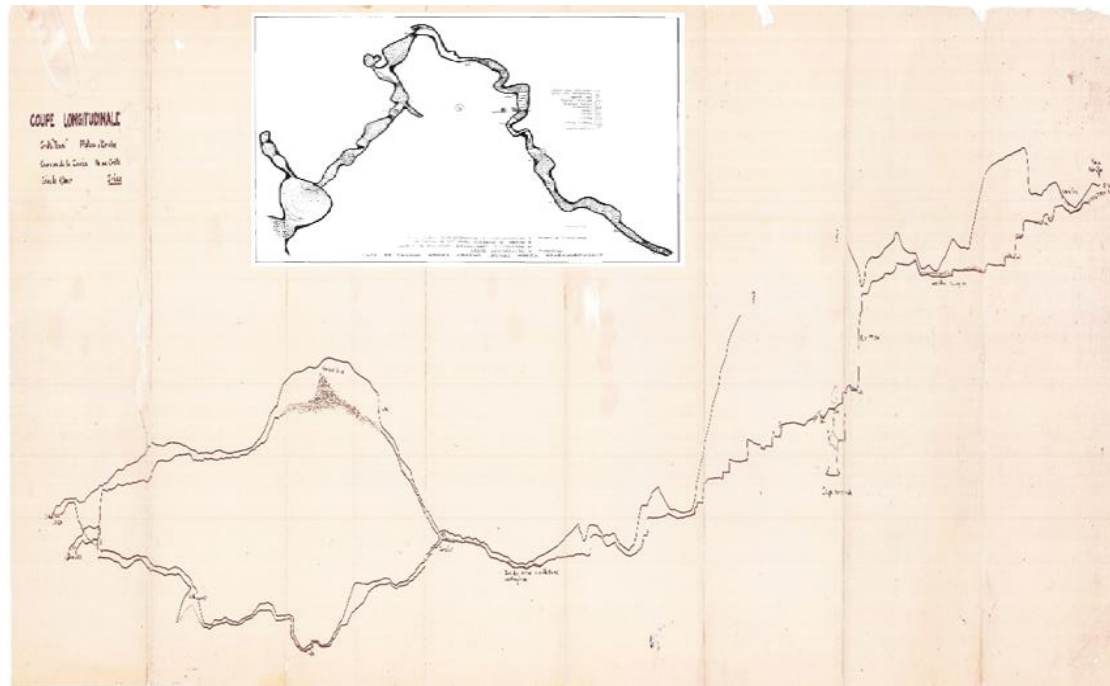
### **12) Του Τζανή ο Σπήλιος στο οροπέδιο του Ομαλού, Χανίων**

Στο οροπέδιο του Ομαλού του νομού Χανίων, εκτός από την είσοδο του Εθνικού Δρυμού της Σαμαριάς, βρίσκεται και ένα από τα μεγαλύτερα σε μήκος σπηλαιοβάραθρα της Ελλάδας σε υψόμετρο 1040 μέτρων, με μεσαίου μεγέθους είσοδο. Ο σπήλιος του Τζανή ή διαφορετικά Χώνος, μήκους 3 χλμ. περίπου και βάθους 281 μέτρων, υπήρξε καταφύγιο για κυνηγημένους,

αλλά και τόπος γέννησης πολλών θρύλων και μύθων όπως αυτός του δεξιοτέχνη λυράρη Τζανή, που οι νεράιδες τον παρέσυραν στα βάθη του. Το όνομά του, ωστόσο το πήρε από τον οπλαρχηγό Μάρκο Τζανή, που κατέφυγε σε αυτό και χάθηκε στα βάθη του, διωκόμενος από τους εχθρούς του. Το σπηλαιοβάραθρο αυτό αποτελείται από ένα οριζόντιο τμήμα μήκους και στην συνέχεια ακολουθούν καταβάσεις με χρήση σχοινιών και γνώσεις κάθετης σπηλαιολογίας έως το βάθος 70 μέτρων που έχει σχηματιστεί φυσικό σιφόνι, που τους περισσότερους μήνες είναι πληρωμένο με νερό καθιστώντας εφικτή την προσπέλασή του μόνο από εκπαιδευμένους σπηλαιοδύτες. Τους καλοκαιρινούς μήνες που η στάθμη του νερού κατεβαίνει, κολυμπώντας μπορεί κανείς να εισέλθει και να συνεχίσει την διαδρομή του καταρριγόμενος για περίπου άλλα 100 μέτρα που είναι το τωρινό βαθύτερο εξερευνημένο σημείο. Χαρακτηρίζεται από μεγάλο ποσοστό υγρασίας και χαμηλή θερμοκρασία αέρα. Το σπήλαιο αυτό έχει τραβήξει το ενδιαφέρον Ελλήνων αλλά και ξένων σπηλαιολογικών συλλόγων, καθώς κάθε χρόνο επισκέπτονται περισσότεροι από αρκετοί σπηλαιολόγοι με σκοπό την ολοκλήρωση της εξερεύνησης και χαρτογράφησης του. Γαλλική αποστολή στο παρελθόν έχει δημιουργήσει την παρακάτω χαρτογράφηση (Πετροχείλου, 1976; Dermitzakis and Papadopoulou, 1977; Πλυμάκης, 2002). Το σπηλαιοβάραθρο αυτό ανήκει στην ενότητα Τρυπαλίου.



**Εικόνα 21:** Είσοδος σπηλαιοβάραθρου του Τζανή, Ομαλός, Χανίων (Φωτογραφία: Μπαλαδήμας Χριστόφορος).



**Εικόνα 22:** Χαρτογραφήσεις σπηλαιοβάραθρου «του Τζανή η τρύπα» στον Ομαλό, Χανίων (Πλυμάκης, 2002; Πετροχείλου, 1976).

### 13) Σπήλαιο Νεροσπηλιά στο Σαμόλι, Χορδάκι, Χανίων

Το σπήλαιο αυτό βρίσκεται βόρεια του σπηλαίου Λερά. Ο Πωλ Φωρ ισχυρίζεται ότι διαπίστωσε πάνω σε τεμάχιο πίθου ή μεγάλου αμφορέα γραμμική γραφή Β'. Αποτελείται από μία κύρια μεγάλη αίθουσα με χαρακτηριστική είσοδος όπου σε συγκεκριμένο σημείο υπάρχει έντονη σταγονοροή δημιουργώντας δεξαμενή νερού για τους ντόπιους που χρησίμευε σε αυτούς και τα ζώα τους (Πλυμάκης, 2002). Αναπτύσσεται εντός της ενότητας Τρυπαλίου.



**Εικόνα 23:** Είσοδος σπηλαίου Νεροσπηλιά στο Σαμόλι, Ακρωτηρίου, Χανίων (Φωτογραφία: Χριστόφορος Χειλαδάκης).

#### **14) Σπήλαιο στον Κουρουπητό, Ακρωτηρίου, Χανίων**

Το μικρό οριζόντιο αυτό σπήλαιο βρίσκεται στην περιοχή Κουρουπητού στο Ακρωτήρι, Χανίων και ανακαλύφθηκε τυχαία το 2016 από τον Γιώργο Μαζωνάκη. Το σπήλαιο αυτό αποτελείται από μία αίθουσα μικρών διαστάσεων 1,5 μέτρο ύψος και μέγιστο μήκος 10 μέτρα, με μικρή είσοδο. Ανήκει στην Ενότητα Τρυπαλίου.

#### **15) Σπήλαιο Λαχταριδέ στ' Ασκορδαλού, Χανίων**

Το σπήλαιο αυτό, οριζόντιας ανάπτυξης, βρίσκεται στην περιοχή του Ασκορδαλού. Το όνομά του οφείλει στις Λαχταρίδες όπως αποκαλούν οι ντόπιοι τις νυχτερίδες, καθώς η παρουσία τους είναι έντονη. Το σπήλαιο αυτό διαστάσεων, μήκους 100 μέτρων και 2-3 μέτρων πλάτους, με χαρακτηριστικά στενώματα στο εσωτερικό του, βρίσκεται κοντά στα ιστορικά λατομεία σιδηρομεταλλευμάτων Αβέρωφ (Σπανάκης, 2015). Το σπήλαιο αυτό με τη μικρή χαρακτηριστική είσοδο, ανήκει στην Ενότητα Τρυπαλίου.

#### **16) Σπήλαιο της Δεσποινιάς στ' Ασκορδαλού, Χανίων**

Το μικρό αυτό σπήλαιο βρίσκεται κοντά στο σπήλαιο Λαχταριδέ και αποτελείται από μία μεγάλη αρκετά ανοιχτή αίθουσα χωρίς καθόλου διάκοσμο που χρησιμοποιείται από τους κατοίκους ως βοσκοτόπι. Το σπήλαιο αυτό ανήκει στην Ενότητα Τρυπαλίου.



**Εικόνα 24:** Ο πρωτοπόρος σπηλαιολόγος των Χανίων Αντώνης Πλυμάκης στην είσοδο του σπηλαίου στον Κουρουπητό, Χανίων (φωτογραφία: Μαζωνάκης Γιώργος).

### 17) Σπήλιος στ' Ασκορδαλού, Χανίων



Πολύ κοντά στο σπήλαιο της Δεσποινιάς βρίσκεται το σπήλαιο που οι κάτοικοι της περιοχής αποκαλούν «Σπήλιο» και αποτελείται από 2 πολύ μικρές αίθουσες, μικρής εισόδου. Το σπήλαιο αυτό ανήκει στην Ενότητα Τρυπαλίου.

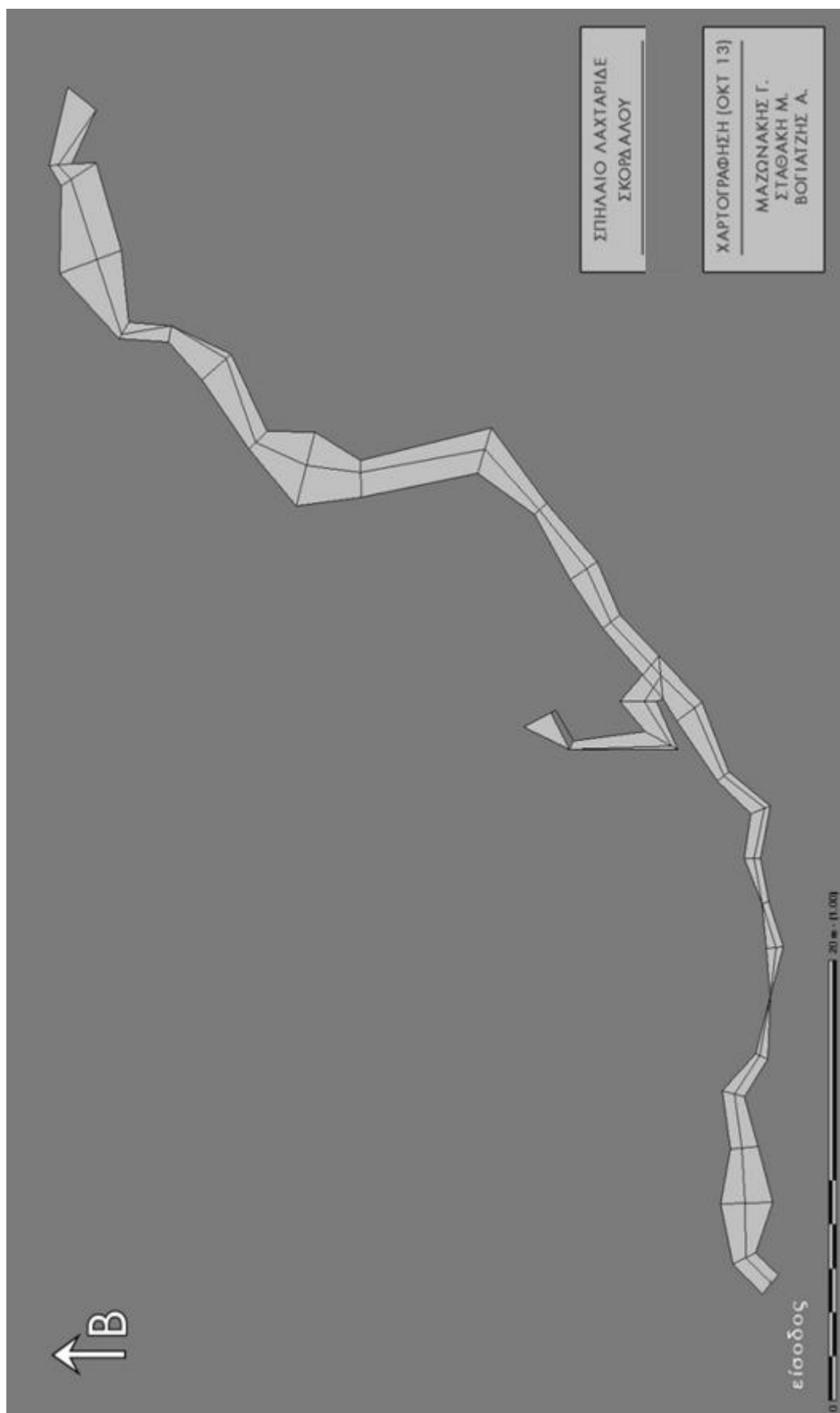
**Εικόνα 25:** Είσοδος σπηλαίου Σπήλιος στ' Ασκορδαλού, Χανίων (Φωτογραφία: Μαρινάκης Κώστας).

### 18) Σπήλαιο «του Δαφνέ η τρύπα» στην Λιτσάρδα, Αποκορώνου, Χανίων

Το σπηλαιοβάραθρο αυτό αρχαιολογικού ενδιαφέροντος βρίσκεται πλησίον του οικισμού της Λιτσάρδας στην επαρχία Αποκορώνου, Χανίων (Πλατάκης Ε., 1962). Ένα οριζόντιο σπήλαιο, μικρής εισόδου, με κατηφορική κλίση μήκους 40 μέτρων που αποτελείται από μία μεγάλη κεντρική αίθουσα και αρκετές μικρότερες. Το όνομά του σπηλαίου δόθηκε από τον περιηγητή Δαφνέρ που εξερευνούσε για αρκετά χρόνια την περιοχή στο παρελθόν. Στο εσωτερικό του βρέθηκαν και συνεχίζονται να βρίσκονται αγγεία και ευρήματα αρχαιολογικής σημασίας για τον λόγο αυτό προστατεύεται από την αρχαιολογία. Αναπτύσσεται εντός της Ομάδας πλακωδών ασβεστολίθων.



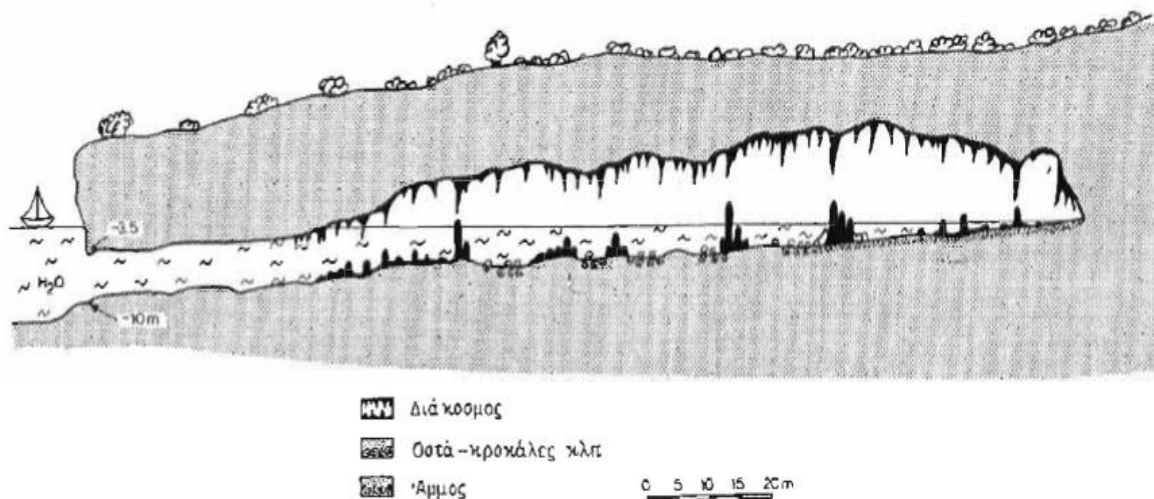
**Εικόνα 26:** Είσοδος σπηλαιοβαράθρου Δαφνέ, Λιτσάρδα, Αποκορώνου, Χανίων (αρχείο Γ. Μαζωνάκη).



**Σχήμα 38:**Χαρτογράφηση του σπηλαίου Λαχταριδέ στ' Ασκορδαλού, Χανίων (αρχείο: Μαζωνάκη Γιώργου).

### 19) Σπήλαιο των Ελεφάντων στο Δράπανο, Αποκορώνου, Χανίων

Το σπήλαιο αυτό ανήκει σε μία ιδιαίτερη κατηγορία σπηλαίων, αυτήν των υποθαλάσσιων σπηλαίων, καθώς η είσοδός του, διαστάσεων πλάτους 9 μέτρων και ύψους 6,5 μέτρων, βρίσκεται σε βάθος 10 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας. Ανακαλύφθηκε στην περιοχή του ακρωτηρίου Δράπανο, έξω από τον κόλπο της Σούδας, από τον δύτη Μανώλη Ευθυμάκη, το 1995. Αποτελείται από δύο μεγάλες αίθουσες συνολικού μήκους 137 μέτρων οριζόντιας ανάπτυξης, πλάτους 50 μέτρων και ύψους μεγαλύτερο των 10 μέτρων με πολύ έντονο διάκοσμο. Το όνομά του οφείλεται σε απολιθωμένα οστά του *Elephas antiquus* τεράστιας παλαιοντολογικής σημασίας που βρίσκονται μέχρι σήμερα στο πυθμένα του σπηλαίου, καθώς μαρτυρούν την εξέλιξη του (Συμεωνίδης και συν., 1995-2000). Το εσωτερικό του σπηλαίου αποτελεί καταφύγιο και τόπος περιστασιακής κατοικίας της φώκιας *Monachus monachus*. Το σπήλαιο των ελεφάντων προσελκύει περισσότερους από 1000 πιστοποιημένους αυτόνομους δύτες κατά την καλοκαιρινή περίοδο κάθε έτους. Το σπήλαιο αυτό αναφέρεται πολλές φορές στην διεθνή βιβλιογραφία ως σπηλιά Βάμος ή Κουταλάς. Σύμφωνα με τους Συμεωνίδης και συν., 1995-2000 και την δημοσίευσή τους στο αντίστοιχο Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής εταιρείας αναφέρεται ότι το σπήλαιο έχει δημιουργηθεί σε κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους Μεσοζωικής Ηλικίας, ενώ έπειτα από προσωπική επικοινωνία με τον γεωλόγο κ. Β. Γιαννόπουλο, το υποθαλάσσιο αυτό σπήλαιο κατατάσσεται εντός της Ενότητας του Τρυπαλίου.



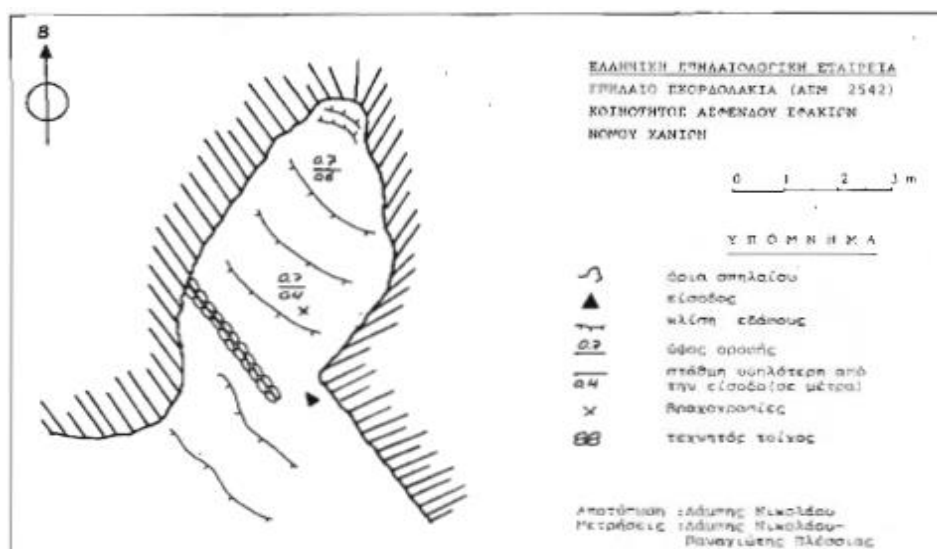
**Σχήμα 39:** Τομή Β-Ν σπηλαίου των Ελεφάντων στο Δράπανο, Αποκορώνου, Χανίων (Συμεωνίδης και συν., 1995-2000).

## 20) Σπήλαιο Ασφένδου στα Σκορδουλάκια, Ασφένδου, Χανίων

Το σπήλαιο Ασφένδου βρίσκεται στη θέση Σκορδουλάκια, στο βορειοανατολικό τμήμα της απαρχής του φαραγγιού του Ασφένδου. Πρόκειται για βραχοσκεπή με μικρό άνοιγμα, που ανακαλύφθηκε το 1954 από τον Γεώργιο Φωτάκη. Κοντά στην είσοδο του, υπάρχουν βραχογραφίες που παριστάνουν εικονιστικά θέματα (χαράγματα ζώων - θηραμάτων, παράσταση τόξου με βέλος, δέντρου, πλοίου, καμάκι, χιαστί ακόντια ή κουπιά) και αφηρημένα σύμβολα (Παπουτσάκης, 1972). Η θεματολογία και ο τρόπος εγχάραξης έχουν οδηγήσει ερευνητές να τα χρονολογήσουν στην προϊστορική περίοδο σύμφωνα με την αρχαιολόγο Αγγελική Τσίγκου, προς προστασία των οποίων η αρχαιολογική υπηρεσία τα τελευταία χρόνια έχει προσθέσει μεταλλική πόρτα με λουκέτο, περιορίζοντας την πρόσβαση του κοινού σε αυτά (Θεοδώρου, 1984). Το σπήλαιο αυτό αναπτύσσεται εντός της Ομάδας πλακωδών ασβεστολίθων.



**Εικόνα 27:** Σπήλαιο Ασφένδου στα Σκορδουλάκια, Ασφένδου, Χανίων (Φωτογραφίες: Χριστόφορος Χειλαδάκης).



**Σχήμα 40:** Χαρτογράφηση σπηλαίου Σκορδουλάκια Ασφένδου, Σφακίων, Χανίων (Θεοδώρου, 1984).



**Σχήμα 41:** Χαρτογραφική απεικόνιση σπηλαίου Ασφένδου, Σκορδουλάκια, Χανίων (Πλυμάκης, 2002).

## 21) Σπήλαιο Γουργούθακας στα Λευκά Όρη, Χανίων

Το σπηλαιοβάραθρο «Γουργούθακας», μικρής εισόδου, βρίσκεται στην τοποθεσία «Ατζινές» των Λευκών Ορέων, ανατολικά της κορυφής του Αγίου Πνεύματος, στην περιοχή Μελιδονίου Αποκορώνου στο νομό Χανίων, σε υψόμετρο 1500 μέτρων. Ανακαλύφθηκε το 1990 από Γάλλους σπηλαιολόγους, το 1996 προσέγγισαν το βάθος των -452m, το 1997 το βάθος των -985m, ενώ το 1998 τελικά κατάφεραν να φθάσουν στο πυθμένα του σε βάθος -1208m, όπου βρίσκεται ένα σιφόνι, μικρή λίμνη με νερό. Θεωρείται το βαθύτερο σπήλαιο της Ελλάδας, ενώ

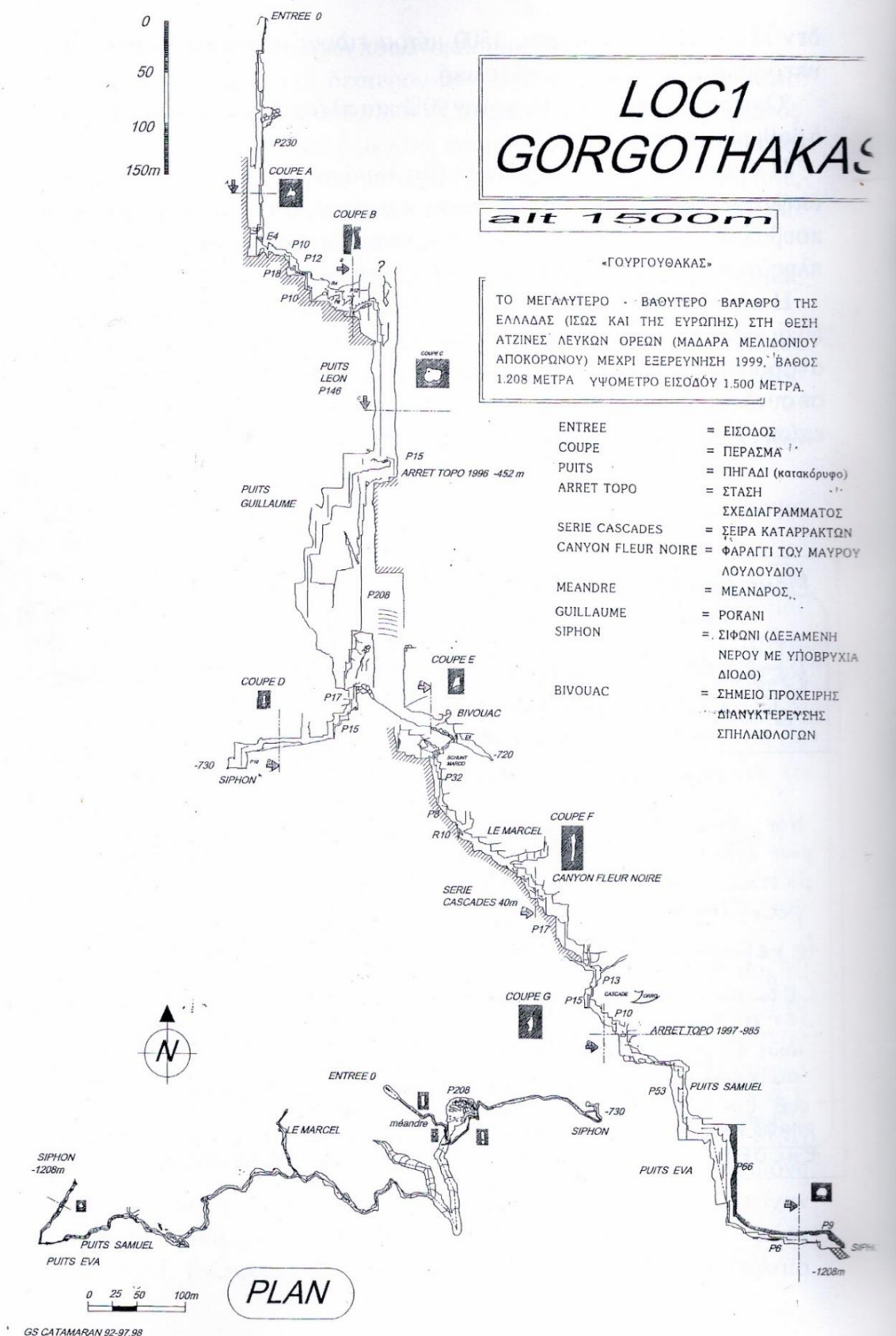
κατέχει θέση στα 30 μεγαλύτερα στην κατάταξη παγκοσμίου επιπέδου. Στην προσπάθεια αρίθμησης των σπηλαίων των Λευκών Ορέων, οι Γάλλοι σπηλαιολόγοι αναγράφουν με αύξοντα αριθμό LOC (Lefka Ori Crete) όσα εξερευνούν. Με τον αριθμό LOC 1 έχει καταγραφεί το σπήλαιο του Γουργούθακα, το οποίο έχει οφείλει το όνομά του στα Γουργούθια ή Γουργούθους, τις φυσικές λακκούβες των βράχων όπου συγκεντρώνεται το βρόχινο νερό. Σε συνθήκες απόλυτης υγρασίας και θερμοκρασίες 6°C, λόγω της μεγάλης απόστασης και του χρόνου που οι σπηλαιολόγοι χρειάζονται για εξερευνήσουν όλο το σπήλαιο, συχνά πραγματοποιείται κατασκήνωση στο εσωτερικό του, σε βάθος 300 μέτρων, όπου μπορούν να διανυκτερεύσουν και να ξεκουραστούν. Το σπήλαιο αναπτύσσεται εντός της Ομάδας πλακωδών ασβεστολίθων.

## 22) LO 1 23) LO 23 24) LO 44

Σε μικρή απόσταση από το σπήλαιο του Γουργούθακα, βρίσκονται τα σπήλαια LO 1, LO 23 και LO 44. Το σπήλαιο LO 1 χρησιμοποιείται από τους σπηλαιολόγους για διανυκτέρευση και κατασκήνωση καθώς αποτελείται από μία μικρή αίθουσα μικρής εισόδου. Το σπήλαιο LO 23 χρησιμοποιείται για συγκέντρωση πόσιμου νερού, καθώς καταλήγει σε λεκάνη συγκέντρωσης νερού σε βάθος 60 μέτρων. Τα σπήλαια αυτά αναπτύσσονται εντός της Ομάδας πλακωδών ασβεστολίθων.



**Εικόνα 28:** Είσοδος σπηλαίου LO1 (αριστερά) και δεξαμενή νερού σπηλαίου LO 23 (δεξιά) (Φωτογραφίες από αποστολή στα Λευκά Όρη, 2015).



Σχήμα 42: Χαρτογράφηση σπηλαιοβάραθρου Γουργούθακα, Λευκά Όρη, Χανίων (Πλυμάκης, 2002).



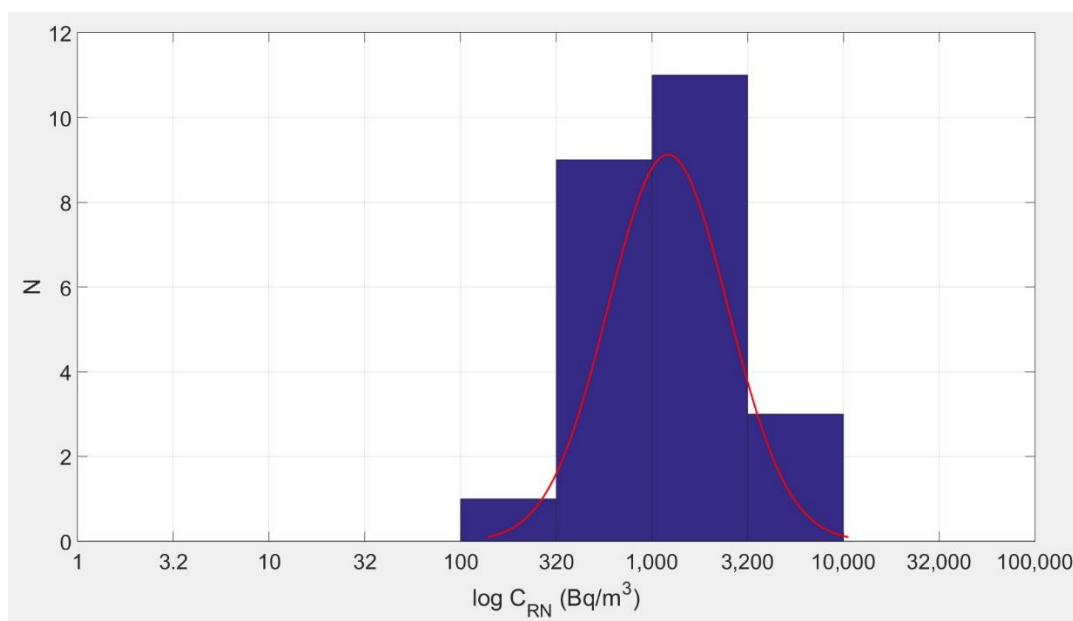
**Εικόνα 29:** Βαθύτερο σημείο σπηλαιοβάραθρου Γουργούθακα, Λευκά Όρη Χανίων (αρχείο Γ.Μαζωνάκη).

## Κεφάλαιο 5

### Αποτελέσματα

Ο πίνακας 28 παρουσιάζει τους κωδικούς των ανιχνευτών καθώς και την ημερομηνία εισόδου και εξόδου τους στα αντίστοιχα σπήλαια της συγκεκριμένης εργασίας. Ο πίνακας 29 παρουσιάζει τις ολοκληρωτικές τιμές συγκέντρωσης ραδονίου που υπολογίστηκαν σύμφωνα με την εξίσωση (12) που αναφέρεται στην υποενότητα 3.2.1, στα αντίστοιχα υπό μελέτη σπήλαια στο τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της Ε.Ε.Α.Ε. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από 286 – 4.449 Bq/m<sup>3</sup>, με μέση τιμή ίση περίπου με 1200 Bq/m<sup>3</sup>.

Αν και αριθμητικά περιορισμένα τα δεδομένα, κατασκευάστηκαν τα ιστογραμματα κατανομής συγκέντρωσης ραδονίου στα υπό μελέτη σπήλαια και στα σπήλαια που υπάρχουν αντίστοιχες μετρήσεις στην ελληνική βιβλιογραφία, όπως παρουσιάζει το σχήμα 43 και σχήμα 44 αντίστοιχα. Ο μέσος όρος συγκέντρωσης ραδονίου στα σπήλαια της Ελλάδας υπολογίστηκε ίσος με 1120 Bq/m<sup>3</sup>. Τα δεδομένα αυτά, αν και αριθμητικά περιορισμένα, ακολουθούν κανονική κατανομή. Η κόκκινη γραμμή δείχνει την βέλτιστη κατανομή. Όλα τα γραφήματα που παρουσιάζονται έγιναν με την χρήση του προγράμματος matlab. Τα παραπάνω συμφωνούν με την αντίστοιχη έρευνα σε σπήλαια της Ιταλίας (Cigna, 2005). Για την ευκολότερη σύγκριση των αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής με εκείνα του Cigna, το 2005, κατασκευάστηκε το ιστόγραμμα του σχήματος 45. Σημειώνοντας τις τιμές αυτές, στο αντίστοιχο γράφημα της μελέτης αυτής, όπως παρουσιάζει το σχήμα 23, παρατηρούμε ότι το 45% ανήκει στο εύρος με τιμή συγκέντρωσης ραδονίου 1.000 – 3.200 Bq/m<sup>3</sup>.



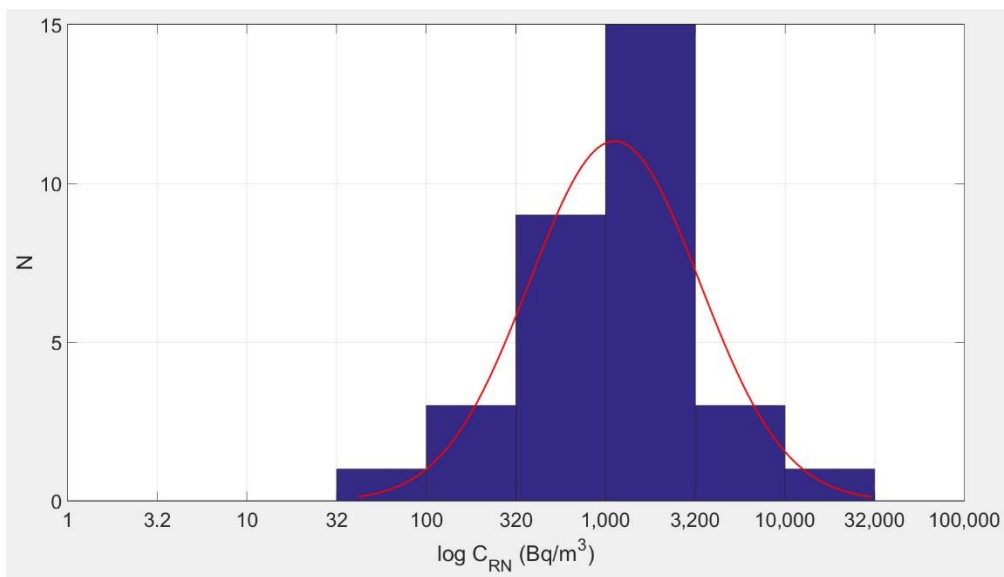
**Σχήμα 43:** Κατανομή συγκέντρωσης ραδονίου στα υπό μελέτη σπήλαια.

**Πίνακας 28:** Κωδικοί μετρητών CR-39 και ημερομηνίες εισόδου και εξόδου τους στα αντίστοιχα σπήλαια.

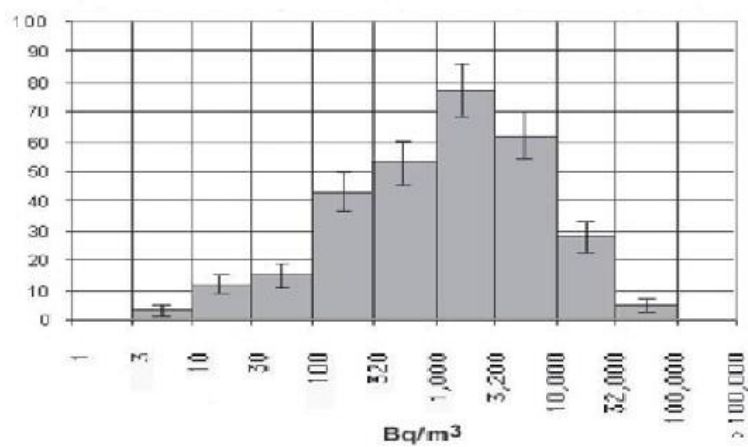
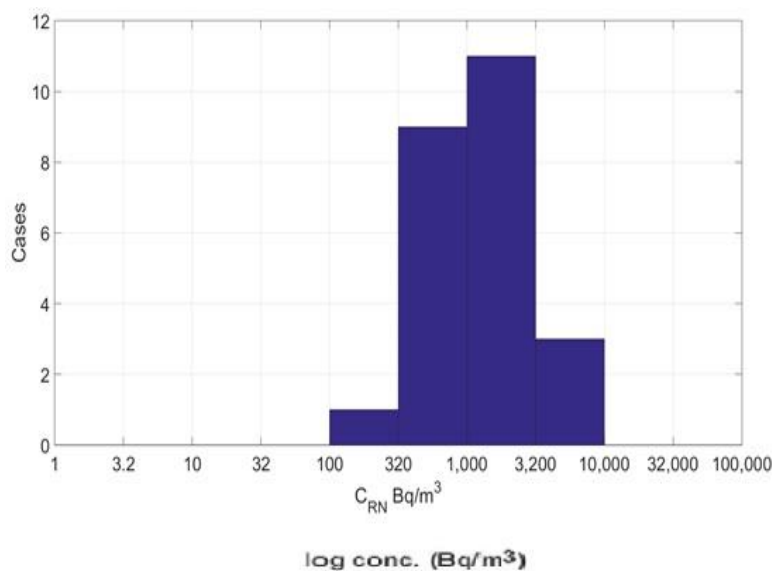
| <b>ΟΝΟΜΑΣΙΑ<br/>ΣΠΗΛΑΙΟΥ</b>  | <b>ΗΜ/ΝΙΑ<br/>ΕΙΣΟΔΟΥ</b> | <b>ΗΜ/ΝΙΑ<br/>ΕΞΟΔΟΥ</b> | <b>ΚΩΔΙΚΟΣ</b> |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|
| Σπήλαιο στο ΜΑΙΧ              | GR 7124                   | 15.7.2015                | 20.11.2015     |
| Σπήλαιο Αγροκήπιο             | GR 7253                   | 15.7.2015                | 20.11.2015     |
| Σπήλαιο Λιθωμένης<br>Κοπελιάς | GR 7050                   | 28.2.2015                | 22.2.2016      |
| ΣΙΜΟΝΕΛΙ<br>(Simonelli)       | GR 5753                   | 2.10.13                  | 5.4.14         |
| Άγιος Αντώνιος                | GR 5734                   | 5.10.13                  | 5.4.14         |
| Άγιος Σπυρίδων<br>Ιωάννης     | GR 5751                   | 5.10.13                  | 5.4.14         |
| Διαμπερές                     | GR 5732                   | 3.2.2016                 | 10.3.2016      |
| Σπήλαιο Ντάμιαλη              | GR 5741                   | 3.2.2017                 | 10.3.2016      |
| Σπήλαιο Γερανίου              | GR 5729                   | 2.10.13                  | 5.4.15         |
| Σπήλαιο Αγίων 98<br>Πατέρων   | GR 7055                   | 14.10.14                 | 5.10.15        |
| Σπηλαιοβάραθρο του<br>Τζανή   | GR 5749                   | 13.11.2013               | 15.08.2015     |
| Νεροσπηλιά                    | GR 7271                   | 8.8.2015                 | 4.11.2015      |
| Σπήλαιο στον<br>Κουρουπητό    | GR 7051                   | 9.2.2016                 | 30.3.2016      |
| Σπήλαιο Λαχταριδέ             | GR 7189                   | 25.2.2016                | 24.3.2016      |
| Της Δεσποινιάς ο<br>σπήλιος   | GR 7121                   | 24.2.16                  | 1.4.2016       |
| Σπήλιος                       | GR 7054                   | 24.2.16                  | 1.4.2016       |
| Σπήλαιο του Δαφνέ             | GR 7053                   | 4.5.2014                 | 20.8.2014      |
| Σπήλαιο Ασφένδου              | GR 7047                   | 4.5.2014                 | 20.8.2014      |
| Τρύπα της Λεντάκα             | GR 7045                   | 3.5.2016                 | 20.8.2016      |
| Γουργούθακας                  | GR 7046                   | 4.5.2015                 | 20.8.201       |
| LO 1                          | GR 7057                   | 10.1.2016                | 4.3.2016       |
| LO 44                         | GR 7058                   | 23.3.2015                | 22.2.2016      |
| LO 23                         | GR 7052                   | 14.12.2015               | 30.3.2016      |
| Σπήλαιο Ελεφάντων             | GR7211/7223/7224          | (X)25.2.2015             | 22.5.2015      |
|                               | GR7140/7197/7200          | (K)25.6.2015             | 23.10.2015     |

**Πίνακας 29:** Αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης ραδονίου στα υπό μελέτη σπήλαια.

| <b>a/a</b> | <b>Ονομασία σπηλαιίου</b>  | <b>C<sub>RN</sub> (Bq/m<sup>3</sup>)</b> |
|------------|----------------------------|------------------------------------------|
| <b>1</b>   | Σπήλαιο Ντάμιαλη           | 4029                                     |
| <b>2</b>   | Διαμπερές                  | 4449                                     |
| <b>3</b>   | Σπήλαιο στο ΜΑΙΧ           | 3285                                     |
| <b>4</b>   | Σπήλαιο Αγροκήπιο          | 1403                                     |
| <b>5</b>   | Σπήλαιο Λιθωμένης Κοπελιάς | 1318                                     |
| <b>6</b>   | ΣΙΜΟΝΕΛΙ (Simonelli)       | 286                                      |
| <b>7</b>   | Άγιος Αντώνιος             | 406                                      |
| <b>8</b>   | Άγιος Σπυρίδων Ιωάννης     | 696                                      |
| <b>9</b>   | Σπήλαιο Γερανίου           | 1390                                     |
| <b>10</b>  | Σπήλαιο Λεντάκα            | 1230                                     |
| <b>11</b>  | Σπήλαιο Αγίων 98 Πατέρων   | 594                                      |
| <b>12</b>  | Σπηλαιοβάραθρο του Τζανή   | 672                                      |
| <b>13</b>  | Νεροσπηλιά                 | 882                                      |
| <b>14</b>  | Σπήλαιο στον Κουρουπητό    | 1890                                     |
| <b>15</b>  | Σπήλαιο Λαχταριδέ          | 2198                                     |
| <b>16</b>  | Της Δεσποινιάς ο σπήλιος   | 525                                      |
| <b>17</b>  | Σπήλιος                    | 775                                      |
| <b>18</b>  | Σπήλαιο Ελεφάντων          | 653 (X)<br>330 (K)<br>Μέσος όρος         |
| <b>19</b>  | Σπήλαιο του Δαφνέ          | 1230                                     |
| <b>20</b>  | Σπήλαιο Ασφένδου           | 2296                                     |
| <b>21</b>  | Γουργούθακας               | 2024                                     |
| <b>22</b>  | LO 1                       | 770                                      |
| <b>23</b>  | LO 44                      | 1946                                     |
| <b>24</b>  | LO 23                      | 2024                                     |



**Σχήμα 44:** Λογαριθμική κατανομή συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια στην Ελλάδα.



**Σχήμα 44:** Συγκριτική απεικόνιση συγκέντρωσης ραδονίου στα υπό μελέτη σπήλαια και στα σπήλαια της Ιταλίας.

Ο πίνακας 30 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων σύμφωνα με την λιθοστρωματογραφική θέση του κάθε σπηλαίου.

**Πίνακας 30:** Συγκέντρωση ραδονίου στα υπό μελέτη σπήλαια σύμφωνα με την λιθοστρωματογραφική τους θέση.

| a/a | Ονομασία σπηλαίου          | C <sub>RN</sub> (Bq/m <sup>3</sup> ) | Λιθοστρωματογραφικός σχηματισμός               |
|-----|----------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1   | Σπήλαιο Ντάμιαλη           | 4029                                 | Εντός των Νεογενών<br>Τεταρτογενών Σχηματισμών |
| 2   | Διαμπερές                  | 4449                                 |                                                |
| 3   | Σπήλαιο στο MAIX           | 3285                                 |                                                |
| 4   | Σπήλαιο Αγροκήπιο          | 1403                                 |                                                |
| 5   | Σπήλαιο Λιθωμένης Κοπελιάς | 1318                                 |                                                |
| 6   | ΣΙΜΟΝΕΛΙ (Simonelli)       | 286                                  |                                                |
| 7   | Άγιος Αντώνιος             | 406                                  |                                                |
| 8   | Άγιος Σπυρίδων Ιωάννης     | 696                                  |                                                |
| 9   | Σπήλαιο Γερανίου           | 1390                                 |                                                |
| 10  | Σπήλαιο Λεντάκα            | 1230                                 |                                                |
| 11  | Σπήλαιο Αγίων 98 Πατέρων   | 594                                  | Ζώνη Τρίπολης                                  |
| 12  | Σπηλαιοβάραθρο του Τζανή   | 672                                  |                                                |
| 13  | Νεροσπηλιά                 | 882                                  | Ενότητα Τρυπαλίου                              |
| 14  | Σπήλαιο στον Κουρουπητό    | 1890                                 |                                                |
| 15  | Σπήλαιο Λαχταριδέ          | 2198                                 |                                                |
| 16  | Της Δεσποινιάς ο σπήλιος   | 525                                  |                                                |
| 17  | Σπήλιος                    | 775                                  |                                                |
| 18  | Σπήλαιο Ελεφάντων          | 653 (X)<br>330 (K)<br>Μέσος όρος     |                                                |
| 19  | Σπήλαιο του Δαφνέ          | 1230                                 | Ομάδα Πλακωδών<br>Ασβεστολίθων                 |
| 20  | Σπήλαιο Ασφένδου           | 2296                                 |                                                |
| 21  | Γουργούθακας               | 2024                                 |                                                |
| 22  | LO 1                       | 770                                  |                                                |
| 23  | LO 44                      | 1946                                 |                                                |
| 24  | LO 23                      | 2024                                 |                                                |

Για τον υπολογισμό της ενεργής δόσης σε mSv και την αξιολόγηση των μετρηθέντων τιμών με σκοπό την εκτίμηση της επικινδυνότητας και την ασφαλή παραμονή επισκεπτών, σπηλαιολόγων και πιθανών εργαζομένων στα σπήλαια αυτά, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 4, όπως αναφέρεται στην υποενότητα 1.3 και ορίζοντας τον παράγοντα μετατροπής της ενεργής δόσης (DCF) ίσο με  $1.4 \text{ mSv/mJ h m}^{-3}$ , τον παράγοντα μετατροπής των μονάδων (u) ίσο με  $5.6 \times 10^{-6} \text{ mJ m}^{-3}/\text{Bq m}^{-3}$  (I.C.R.P., 1994) και τον παράγοντα ισοδυναμίας ίσο με 0.5, μια τιμή που έχει συχνά χρησιμοποιηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για σπήλαια (Πατήρης, 2009). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 31. Για τις τρεις αυτές περιπτώσεις έγιναν οι εξής παραδοχές: ως χρόνος παραμονής για κάθε επισκέπτη θεωρήθηκε ότι η μία ώρα είναι αρκετή για την ξενάγηση του E(t1), για τους σπηλαιολόγους αναψυχής θεωρήθηκε ως ετήσιος χρόνος παραμονής 320 ώρες E(t2) (μέσος όρος παραμονής για έναν σπηλαιολόγο (αναψυχής και επαγγελματία) σύμφωνα με τον πίνακα 21), ενώ υποθέτοντας ότι σπήλαια αυτά είναι τουριστικά επισκέψιμα ένας υπάλληλος που εργάζεται τουλάχιστον 5 μέρες την εβδομάδα από 8 ώρες ημερησίως αφιερώνει περίπου ετησίως 1880 ώρες E(t3), που ισούται πάλι με το μέσο όρο εργασίας ενός μερικής και πλήρης απασχόλησης εργαζόμενο, όπως παρουσιάζει ο πίνακας 21 με τους εκτιμώμενους χρόνους παραμονής. Οι τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα υπολογίστηκαν σε mSv/year, εκτός από την πρώτη περίπτωση των επισκεπτών που τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και σε μSv/year καθώς η ενεργή δόση που λαμβάνουν είναι πολύ μικρή.

Σύμφωνα με την εξίσωση 11 και τα επιτρεπόμενα όρια που αναφέρει η οδηγία της Ε.Ε. ίσα με 20mSv για επαγγελματικούς χώρους, υπολογίστηκε ο μέγιστος επιτρεπτός χρόνος παραμονής, τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 32.

**Πίνακας 31:** Τιμές ενεργής δόσης ακτινοβολίας που δέχεται ένας επισκέπτης E(1), σπηλαιολόγος E(2) και ένας εργαζόμενος E(3) σύμφωνα με την εξίσωση 3.

| Ονομασία            | C                 | E(1)    | E(1)   | E(2)  | E(3)         |
|---------------------|-------------------|---------|--------|-------|--------------|
| σπηλαιίου           | Bq/m <sup>3</sup> | μSv/y   | mSv/y  | mSv/y | mSv/y        |
| <b>ΜΑΙΧ</b>         | 3285              | 12,8772 | 0,0129 | 4,12  | <b>24,21</b> |
| <b>Αγροκήπιο</b>    | 1403              | 5,4998  | 0,0055 | 1,76  | 10,34        |
| <b>Λιθωμένης</b>    | 1318              |         |        |       |              |
| <b>Κοπελιάς</b>     |                   | 5,1666  | 0,0052 | 1,65  | 9,71         |
| <b>Simonelli</b>    | 286               | 1,1211  | 0,0011 | 0,36  | 2,11         |
| <b>Άγιος</b>        | 406               |         |        |       |              |
| <b>Αντώνιος</b>     |                   | 1,5915  | 0,0016 | 0,51  | 2,99         |
| <b>Άγιος</b>        | 696               |         |        |       |              |
| <b>Σπυρίδων</b>     |                   | 2,7283  | 0,0027 | 0,87  | 5,13         |
| <b>Διαμπερές</b>    | 4449              | 17,4401 | 0,0174 | 5,58  | <b>32,79</b> |
| <b>Νταμιάλης</b>    | 4029              | 15,7937 | 0,0158 | 5,05  | <b>29,69</b> |
| <b>Γερανίου</b>     | 1390              | 5,4488  | 0,0054 | 1,74  | 10,24        |
| <b>98 Πατέρων</b>   | 594               | 2,3285  | 0,0023 | 0,75  | 4,38         |
| <b>Τζανής</b>       | 672               | 2,6342  | 0,0026 | 0,84  | 4,95         |
| <b>Λαχταρίδες</b>   | 2198              | 8,6162  | 0,0086 | 2,76  | 16,20        |
| <b>Νεροσπηλιά</b>   | 882               | 3,4574  | 0,0035 | 1,11  | 6,50         |
| <b>Κουρουπητός</b>  | 1890              | 7,4088  | 0,0074 | 2,37  | 13,93        |
| <b>Της</b>          |                   |         |        |       |              |
| <b>Δεσποινιάς</b>   | 525               | 2,0580  | 0,0021 | 0,66  | 3,87         |
| <b>Σπήλιος</b>      | 775               | 3,0380  | 0,0030 | 0,97  | 5,71         |
| <b>Γουργούθακας</b> | 2024              | 7,9341  | 0,0079 | 2,54  | 14,92        |
| <b>LO 1</b>         | 770               | 3,0184  | 0,0030 | 0,97  | 5,67         |
| <b>LO 44</b>        | 1946              | 7,6283  | 0,0076 | 2,44  | 14,34        |
| <b>LO 23</b>        | 2024              | 7,9341  | 0,0079 | 2,54  | 14,92        |
| <b>Του Δαφνέ</b>    | 1230              | 4,8216  | 0,0048 | 1,54  | 9,06         |
| <b>Ασφένδου</b>     | 2296              | 9,0003  | 0,0090 | 2,88  | 16,92        |
| <b>Λεντάκα</b>      | 1230              | 4,8216  | 0,0048 | 1,54  | 9,06         |
| <b>Ελεφάντων</b>    | 653               | 1,2897  | 0,0026 | 0,82  | 4,81         |
|                     | 330               | 2,6421  | 0,0026 | 0,41  | 2,43         |

**Πίνακας 32:** Μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος παραμονής (ώρες/έτος) για εργαζόμενους σε αντίστοιχο σπήλαιο για  $E_{\text{eff}} = 20\text{mSv}$ .

| Ονομασία σπηλαίου           | Μέγιστος χρόνος παραμονής (ώρες/έτος) |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| Σπήλαιο MAIX                | 391                                   |
| Σπήλαιο Αγροκήπιο           | 916                                   |
| Σπήλαιο Λιθωμένης Κοπελιάς  | 975                                   |
| Σπήλαιο Simonelli           | 4492                                  |
| Σπήλαιο Άγιος Αντώνιος      | 3164                                  |
| Σπήλαιο Άγιος Σπυρίδων      | 1846                                  |
| Σπήλαιο Διαμπερές           | 289                                   |
| Σπήλαιο Νταμιάλης           | 319                                   |
| Σπήλαιο Γερανίου            | 924                                   |
| Σπήλαιο Αγίων 98 Πατέρων    | 2163                                  |
| Σπηλαιοβάραθρο Τζανής       | 1912                                  |
| Σπήλαιο Λαχταρίδες          | 584                                   |
| Νεροσπηλιά                  | 1457                                  |
| Σπήλαιο στον Κουρουπητό     | 680                                   |
| Σπήλαιο της Δεσποινιάς      | 2447                                  |
| Σπήλιος                     | 1658                                  |
| Σπηλαιοβάραθρο Γουργούθακας | 635                                   |
| LO 1                        | 1668                                  |
| LO 44                       | 660                                   |
| LO 23                       | 635                                   |
| Σπήλαιο του Δαφνέ           | 1044                                  |
| Σπήλαιο Ασφένδου            | 560                                   |
| Σπήλαιο Λεντάκα             | 1044                                  |
| Σπήλαιο Ελεφάντων           | 1967 (X)<br>3893 (K)                  |

## 5.1 Συμπεράσματα

Στόχος της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διατριβής ήταν η μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου ( $C_{Rn}$ ) σε 25 σπήλαια και σπηλαιοβάραθρα της δυτικής Κρήτης, καθώς ο υπολογισμός της ενεργής δόσης ( $D_{eff}$ ) που δέχεται ο άνθρωπος στο εσωτερικό τους με σκοπό την εκτίμηση του βαθμού επικινδυνότητας και την ασφαλή παραμονή του. Για τον σκοπό αυτό τοποθετήθηκε ένας παθητικός ανιχνευτής CR-39, σε κάθε ένα από τα παραπάνω σπήλαια για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα που αναφέρει ο πίνακας 28. Αναφέρεται ότι παρά την τοποθέτηση ανιχνευτή στο σπήλαιο Λερά, στο Ακρωτήρι του δήμου Χανίων, δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα καθώς ο ανιχνευτής εμφάνισε έντονο θόρυβο, με αποτέλεσμα την παρατήρηση του φαινομένου τελικά σε 24 σπήλαια. Εξαίρεση αποτελεί το υποθαλάσσιο σπήλαιο των ελεφάντων στο οποίο τοποθετήθηκαν επιπλέον 3 μετρητές σε 2 διαφορετικές χρονικές περιόδους, με σκοπό την παρατήρηση της εποχιακής διακύμανσης του φαινομένου συγκέντρωσης ραδονίου. Η παροχή και επεξεργασία των συγκεκριμένων ανιχνευτών CR-39, έγιναν από το τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας. Στην συνέχεια ακολουθεί η ερμηνεία και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Εντός των Νεογενών-Τεταρτογενών σχηματισμών, οι τιμές συγκέντρωσης ραδονίου που προέκυψαν στα σπήλαια που εμφανίζονται στους σχηματισμούς αυτούς, κυμαίνονται από 286 - 4449 Bq/m<sup>3</sup>. Οι τιμές αυτές χαρακτηρίζονται υψηλές σε σύγκριση με τον μέσο όρο των συγκεντρώσεων ραδονίου στα υπό μελέτη σπήλαια (1.200 Bq/m<sup>3</sup>), με εξαίρεση το σπήλαιο Simonelli που παρατηρήθηκε τιμή συγκέντρωσης ραδονίου ίση με 286 Bq/m<sup>3</sup>. Η χαμηλή αυτή τιμή, πιθανά συνδέεται με τον έντονο αερισμό του σπηλαίου, καθώς πρόκειται για μια βραχοσκεπή με ιδιαίτερα μεγάλο άνοιγμα εισόδου που διευκολύνει την ανταλλαγή-κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον του σπηλαίου. Ωστόσο, η ιδιαίτερα αυξημένη τιμή που παρουσιάζει το σπήλαιο MAIX, ξεπερνώντας τα 3.000 Bq/m<sup>3</sup>, καθώς επίσης το σπήλαιο Αγροκήπιο με τιμή 1403 Bq/m<sup>3</sup>, πιθανά συνδέεται με την ύπαρξη ρήγματος. Στην συγκεκριμένη περιοχή, σύμφωνα με τον νεοτεκτονικό-γεωλογικό χάρτη (Μουντράκης και συν, 2002), υπάρχουν ρήγματα που χαρακτηρίζονται ως ανενεργά. Οι υψηλές τιμές συγκέντρωσης ραδονίου που παρατηρήθηκαν στα σπήλαια αυτά, πιθανά να υποδεικνύουν την ενεργότητα σε ένα από αυτά τα ρήγματα. Ίδιες περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν και τα σπήλαια Ντάμιαλη και Διαμπερές (με συγκέντρωση ραδονίου 4024 και 4449 Bq/m<sup>3</sup> αντίστοιχα), όπου εμφανίζονται πάνω σε ρήγματα, τα οποία σύμφωνα με τον ίδιο

χάρτη χαρακτηρίζονται ως ενεργά.

Σε σχηματισμούς της Ζώνης της Τρίπολης εμφανίζεται το σπήλαιο των Αγίων 98 Πατέρων, με μοναδική μέτρηση συγκέντρωσης ραδονίου ίση με  $594 \text{ Bq/m}^3$ , γεγονός που απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό μετρήσεων σε σπήλαια που ανήκουν στον ίδιο σχηματισμό, έτσι ώστε να είναι δυνατή η διεξαγωγή συμπερασμάτων.

Σε σπήλαια που ανήκουν σε σχηματισμούς της ενότητας του Τρυπαλίου, οι τιμές συγκέντρωσης που υπολογίστηκαν, παρουσιάζουν έντονη διακύμανση από  $665\text{-}2198 \text{ Bq/m}^3$ . Πιθανή αιτία για την υψηλή τιμή συγκέντρωσης ραδονίου στο σπήλαιο Λαχταρίδες, ίση με  $2198 \text{ Bq/m}^3$ , να είναι η ύπαρξη σιδηρομεταλλευμάτων στην περιοχή (Σπανάκης, 2015). Στους σχηματισμούς της ίδιας ενότητας, ανήκει επίσης το υποθαλάσσιο σπήλαιο των ελεφάντων, που πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές μετρήσεις με σκοπό την παρατήρηση του φαινομένου της εποχιακής διακύμανσης. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν δύο χρονικά διαστήματα μετρήσεων, εκείνο του Φεβρουαρίου – Μαΐου, που σημειώνονται χαμηλές θερμοκρασίες στο νερό, ίσες περίπου με  $17^\circ\text{C}$ , εξαιτίας της τήξης του χιονιού και το διάστημα Ιουνίου – Οκτωβρίου με μέση θερμοκρασία νερού ίση με  $23^\circ\text{C}$ , που έχει καταγραφεί ως μέση τιμή των πιο θερμών θερμοκρασιών που παρατηρούνται στο νερό του σπηλαίου κατά τη διάρκεια του έτους. Κατά την πρώτη περίοδο μετρήσεων (Χειμερινή) η μέση τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου υπολογίστηκε ίση με  $653 \text{ Bq/m}^3$ , ενώ κατά την δεύτερη περίοδο (εαρινή) η συγκέντρωση ραδονίου που υπολογίστηκε ήταν σχεδόν η μισή και ίση με μέση τιμή  $330 \text{ Bq/m}^3$ . Παρόλο που το αποτέλεσμα αυτό δεν εμφανίζεται συχνά στην βιβλιογραφία, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.2, μπορεί να ερμηνευτεί καθώς κατά την πρώτη και χειμερινή περίοδο οι βροχοπτώσεις είναι έντονες με αποτέλεσμα να πληρώνουν τις μικρές ρωγμές/σχισμές που επιτρέπουν τον αερισμό του σπηλαίου και ο αέρας να συγκεντρώνεται για μεγαλύτερο διάστημα. Σε αντίθεση με την δεύτερη και καλοκαιρινή περίοδο που η θερμοκρασιακή διαφορά στο εσωτερικό και εξωτερικό του σπηλαίου είναι πιο έντονη, οι ρωγμές δεν είναι πληρωμένες από νερό, έτσι η κυκλοφορία και ανταλλαγή του αέρα να μην ευνοεί την συγκέντρωση του αέρα και συνεπώς του ραδονίου.

Σε σπήλαια που αναπτύχθηκαν, κυρίως εντός των μαρμάρων της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων, υπολογίστηκαν τιμές που κυμαίνονται από  $770\text{-}2296 \text{ Bq/m}^3$ . Σε γενικές γραμμές, τα σπήλαια και σπηλαιοβάραθρα που εμφανίζονται στους σχηματισμούς αυτούς, εμφανίζουν αυξημένες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου, με εξαίρεση το σπήλαιο LO1 με τιμή συγκέντρωσης ραδονίου ίση με  $770 \text{ Bq/m}^3$ , καθώς ευδιάκριτου μεγέθους άνοιγμα πιθανά ευνοεί τον αερισμό του σπηλαίου.

Οι υψηλές τιμές συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια και σπηλαιοβάραθρα, που

ανήκουν στους σχηματισμούς του Νεογενές-Τεταρτογενές και εκείνους της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων, καθώς και οι αντίστοιχες χαμηλές τιμές στους σχηματισμούς της ενότητας του Τρυπαλίου, επιβεβαιώνονται κι από αποτελέσματα αντίστοιχων μετρήσεων και σε άλλα σπήλαια (Τσουκαλά, 2013).

### 5.1.1 Συζήτηση

- Δεν παρατηρήθηκε ίδιος εύρος τιμών συγκέντρωσης ραδονίου σε σχέση με τους λιθοστρωματογραφικούς σχηματισμούς που ανήκουν τα υπό μελέτη σπήλαια.
- Οι μεγαλύτερες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου παρατηρήθηκαν σε σπήλαια που εμφανίζονται σε αποθέσεις Νεογενών και Τεταρτογενών σχηματισμών (με μέσο όρο  $2.022 \text{ Bq/m}^3$ ).
- Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρήθηκαν σε σπήλαια που εμφανίζονται σε σχηματισμούς της ενότητας Τρυπαλίου (με μέσο όρο  $1.085 \text{ Bq/m}^3$ ).
- Υψηλές τιμές συγκριτικά με τις υπόλοιπες παρουσίασαν και τα σπήλαια που εμφανίζονται στα μάρμαρα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων (με μέσο όρο  $1.715 \text{ Bq/m}^3$ ).
- Απαιτούνται περισσότερες μετρήσεις σε σπήλαια που έχουν εμφανίζονται σε σχηματισμούς της ζώνης της Τρίπολης.
- Οι τιμές συγκέντρωσης που υπολογίστηκαν στα υπό μελέτη σπήλαια δεν χαρακτηρίζονται ιδιαίτερα υψηλές συγκρινόμενες με διεθνές δεδομένα.
- Η συγκέντρωση ραδονίου στα υπό μελέτη σπήλαια και στα σπήλαια της Ελλάδας ακολουθεί την κανονική κατανομή, που παρατηρήθηκε σε αντίστοιχη έρευνα σε 220 σπήλαια ανά τον κόσμο.
- 14 από τα 24 υπό μελέτη σπήλαια παρουσίασαν μεγαλύτερη τιμή συγκέντρωσης ραδονίου από το όριο ασφαλείας σε χώρους εργασίας και ορυχεία ( $1000 \text{ Bq/m}^3$ ), σύμφωνα με την I.C.P.R (2014).
- Αυξημένες τιμές παρουσίασαν τα σπήλαια οι θέσεις των οποίων σχετίζεται με ρηγματωγόνο ζώνη.
- Σπήλαια με μεγάλη είσοδο που ευνοεί τον αερισμό του σπηλαίου, παρουσίασαν μικρότερες τιμές συγκριτικά με σπήλαια με μικρό άνοιγμα εισόδου.
- Αυξημένες τιμές παρουσίασαν τα σπήλαια, η θέση των οποίων συνδέεται με την ύπαρξη σιδηρομεταλλευμάτων.

- Οι τιμές συγκέντρωσης στα υπό μελέτη σπήλαια είναι αρκετά μικρότερες από αυτή στο σπήλαιο των Πετραλώνων (με μέσο όρο 25.000 Bq/m<sup>3</sup>), σε αντίθεση με το σπήλαιο Περάματος που παρατηρήθηκαν παραπλήσιες τιμές (με μέσο 1.300 Bq/m<sup>3</sup>).
- Το σπήλαιο των ελεφάντων δεν ακολουθεί το γενικό κανόνα του φαινομένου της εποχιακής διακύμανσης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκέντρωσης ραδονίου για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στα υπό μελέτη σπήλαια και τα όρια ασφαλείας που αναφέρονται στην Ε.Ε Οδηγία του 2013, για την προστασία από ιοντίζουσες ακτινοβολίες, για εύλογα χρονικά διαστήματα, η επίσκεψη και παραμονή στα υπό μελέτη σπήλαια, θεωρείται ακίνδυνη.

Με δεδομένο την μοναδικότητα κάθε σπηλαίου και τους πολλούς παράγοντες που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, η συγκέντρωση ραδονίου θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω ως εξής:

- Επανάληψη των μετρήσεων ανά έτος για περίοδο τουλάχιστον 5 ετών με σκοπό την παρατήρηση της επαναληψιμότητας και της ακρίβειας της τιμής συγκέντρωσης κάθε σπηλαίου. Έτσι, ώστε να υπολογιστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια η δόση ακτινοβολίας και οι χρόνοι παραμονής των επισκεπτών σε αυτά.
- Παρατήρηση φαινομένου εποχιακής διακύμανσης των σπηλαίων, με μετρήσεις σε 2 περιόδους (χειμερινή- καλοκαιρινή).
- Μετρήσεις σε κτήρια που βρίσκονται κοντά στα σπήλαια, όπως για παράδειγμα τα σπήλαια στις εγκαταστάσεις του ΜΑΙΧ.
- Περισσότερες μετρήσεις σε σπήλαια που ανήκουν στους αντίστοιχους λιθοστρωματογραφικούς σχηματισμούς.
- Μετρήσεις στα πιο χρονοβόρα τμήματα της επισκέψιμης διαδρομής των σπηλαίων με σκοπό τον σχεδιασμό και την αποφυγή μεγάλης παραμονής σε τμήματα με αυξημένη συγκέντρωση.

# Βιβλιογραφία

## Ελληνική

Ανδρεαδάκης Ε. (2003): Το καρστικό σύστημα του Υμηττού, Εργασία στα πλαίσια του Μαθήματος Καρστική Υδρογεωλογία, του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών της κατεύθυνσης, Δυναμική, Τεκτονική, Εφαρμοσμένη Γεωλογία, με έμφαση στην Υδρογεωλογία, Αθήνα, 2003.

Βογιάννης Ε. (2005): Το ραδόνιο στα ιαματικά λουτρά, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα περιβάλλοντος, Μυτιλήνη.

Γιαννόπουλος Β. (2000): Συμβολή στη μελέτη σύγχρονων και παλαιών περιβαλλόντων των πλέων σημαντικών ελληνικών σπηλαίων, Διδακτορική διατριβή, Καποδίστριο πανεπιστήμιο, Αθήνα, 2000.

Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (2006): Ε.Ε.Α.Ε., Ραδόνιο στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών, 2006.

Επίσημη εφημερίδα L13 Ευρωπαϊκής Ένωσης (2014): Οδηγία 2013/59/Ευρατομ.

Θεοδώρου Γ. (1984): Σπήλαιο Σκορδουλάκια Ασφένδου Σφακίων Κρήτης, Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, τόμος XIX, τεύχος 1983-1989, Αθήναι.

Ι.Γ.Μ.Ε, φύλλο γεωλογικού χάρτη Αλικιανού, 1969.

Ι.Γ.Μ.Ε, φύλλο γεωλογικού χάρτη Βρύσσεσ, 1993.

Ι.Γ.Μ.Ε, φύλλο γεωλογικού χάρτη Καστέλι, 1968.

Ι.Γ.Μ.Ε, φύλλο γεωλογικού χάρτη Παλαιόχωρας, 1995.

Ι.Γ.Μ.Ε, φύλλο γεωλογικού χάρτη Πλατανιά, 1956.

Ι.Γ.Μ.Ε, φύλλο γεωλογικού χάρτη Ρέθυμνο, 1988.

Ι.Γ.Μ.Ε, φύλλο γεωλογικού χάρτη Χανιά, 1986.

Ιωάννου Ι. (1970): Σπηλαιοβάραθρο χωριού Ζουρέ Αζωγυρέ Κρήτης, Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, τόμος X, τεύχος 7, 1970, Αθήναι.

Λουίζη Α. και Νικολόπουλος Δ. (1998): Κίνδυνοι υγείας από το ραδόνιο, Ιατρική, Απρ. 73, 341-345.

Μακρής Χ.Ι. (1969): Το σπήλαιο Γεράνι Ρεθύμνης, Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, τόμος X, τεύχος 3-4, 1969, Αθήναι.

Μανούτσογλου Ε. (2008): Αδημοσίευτες Σημειώσεις Σεμιναρίου Γεωλογίας της Κρήτης, της Ερευνητικής Μονάδας Γεωλογίας του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, σελ 55.

Μαριολάκος Η. και Καροτσιέρης Η. (2001): Τεκτονική γεωλογία, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, Νοέμβριος, 2001.

Μουντράκης Δ. (2004): Νεοτεκτονική – Σεισμοτεκτονική Έρευνα – Μελέτη της ευρύτερης περιοχής της βόρειας ζώνης του νομού Χανίων Κρήτης, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ, 2004.

Νικολόπουλος Δ. (2000): Μελέτη της έκθεσης του Ελληνικού πληθυσμού στο ραδόνιο-222, Αθήνα, 2000.

Νικολόπουλος Δ., Πετρόπουλος Ν. και Ποτηριάδης Κ. (1997): Μελέτη σκοπιμότητας διενέργειας εθνικής επισκόπησης ραδονίου στην Ελλάδα, ΕΕΑΕ, Αθήνα, 1997.

Οικονομόπουλος Ε. (2008): Μελέτη των περιβαλλοντικών συνθηκών έκλυσης του χημικού αερίου  $^{222}\text{Rn}$  και η πιθανή συσχέτιση της με την σεισμικότητα της περιοχής των Μεγάρων, Πάτρα, 2008.

Παπαδόπουλος Ν. (2011): Μοντέλα διακίνησης και εναπόθεσης στερεών σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας στο περιβάλλον και συνακόλουθες ραδιολογικές επιπτώσεις στην λεκάνη της Μεγαλόπολης, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Πατήρης Δ., (2009): Μελέτη της συμπεριφοράς των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα, Ιωάννινα, 2009.

Πετροχείλου Α. (1976): Πραγματοποιηθείσαι εξερευνήσεις εις Κρήτην, Περιοχή Ομαλού Χανίων, Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, τόμος XIII, τεύχος 6,7,8, 1976, Αθήναι.

Πετροχείλου Α. (1980): Σπήλαιο Γερανίου Ρεθύμνου Κρήτης, Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, τόμος XVII, τεύχος 1, 1980, Αθήναι.

Πλατάκης Ε. (1961): Σπήλαια παρά το Ρέθυμνο, Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, τόμος VI, τεύχος 4, 1961, Αθήναι.

Πλατάκης Ε. (1962): Σπήλαι της Κρήτης, Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, τόμος VI, τεύχος 6, 1962, Αθήναι.

Πλατάκης Ε. (1963): Σπήλαια Αποκορώνου Κρήτης, Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, τόμος VII, τεύχος 2, 1963, Αθήναι.

Πλατάκης Ε. (1970): Σπήλαια και άλλαι καρστικά μορφαί της Κρήτης, τόμος X, τεύχος 8, 1970, Αθήναι.

Πλυμάκης Α. (2002): Βιβλίο Α' ΤΟΜΟΣ Σπήλαια στα Χανιά, ISBN 960-91609-0-5.

Σερβιτζόγλου Ν.Γ. (2004): Ποιοτικό και ποσοτικός προσδιορισμός ισοτόπων σε λιπάσματα και γεωργικά προϊόντα- εκτίμηση βιολογικών επιπτώσεων στον άνθρωπο, τμήμα Ιατρικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Σπανάκης Ι. (2015): Μελέτη των ιστορικών μεταλλευτικών δραστηριοτήτων στην δυτική Κρήτη, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης

Στούλος Σ. (1998): Το ραδόνιο στις κατοικίες σαν συνάρτηση της ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών και άλλων φυσικών παραμέτρων, Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή θετικών επιστημών, Τμήμα φυσικής.

Στρατάκη Α. (2009): Μελέτη της χρονικής διακύμανσης του ραδονίου 222 στο στρώμα ανάμιξης στη Φινοκάλια, Τμήμα χημείας, Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Συμεωνίδης Ν., Θεοδώρου Γ. και Γιαννόπουλος Β. (1995-2000): Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, τόμος XXII, 1995-2000, Αθήναι.

Τρατάρης Α. και Χριστοδούλου Γ.Ε. (1969): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος, 1:50.000, φύλλο Αλικιανός- Βατόλακκος (Ι.Γ.Ε.Υ.)

Τσουκαλά Δ. (2013): Μελέτη ραδονίου και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε σπήλαια και ζώνες ρηγμάτων στην Κρήτη, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Φυτρολάκης Ν. (1972): Η επίδρασις ορογενετικών τινών κινήσεων και ο σχηματισμός της γύψου εις την ανατολικήν Κρήτην (επαρχία Σητείας), Δελτ. Ελλην. Γεωλ. Εταιρ., 81-100.

Φυτρολάκης Ν. (1978): Συμβολή της στη γεωλογική έρευνα της Κρήτης, Δελτ. Ελλην. Γεωλ. Εταιρ., 101-115.

Φυτρολάκης Ν. (1980): Η γεωλογική δομή της Κρήτης, Διατριβή επί υφηγεσία, Ε.Μ.Π., 1980,σελ. 54-54.

## Διεθνής

Abdallah A.M, Mohery M., Saud J. Yaghmour and Alddin S.H. (2012): Radon exhalation and natural radiation exposure in low ventilated rooms, Radiation Physics and Chemistry, Volume 81, Issue 11, November 2012, Pages 1710-1714.

Agricola (1556): De Re Metallica Translated from the Latin by H. C. Hoover and L. H. Hoover, 1950. Dover Publications Inc.

Ajayi T. and Adepelumi A. (2002): Reconnaissance soil-gas radon survey over faulted crystalline area of ile-Ife, Nigeria, Environ. Geol. 41, 608–613.

Al.Bataina, Ismail A.M., Kullab M.K., Abumurad K.M. and Mustafa H. (1997): Radon measurements in different types of natural waters in Jordan, Physics Department, Earth Sciences Department, Yarmouk University, Irbid-Jordan.

Al-Azmi D., Snopek B., Sayed A.M. and Domanski T.A. (2004): Simple bubbling system for measuring radon gas concentrations in water samples based on the high solubility of radon in olive oil, Journal of environmental Radioactivity, Vol 71, No 2, pp 175- 186.

Albergi S., Pecequilo B. and Campos M. (2005): Radon concentrations in caves of Parque Estadual do Alto Ribeira (PETAR), SP, Brazil, preliminary results, International Congress Series, Volume 1276, February 2005, Pages 403-404.

Al-Mustafaa H., Al-Jarallahb M.I., Fazal-ur-Rehmanb and Abu-Jaradc F. (2005): Radon concentration measurements in the desert caves of Saudi Arabia, Radiation Measurements 40 (2005) 707–710, 2005.

Alonso M. and Finn E. (1980): Θεμελιώδης πανεπιστημιακή φυσική, μετ: Π.Πρεσβάνης, John Willey and sons.

Al-Tamini M.H. and Abumurad K.M. (2001): Radon anomalies along faults in North of Jordan. Radiat. Meas. 34, 397–400.

Alvarez-Gallego M., Garcia-Anton E., Fernandez-Cortes A., Cuezva S. and Sanchez-Moral S. (2015): High radon levels in subterranean environments: monitoring and technical criteria to ensure human safety (case of Castanar cave, Spain).

Amgarou K. (2002): Long-Term Measurements of Indoor Radon and its progeny in the presence of Thoron Using nuclear track detectors: A novel approach, PhD Thesis, Universitat Autònoma de Barcelona Grup de Física de les Radiacions, 2002.

Angella C.T., Pedretti M. and Normanc E.B. (2015): Method for determining individual deposition velocities of radon progeny, *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 98, April 2015, Pages 34–39.

Atallah M., Planinic M.Y., Al-Bataina B.A. and Mustafa H. (2001): Radon emanation along the Dead Sea transform (rift) in Jordan, *Environ. Geol.* 40, 1440–1446.

Atwood C. (1992): *Journal of chemistry education*, 69, 351.

Axelsson O. and Sundell L. (1978): Mining, lung cancer and smoking, *Scand J Environ Health* 4:46-52.

Bahtijari M., Vaupoti J., Gregori A., Stegnar P. and Kobal I. (2007): Exposure to radon in the Gadime Cave, Kosovo, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 2008.

Balcázar M., González, D., Santoyo E. and González E. (1991): Radon measurements in heat-producing geothermal wells. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 19, 283–287.

Bascaran M. (2016): *Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies*, Springer International Publishing Switzerland 2016.

Baubron J.C., Allard P., Sabroux J.C., Tedesco D. and Toutain J.P. (1991): Soil gas emanations as precursory indicators of volcanic eruptions. *J. Geol. Soc. London* 148, 571–576.

Baubron J.C., Rigo A. and Toutain J.P. (2002): Soil gas profiles as a tool to characterize active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France), *Earth Planet. Sci. Lett.* 196, 69–81.

Bonneau M. (1973): Sur les affinités ioniques des “calcaires en plaquettes” épimétamorphiques de la Crète, le charriage de la série de Gavrovo-Tripolitza et la structure de l’arc égéen. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 277, 2453- 2456.

Becquerel H. (1896): Sur les radiations émises par phosphorescence. *Comptes Rendus*, 122, pp.420–421.

Bocicchio F., McLaughlin J.P. and Piermattei S. (1995): Radon in indoor air, European Commission. Report EUR 16123EN, 1995.

Borau J, Gonzalez A., Espinos T. and Gollazarri J. (1993): Measurements of radon levels inside Mexican caves, *Nuclear tracks Radiat. Measurements Vol. 22, Nos I-4*, pp. 287-288, 1993.

Commission of the European Communities (1994): (C.E.C) Radon in indoor air, Indoor air quality and its impact on man, (Office for Official Publications of the European Communities ed.) Luxembourg, EUR16123EN, pp.14, 1994.

Chalikiopoulos P. (1903): Sitia, die Osthalbinsel Kretas. *Veröff. Inst. Meereskde.*, 4, 138p.

Chemical Rubber Company (2001): (C.R.C) Handbook of Chemistry and Physics, ed. Lide D.L., The CRC Press, 82 th Edition.

Commonwealth of Virginia, department of Health (2012): (C.V.D.H.U.S.) Uranium Study, Initial report.

Cartwright B. G., Shirk E. K. and Price P. B. (1978): A nuclear track recording polymer of unique sensitivity and resolution. Nucl. Instrum. Meth., 153, pp. 457-460.

Choppy J. (1980): La temperature des cavités. Spelunca, 3, p.p. 117-118.

Chovil N. (1981): The epidemiology of primary lung cancer in uranium miners in Ontario, J Occup Med, 23:417-421, 1981.

Cigna A. (2005): Radon in Caves, International Journal of Speleology, 34 (1-2), 1-18.

Cohen B.L and Nason R. (1986): A diffusion barrier charcoal adsorption collector for measuring radon concentrations in indoor air, Health Phys., 45:501, 1986.

Cothern R. and Smith J. (1987): Environmental Radon Springer Science Business Media, LLC, Environmental Science Research, Volume 35, New York (1987).

Creutzburg N. and Seidel E. (1975): Zum Stand der Geologie des Praeneogens auf Kreta. N. Jb. Geol. Palaeont. Abh., 149, 363-383.

Creutzburg N., Drooger C.W., Meulenkamp J.E., Papastamatiou I., Sannemann W., Seidel E. and Tataris A. (1977): Geological map of Crete (scale 1:200.000), Institute of Geology and Mineral Exploration (IGME), Athens.

Cunningham D. and La Rock W.A. (1991): Recognition of microclimate zones through radon mapping, Lechuguilla Cave, Carlsbad Caverns National Park, New Mexico. Health Phys., 61, pp. 493-500.

Damber L. and Larsson L.G. (1982): Combined effects of mining and smoking in the causation of lung carcinoma, Acta Radiologica Oncology, 21:305-313.

Danis A., Oncescu M. and Ciuboratriu M. (2001): System for calibration of track detectors used in gaseous and solid alpha radiometric monitoring; Radiation Measurements; 34, 155- 159.

Deflorin O. (2004): Natürliche Radionuklide in Grundwässern des Kantons Graubünden, PhD thesis, University of Neuchâtel, Switzerland.

De Francesco S., Pascale Tommasone F., Cuoco E., Tedesco D. (2010): Indoor radon seasonal variability at different floors of buildings, Radiation Measurements, Volume 45, Issue 8, September 2010, Pages 928-934.

Denman A.R. and Parkinson S. (1996): Estimates of radiation dose to National Health Service workers in Northamptonshire from raised radon levels: Short communication. British Journal of Radiology 69, 72-75.

Dermitzakis M.D. and Papadopoulou N.K. (1977): The most important caves and potholes of Greece, Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, τόμος XIV, τεύχος 1, 1977, Αθήναι.

Doll R. (1992): Risks from radon. Radiation Protection Dosimetry, 42 (3): 149-153.

Dong Xie, Maili Liao and Kimberlee J. Kearfott (2015): Influence of environmental factors on indoor radon concentration levels in the basement and ground floor of a building – A case study, Radiation Measurements, Volume 82, November 2015, Pages 52-58.

Dorn F.E. (1900): Ueber die von radioaktiven Substanzen ausgesandte Emanation. Abhandlungen der

Naturforschenden Gesellschaft zu Halle, 22, pp. 155.

Dornsiepen, U.F., Manutsoglu, E., Mertmann, D., (2001): Permian-Triassic palaeogeography of the external Hellenides. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 172, 327-338.

Doutsos T., Koukouvelas I., Poulimenos G., kokkalas S., Xypolias P. and Skourlis K. (1990): An exhumation model of the south Peloponnesus, Greece, *International Journal of Earth Science*, K9. 350-365.

Duenas C., Fernandez M. C., Canete S., Carretero J. and Liger E. (1999): <sup>222</sup>Rn concentrations, natural flow rate and the radiation exposure leveles in the Nerja Cave, *Atmos. Environ*, 33, pp. 501-510.

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

Duffy J. T., Madden J. S., Mackin G. M., Mc Garry A. T. and Colgan P. A. (1996): A reconnaissance survey of radon in show caves in Ireland. *Environ. Int*, 22, pp. S415S423.

Duranni S. and Ilic R. (1997): Radon measurements by etched track detectors, World Scientific Publishing, New Jersey, 1997.

Ehmann W. and Vance D. (1991): Radiochemistry and Nucler methods of analysis, John Willey and sons.

Emsley J., (1991): THE ELEMENTS, Sec. Ed., Clarendon Press, Oxford, 251 p.

Enviromental Protection Agency U.S. (1987): (E.P.A) Ambient monitoring guidelines for prevention of significant deterioration (PSD), Office of air quality, Research Triangle Park.

Enviromental Protection Agency U.S. (2000): (EPA) Liquid Assets 2000: America's Water Resources at a Turning Point, EPA-840-B-00-001, May 2000.

Enviromental Protection Agency U.S. (2003): (EPA) Assessment of Risks from Radon in Homes, Office of Radiation and Indoor Air United States Environmental Protection Agency Washington, DC 20460

Epting M., Kudrass H.R., Leppig U. and Schaefer A. (1972): Geologie der Talea Ori/Kreta. N. Jb. Geol. Palaeont. Abh., 141, 259-285.

Erees F.S., Yener G., Salk M. and Ozbal (2006): Measurements of radon content in soil gas and in the thermalwaters in Western Turkey. *Radiation Measurements* 41: 354–361.

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

Fajan K. (1913): Radioactive Transformations and the Periodic System of The Elements, *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 46, pp. 422-439.

Faulkner K. and Gillmore G.K. (1995): Geology and radon entry into buildings, In the radon manual, second edition, The radon Council Ltd.Sheppton, Middlesex.

Faure P. (1955): Grotees explores en 1954 en Crete, Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, τόμος III, τεύχος 4, 1955, Αθήναι.

Freudenthal T. (1969): Stratigraphy of Neogene deposits in the Kania province, Crete, with special reference to foraminera of the family Planorbulinidae and the genus Heterostegina – Utrecht Micropaleontological Bulletins, 1, 208 pp.

Field M. (2007): Risks to cavers and cave workers from exposures to low-level ionizing a radiation from  $^{222}\text{Rn}$  decay in caves, *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 69, no. 1, p. 207–228.

Fleischer R.L. (1997): In Durrani, S.A., Ilic, R. (Eds.), *Radon Measurements by Etch-track Detectors*. World Scientific, Singapore (Chapter 1).

Font L.I (1997): Radon generation entry and accumulation indoors, PhD Thesis, University of Barcelona.

Friend C.R. and Gooding T.D. (2002): Variation in the concentration of radon in parts of the Ogof Flynnon Ddu system Penwyllt Southh Wales and estimates of doses to recreational cavers. *J. Environ. Radioact.*, 58, pp. 45-57.

Fry C. and Thoennessen M. (2013): Discovery of the astatine, radon, francium, and radium isotopes, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 99 (2013) 497–519.

Fytikas M., Lombardi S., Papachristou M., Pavlides S., Zouros N. and Soulakellis N. (1999): Investigation of the 1867 Lesbos (NE Aegean) earthquake fault pattern based on soil gas geochemical data. *Tectonophysics* 308, 249–261.

Gainon F. (2003): Etude hydrogéologique de la source radioactive de St-Placidus, Disentis, canton des Grisons, Diploma thesis, University of Neuchâtel, Switzerland, 2003.

Garavaglia M., Braitenberg C. and Zadro M. (1998): Radon Monitoring in a Cave of North-Eastern Italy, Department of Earth Sciences, University of Trieste, via Weiss, 1, 34127 Trieste, Italy, 1998.

Garavaglia M., Dal Moro G. and Zadro M. (2000): Radon and tilt measurements in a seismic area: Temperature effects; *Phys.Chem. Earth (A)*; Vol 25, No3, 233-237.

Gillmore G.K., Phillips P.S., Denman A.R. and Gilbertson D.D. (2002): Radon in the Creswell Crags, Permian limestone caves, *Journal of Environmental Radioactivity* 62 (2), 165–179.

Grattan J.P., Gillmore G.K., Gilbertson D.d, Pyatt F.B, Hunt C.O, McLaren S.J., Phillips P.S and Denman A. (2004): Radon and King Solomon's Miners; Fayman Orefield Jordanian desert; *The science of the Total Environment*, 319; 99-113.

Guerra M. and Lombardi S. (2001): Soil-gas method for tracing neotectonic faults in clay basins: the Pisticci field (Southern Italy), *Tectonophysics* 339, 511–522.

Gundersen L.C.S. and Schumann E.R. (1996): Mapping the radon potential of the United States: examples from the Appalachians, *Environment International*, Vol. 22, I, pp. 829-837.

Hakam O. and Lferde M. (1995): Measurements of radonactivity in indoor air in dwellings and enclosed work areas in Morocco, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 46, No 6/7, pp 601-602.

Hakl J., Csige L., Hunyadi I., Varhegyi A. and Geczy G. (1996): Radon transport in fractured porous media-Experimental study in caves, *Environment International*, 22, 433.

Hakl J., Hunyadi I. and Varhegyi A. (1997): Radon monitoring in caves. In Durrani S.A. & Ilic R. (Eds.) *Radon measurements by etched track detectors*. World Scientific: 261-283.

Handler N.J.C. and Paulo S.R. (1994): Indoor radon daughter contamination monitoring the absolute efficiency of CR-39 taking into account the plate-out effect and environmental conditions, *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol.51, No.4, 283-296, 1994.

Hauksson E. and Goddard J. (1981): Radon earthquake precursor studies in Iceland. *J. Geophys. Res.* B 86, 7037–7054.

Heinz S. (2007): Dissolved gases as natural tracers in karst hydrogeology; radon and beyond Center of Hydrogeology (CHYN), University of Neuchâtel, Emile-Argand 11, CH2007 Neuchâtel, Switzerland.

Holaday D.A. (1969): History of the Exposure of Miners to Radon. *Health Physics*, Vol. 16(5) pp 547-552.

Hyland R. and Gunn J. (1994): International comparison of cave radon concentrations identifying the potential alpha radiation risks to British cave users, *Health Phys.*, 67, pp. 176-179.

International Atomic Energy Agency (2014): (I.A.E.A) Radiation Protection and safety of Radiation Sources, International Basic Safety Standards, ISBN 978-92-0-1353310-8.Vienna.

International Commission on Radiological Protection (1986): (I.C.R.P.) Protection against radon The Metabolism of Plutonium and Related Elements. ICRP Publication 48. *Ann. ICRP* 16 (2-3).

International Commission on Radiological Protection (1990): (I.C.R.P.) Protection against radon Recommendations of the International Commission on Radiological -111, Protection, ICRP Publication 60, *Annals of the ICRP* 21(1-3), Pergamon Press, Oxford (1991).

International Commission on Radiological Protection (1994): (I.C.R.P.) Protection against radon <sup>222</sup>Rn at home and at work. *Annals of the ICRP* 65, Pergamon Press.

International Commission on Radiological Protection (2011): (I.C.R.P.) Protection against radon, first ICRP Symposium on the International System of Radiological Protection, ICRP reference 4836-9539-0480.

International Commission on Radiological Protection (2014): (I.C.R.P.) Protection against radon, Annual Report, ICRP reference 4833-3331-0243, July 28, 2015.

Immèa G., Catalano R., Gianino C., Filinciera R., Mangano G. and Morellia D. (2005): Radon Concentration by SSNTD in South-East Sicily Buildings Environment International Volume 79, June 2015, Pages 74–84.

Ioannides K., Papachristodoulou C., Stamoulis K., Karamanis D., Pavlides S., Chatzipetros A. and Karakala E. (2003): Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones, *Applied Radiation and Isotopes* 59 (2003) 205–213.

Jovanovic P. (1996): Radon measurements in karst caves in Slovenia, Institute of Occupational Safety, Ljubljana, Republic of Slovenia, EI 9510-308 M (accepted 13 Aug 1996).

Karahan G., Ozturk N. and Bayulken A. (2000): Natural radioactivity in various surface waters in Istanbul; *Water research*; Vol 34, No 18; 4367–4370.

Kávási N., Somlai J., Szeiler G., Szabó B., Schafer I. and 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) 1068e1071.

Kies A., Biell A., Rowlinson L. and Feider M. (1996): Radon survey in the Grand – Duchy of Luxemburg – Indoor measurements related to house features soil, geology and environment, *Enviroment International*, Vol 22,suppl.1, pp805-808.

King C.Y., Zhang W. and King B.S. (1993): Radon anomalies on three kinds of faults in California, *Pure Appl. Geophys.*, 141 (1993), pp. 111–124.

Kloos O. (2004): *Hydrochimie et hydrogéologie des sources thermales de Brigerbad (Valais)*, Diploma thesis, University of Neuchâtel, Switzerland.

Knutson E.O. (1988): Modeling indoor concentrations of radon's decay products in Radon and its decay products in indoor air, eds Nazaroff W. W and Nero A V, John Wiley & Sons, pp. 161-202.

Kobal I., Smoldis B., Burger J. and Skofljanec M. (1987): Atmospheric  $^{222}\text{Rn}$  in tourist caves of Slovenia. *Health Phys.*, 52, pp. 473-479.

Koenig H. and Kuss S.E. (1980): Neue Daten zur Biostratigraphie des permo-triadischen Autochthons der Insel Kreta. *N. Jb. Geol. Palaeont. Mh.*, 1980, 525-540.

Kowalczyk A.J. and Froehlich P.N. (2010): Cave air ventilation and  $\text{CO}_2$  outgassing by radon-222 modeling: How fast do caves breathe, *Earth and Planetary Science Letters*, 2010.

Kuss S.E. and Thorbecke G. 1974. Die präneogene Gesteine der Insel Kreta und ihre Korrelierbarkeit im ägäischen Raum. *Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br.*, 64, 39-75.

Kunz E., Seve J., Placek V. and Horacek J. (1979): Lung cancer in man in relation to different time distribution of radiation exposure, *Health Phys.*, 36:699-706.

Lario J., Sanchez-Moral S., Canaveras J.C., Cuezva S. and Soler V. (2004): Radon continuous monitoring in Altamira Cave (northern Spain) to assess user's annual effective dose J., *Journal of Environmental Radioactivity*, 2004.

Liuliu D., Prasauskas T., Leivo V., Turunen M., Pekkonen M., Kivistie M., Aaltonen A., Martuzevicius D. and Haverinen-Shaughnessy U. (2015): Assessment of indoor environmental quality in existing multi-family buildings in North–East Europe *Environment International*, Volume 79, June 2015, Pages 74–84.

Lively R.S. and Krafthefer B.C. (1995):  $^{222}\text{Rn}$  variation in Mystery cave, Minnesota. *Health Phys.*, 68, pp. 590-594.

Louizi A., Koukouiou V. and Proukakis C. (1994): A last report of radon concentration studies in Greek dwellings In: *Proceedings of the 1st Mediterranean Congress on Radiation Protection*, 5-7 April 1994, Athens, Greece, pp.398, 1994.

Mache H. and Bamberger M. (1914): Sitz.-Ber. Kais. Akad. Wiss. Wien, Math. Naturw. Klasse, Abt. Iia, 123, p. 325-403.

Man C.K. and Yeung H.S. (1999): Modeling and measuring the indoor Radon concentrations in high – rise buildings in Hong Kong, *applied Radiation and Isotopes*, Vol. 50, pp 1131-1135.

Manutsoglu E. (1990): Tektonik und Metamorphose der Plattenkalk- Serie im Taygetos (Peloponnes, Griechenland). *Berliner geowiss. Abh.*, A 129, 82p.

- Manutsoglu E., Soujon A., Reitner J. and Dornsiepen U.F. (1995): Relikte lithistider Demospongiae aus der metamorphen Plattenkalk-Serie der Insel Kreta (Griechenland) und ihre palaeobathymetrische Bedeutung. *N. Jb. Geol. Palaeont. Mh.*, 1995/4, 235-247.
- Manutsoglu E., Soujon A. and Jacobshagen V. (2003): Tectonic structure and fabric development of the Plattenkalk unit around the Samaria gorge, Western Crete, Greece. *Z. dt. geol. Ges.*, 154/1, 85-100.
- Markkanen M. and Arvela H. (1992): Radon emanation from soils, *Radiation protection dosimetry*, 45, 1-4, 269-272.
- Morelli D., Catalano R., Filincieri R., Imme G. and Mangano G. (2015): Radon exhalation rate in south-east Sicily building materials, *Eur. Phys. J. Special Topics* 224, 605–610 (2015).
- Martin R.B. (1991): *Journal of chemistry education*, 68, 4, 275.
- Misdaq M.A. and Amghar A. (2005): Radon and thoron emanation from various marble materials: impact on the workers, *Radiation Measurements* 39 (2005) 421 – 430.
- Morrison H.I., Wigle D.T., Stocker H. and de Villiers A.J. (1981): Lung Cancer mortality and radiation exposure among Newfoundland fluospar miners, In *Proceedings of the International Conference on Radiation Hazards in Mining*, Society of Mining Engineers, New York, pp.372-376.
- Morrison H.I., Semeci R.M., Mao Y., Corkill D.A., Dory A.B., de Villiers A.J., Stocker H. and Wigle D.T. (1985): Lung cancer mortality and radiation exposure among the Newfoundland fluospar miners, In: *Proceedings of the International Conference on Occupational Radiation Safety in Mining*, Canadian Nuclear Association, Toronto, pp.365-368.
- Mostafa A.M.A., Yamazawa H., Uosif M.A.M. and Moriizumi J. (2015): Seasonal behavior of radon decay products in indoor air and resulting radiation dose to human respiratory tract, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, Volume 8, Issue 1, January 2015, Pages 142–147.
- Muller J., Wheeler W.C., Gentleman J.F., Suranyi G. and Kusiak R.A. (1985): Study of the mortality of Ontario miners, In *Proceedings of the International Conference on Occupational Radiation Safety in Mining*, pp.332-343 (Stocker, H. ed), Canadian Nuclear Association, Toronto.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (1987): (N.C.R.P.) Exposure of the population in the United States and Canada from natural background, NCRP Report No.94.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (2009): (N.C.R.P.) Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States, ISBN-13: 978-0-929600-98-7.
- National Research Council (1988): (N.R.C.) Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters, BEIR IV (Committee on Biological Effects of Ionizing Radiations), Report, National Academy Press, Washington D.C.
- Najzer M. and Sutej T. (1990): Passive dosimeter for radon determination in the environment, *Nuclear Tracks Radiation Measurements*, Vol. 17, No 1, p 49.
- Narayana Y., Somashekarappa H., Karunakara N., Balakrishna K., Siddappa K. and Kumar S. (1998): Seasonal Variation of indoor Radon levels in coastal Karnataka on the south west coast of India, *Radiation Measurements*, Vol 29, No 1, pp19-25.
- Nazaroff W. (1992): Radon Transport From Soil to Air, Department of Civil Engineering University of

California, Berkeley.

Nazaroff W.W., Barbara A.M. and 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. and Nero A.V. eds. New York, 1988.

Nemangwele F. (2005): Radon in the Congo Caves, University of the Western Cape.

Nikezic D. and Yu K.N. (1998): The influence of thoron and its progeny on radon measurements with CR-39 detectors in diffusion chambers; Nuclear Instruments and methods in Physics research; A 419; pp 175-180.

Nikolopoulos D., Louizi A., Papadimitriou D. and Proukakis C. (1997): Study of the Calibration of the Medical Physics Department Radon Dosimeter in a radon facility. –II, Extended abstracts of the Second Regional Mediterranean Congress on Radiation Protection, Tel-Aviv, Israel, November 16-20, pp.130-133.

Nikolopoulos D. Louizi A. Petropoulos N. Simopoulos S. and Proukakis C. (1999): Experimental study of cup-type dosimeters, Rad. Prot. Dosim. 83(3):263-266.

Nikolopoulos D., Louizi A., Koukoulidou V., Serefoglou A., Georgiou E., Ntalles K. and Proukakis C. (2002): Radon survey in Greece—risk assessment, Journal of Environmental Radioactivity.

Dumitru O., Onac B., Fornós J., Cosma C., Ginés A., Ginés J. and Merino A. (2015): Radon survey in caves from Mallorca Island, Spain, Science of the Total Environment 526, 2015.

Palombo M.R. and Zedda M. (2016): Surviving in a predator-free environment: Hints from a bone remodelling process in a dwarf Pleistocene deer from Crete, Comptes Rendus Palevol, Volume 15, Issues 1–2, January 2016, Pages 245–254.

Pantidakis A., Manoutsoglou E. and Markopoulos Th. (2012): Elevated Radon Concentration At The Entrance Of An Unused Old Coalmine Near An Urban Area, Western Crete, Greece. – 13th International Congress of the International Radiation Protection Association, 13-18 May, Glasgow, 2012.

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

Papachristodoulou C.A., Patiris D.L., Ioannides K.G. and Patiris K.G. (2010): Radiation Measurements Exposure to indoor radon and natural gamma radiation in public workplaces in north-western Greece Department of Physics, University of Ioannina, 451 10 Ioannina, Greece.

Papastefanou C., Manolopoulou M., Savvides E. and Charalambous S. (1986): Natural radiation dose in Petralona cave. Health Phys., 68, pp. 590-594

Papastefanou C., Manolopoulou M., Stoulos S., Ioannidou A. and Gerasopoulos E. (2005): Elevated radon concentrations in a Pleistocene cave operating as a show cave, Atomic and Nuclear Physics Laboratory, Aristotle University of Thessaloniki, Panepistimiou, 54124 Thessaloniki, Greece, International Congress Series 1276 (2005) 204–205.

Soujon A., Jacobshagen V. and Manutsoglu E. (1998): A lithostratigraphic correlation of the Plattenkalk occurrences of Crete (Greece). Bull. geol. Soc. Greece, 34, 41-48.

Szerbin P. (1996): Natural radioactivity of certain spas and caves in Hungary. *Environ. Int.*, 22, pp.389-398.

Phillippson A. (1892): *Der Peloponnes*, 642p.

Planinic J., Radolic V. and Lazanin Z. (2001): Temporal variations of radon in soil related to earthquakes. *Appl. Radiat. Isot.* 55, 267–272.

Poulakakis N., Mylonas M., Lymberakis P. and Fassoulas C. (2002): Origin and taxonomy of the fossil elephants of the island of Crete (Greece), problems and perspectives, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Volume 186, Issues 1–2, 1 October 2002, Pages 163–183.

Przylibski T.A. (1999): Radon concentration changes in the air of two caves in Poland, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 45, Issue 1, October 1999, Pages 81-94

Radolić V., Miklavčić I., Poje M., Stanić D. and Vuković B. (2011): Radon Levels in Manita Peć Cave (Croatian NP Paklenica) and Assessment of Effective Dose Received by Visitors and Tourist Guide, Department of Physics, University in Osijek, Trg Lj. Gaja 6, 31 000 Osijek, Croatia.

Ramsay W. and Gray R.W. (1910): La densité de l'emanation du radium. *Comptes rendus hebdomadaires des seances de l'Academie des sciences*, 151, pp. 126–128.

Renz C. (1940): *Die Tektonik der griechischen Gebirge*. Pragm. Akad. Athen, 8, 171p.

Rogers V.C. and Nielson K.K. (1991): Multiphase radon generation and transport in porous materials. *Health Phys.* 60, 807–815.

Rotger-Griful S., Hylsberg Jacobsen R., Nguyen D. and Sørensen G. (2016): Demand response potential of ventilation systems in residential buildings, *Energy and Buildings*, Volume 121, 1 June 2016, Pages 1-10.

Rutherford E. (1900): A radioactive substance emitted from thorium compounds. *Philosophical Mag.*, 40, pp. 1–4.

Rutherford E. and Brooks H.T. (1901): The new gas from radium. *Trans. R. Soc. Can.*, 7, pp. 21–25.

Rutherford E. and Owens R.B. (1899): Thorium and uranium radiation. *Trans. R. Soc. Can.*, 2, pp. 9–12.

Rutherford E. and Soddy F. (1902): The Radioactivity of Thorium Compounds I *Trans. Chem. Soc.*, 81, pp. 321-350.

Sahoo B.K., Nathwani Dipen, Eappen K.P., Ramachandran T.V., Gaware J.J. and Mayya Y.S. (2007): Estimation of radon emanation factor in Indian building materials, *Radiation Measurements* 42 (2007) 1422–1425

Sainz C., Santiago Quindos L., Fuente I., Nicolas J. and Quindos L. (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, 68–371.

Sajo- Bohus L., Greaves E. D., Palfalvi J., Urbani F. and Merlo G. (1997): Radon concentration measurements in Venezuelan caves using SSNTDs. *Rad. Meas.*, 28, pp. 725-728.

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.

Schott B. and Wiegand J. (2003): Processes of radionuclide enrichment in sediment and ground water of Mont Vully (Canton Fribourg, Switzerland), *Eclogae Geologicae Helvetiae* 96: p 99-107.

Seidel J.L., Monnin M., Cejudo J., Chalot J.F. and Segovia N. (1984): De la Cruz, S., Mena, M., Malavassi, E., Fernandez, E., Radon emanometry in active volcanoes. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 8, 411–414.

Seve J., Placek V., Smid A. and Stromp L. (1985): Lung cancer risk at low level of radiation exposure, 19th Annual Meeting of the European Society for Radiation Biology, Prague, August 26-30.

Singh M., Ramola R.C., Singh B., Singh S. and Virk H.S., (1991): Subsurface soil gas radon changes associated with earthquakes. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 19, 417–420.

Snihs J.O. (1973): The approach to radon problems in non-uranium mines in Sweden, In: *Proceedings of the 3rd International Congress of IRPA, USAEC, Report Conf. 730907*, pp.900-911.

Solomon S.B., Langroo R., Lyons R.G. and James J.M. (1996): Radon exposure to tour guides in Australian Show caves, *Environment International*, Vol. 22, Suppl. I, pp. S409-S413, 1996.

Speleological Expedition Lion (2013): SELAS Caving Club in co-operation with EOS Hanion Club (Hania, Crete) and the support of POA Mountaineering Club (Athens), Crete, Greece, August, 2013.

Sperrin M., Denman T. and Phillips P.S. (2000): Estimating the dose from radon to recreational cave users in the Mendips, UK, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 49, Issue 2, June 2000, Pages 235-240.

Stajic J.M and Nikezic D. (2014): Theoretical calculation of radon emanation fraction, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Volume 336, 1 October 2014, Pages 19–25.

Stejny J. (1987): The polymer physics of CR-39 - The state of understanding. *Rad Prot. Dosim.*, 20, pp. 31-36., 1987.

Surbeck H. (2007): Dissolved gases as natural tracers in karst hydrogeology; radon and beyond Center of Hydrogeology (CHYN), University of Neuchâtel, Emile-Argand 11, CH2007 Neuchâtel, Switzerland.

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

Tomozo S., Yasuyoshi G. and Takao I. (2012): Theoretical Basis for Measuring Small Radon Diffusion Coefficients for a Radium-Bearing Porous Material Generated by Precipitation of Iron (III) Hydroxide, *Journal of Nuclear Science and Technology*.

Toomey R.S. (2009): Geological monitoring of caves and associated landscapes.

Uhlig M. (1921): Über den Schneeberger Lungenkrebs, *Virchows Arch Pathol. Anat. Physiol.*, 230, pp. 76-98.

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

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000): (UNSCEAR) Sources and effects of ionizing radiation. Vol. I: Sources, United Nations Publications, New York. Available at [http:// www.unscear.org/2000vol1.htm](http://www.unscear.org/2000vol1.htm).

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2006): (UNSCEAR) Report to the General Assembly, with scientific annexes.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008): (UNSCEAR) Sources and effects of ionizing radiation, UN publications, 2008.

Vaupotic J., Csige I., Radolic V., Hunyadi I., Planinic J. and Kobal I. (2001): Methodology of radon monitoring and dose estimates in Postojna Cave Slovenia. *Health Phys.*, 80, pp. 142-147.

Virk H.S. and Walia V. (2001): Helium/radon precursory signals of Chamoli Earthquake, India, *Radiation Measurements*, Volume 34, Issues 1–6, June 2001, Pages 379-384, Volume 63, Issue 2, 2002, Pages 173–186.

Vukotic P., Dapcevic S., Saveljic N., Urarov V.V. and Kulakov V.M. (1997): Indoor radon concentrations in the town of Podgorica – Montenegro, *Radiation measurements*, Vol 28, 755-758.

World Health Organization (1988): (W.H.O.) International Agency for Research of Cancer IARC monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans : Man made mineral fibres and Radon, IARC Monograph, Lyon France, 43:54-55, 1988.

World Health Organization (1993): (W.H.O.) International Agency for Research of Cancer, Guidelines for Drinking-Water Quality - Second Edition - Volume 1 – Recommendations, Geneva, 1993.

World Health Organization (2009): (W.H.O.) International Agency for Research of Cancer, World health statistics, ISBN 97892 4 156381 9.

Wattananikorn K., Kanaree M. and Wiboolsake S. (1998): Soil gas radon as an earthquake precursor: some considerations on data improvement. *Radiat. Meas.* 29, 593–598.

Waxweiler R.J. (1981): Epidemiological problems associated with exposure to several agents. *Env. Health Persp.*, 42, pp. 51-56.

Waxweiler R.J., Roscoe R.J., Archer V.E., Thun. M.J., Wagoner K.J. and Ludin F.E. (1981): Mortality follow-up through 1977 of white underground miners cohort examined by the US-public health service, In *Proceedings of the International Conference on Radiation Hazards in Mining*, Society of Mining Engineers, New York, pp.823-830 (1981).

Whittemore A.S. and McMillan A. (1983): Lung cancer mortality among U.S. uranium miners, A reappraisal, *J Natl Cancer Inst*, 71:489-499 (1983).

Wilkening M.H. (1980): Radon transport processes below the earth's surface, in: T.F. Gesell and W.M. Lowder (Eds.) *Natural Radiation Environment* 111, Vol. 1, Technical Information Center, United States Department of Energy, Springfield, VA, 1980.

Wilkening M.H. (1990): Radon in the environment, Department of Physics, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, NM 8780 1, U.S.A. *Studies in Environmental Science* 40, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS B.V.

Wrixon A.D., Green B.M.R., Lomas P.R., Miles J.C.H., Cliff K.D., Francis E.A., Driscoll C.M.H., James A.C. and O’Riordan M.C., (1988): *Natural Radiation Exposure in UK Dwellings*. National, Radiological Protection Board Report R190, NRPB, Chilton, UK, 1988.

Xian-Zhen X., Lubin J.H., Jun-Yao L, Li-Fen Y., Qing Sheng L, Lan Y., Jian-Zhang W. and Blot W. (1993): A cohort study in southern China of tin miners exposed to radon and radon decay products. Health Phys 64(2): 120-131.

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

### **Παγκόσμιος Ιστός**

[1]: [https://en.wikipedia.org/wiki/Friedrich\\_Ernst\\_Dorn](https://en.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Ernst_Dorn)

[2]: <http://users.uoa.gr/~jalexopoulos/radioactivity.pdf>

[3]: <http://www.iaea.org/ns/tutorials/regcontrol/intro/glossary.htm>

[4]: <http://www.sciencedirect.com/>

### **Χρήσιμοι σύνδεσμοι**

[EPA, Environmental Protection Agency, USA](#)

[HPA, Health Protection Agency, UK](#)

[WHO, Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας](#)

[European Forum on Radon Mapping](#)

<http://www.sciencedirect.com/>

<http://www.esa.edu.gr/>

# Παράρτημα

Ημ/νία: 24/06/2016  
Α. Π.: ΥΠΠΟΑ/ΓΔΑΠΚ/ΕΠΣ/ΤΑΠΠ/44372/25181/597  
Απάντηση στο έγγραφο: ΥΠΠΟΑ/ΓΔΑΠΚ/ΕΠΣ/ΤΑΠΠ/44372/25181/597

**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ**  
**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ**  
**ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ**  
**ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ**  
**ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ**

**ΕΦΟΡΕΙΑ ΠΑΛΑΙΟΑΝΘΡΩΠΟΛΟΓΙΑΣ**  
**ΣΠΗΛΙΟΛΟΓΙΑΣ**

**Τμήμα Αρχαιοτήτων Προϊστορικών**  
**και Ιστορικών Περιόδων**

Ταχ. Δ/ση : Αρδηττού 348  
11636 Αθήνα  
Πληροφορίες : Η. Λιακόπουλος  
Τηλέφωνο : 2109232358, 2109224339  
Fax : 2109220322  
E-mail : [efps@culture.gr](mailto:efps@culture.gr)

**ΓΡΑΦΕΙΟ ΒΟΡΕΙΑΣ ΕΛΛΑΔΟΣ**  
Ταχ. Δ/ση : Ναυαρίνου 28  
55131 Καλαμαριά  
Θεσσαλονίκης  
Πληροφορίες : 2310410185  
Τηλέφωνο : 2310410185  
Fax : 2310410376

**ΠΡΟΣ:** κ. Δέσποινα Τσουκαλά  
**ΚΟΙΝ.:** Εφορεία Αρχαιοτήτων Χανίων  
Στοά Βαρδινογιάννη 4<sup>ος</sup> όροφος  
13134 Χανιά

**ΘΕΜΑ :** Χορήγηση στην κ. Δέσποινα Τσουκαλά άδειας εισόδου σε σπήλαια της Δυτικής Κρήτης με σκοπό τη μέτρηση συγκέντρωσης ραδονίου στα πλαίσια μεταπτυχιακής διατριβής.

**ΣΧΕΤ. :** Η υπ' αρ. 44372/25181/597/285/15.02.2016 αίτησή σας.

Σε απάντηση της παραπάνω σχετικής αίτησής σας, και λαμβάνοντας υπ' υπόψη τις διατάξεις του Ν. 3028/2002 (ΦΕΚ 153/Α/28.06.2002) «Για την προστασία των αρχαιοτήτων και εν γένει της Πολιτιστικής Κληρονομιάς», του Π.Δ. 104/2014 (ΦΕΚ 171/Α/28.08.2014) «Οργανισμός Υπουργείου Πολιτισμού και Αθλητισμού», καθώς και της υπ' αρ. ΥΠΠΟΑ/ΓΔΔΥ/ΔΟΕΠΥ/275923/40952/379 ΥΑ (ΦΕΚ 2891/Β/29.10.2014) «Μεταβίβαση αρμοδιοτήτων του Υπουργού Πολιτισμού και Αθλητισμού στις Περιφερειακές και Ειδικές Περιφερειακές Υπηρεσίες και στα Δημόσια Μουσεία αρμοδιότητας της Γενικής Διεύθυνσης Αρχαιοτήτων και Πολιτιστικής Κληρονομιάς και στις Περιφερειακές Υπηρεσίες αρμοδιότητας της Γενικής Διεύθυνσης Αναστήλωσης, Μουσείων και Τεχνικών Έργων του Υπουργείου Πολιτισμού και Αθλητισμού», σας γνωρίζουμε ότι χορηγούμε στην κ. Δέσποινα Τσουκαλά άδεια εισόδου σε σπήλαια της Δυτικής Κρήτης με σκοπό τη μέτρηση συγκέντρωσης ραδονίου στα πλαίσια μεταπτυχιακής διατριβής. Η άδεια χορηγείται για τα παρακάτω σπήλαια:

Στην ΠΕ Χανίων: Κρουονερίδα (πλησίον οικισμού Βαφές), Περιστερές, Καβρού Τρύπα, Κουρούπηδω, Καραθότοπος (και τα 4 βρίσκονται πλησίον οικισμού Κόκκινο Χωριό), Αγίου Ιωάννου Ερημίτη (πλησίον Μονής Γουβερνέτου στο Ακρωτήρι), Γουργούθακας, LO1, LO23, LO44, Λιοντάρι ή LO21 (και τα 5 στα Λευκά όρη), Ζουρές ή 98 Πατέρων (πλησίον οικισμού Αζογυρές Παλαιχωράδας), Ασφένδου, Τσαγκάρη (στα Σφακιά), Λεντάκα (πλησίον οικισμού Μελιδόνη), Τζανή ή Χώνος (στον Ομαλό), Αγκοκηπίου, ΜΑΙΧ (και τα 2 πλησίον της Σούδας), Λαχταρίδες (στην περιοχή Σκορδαλλού), Δαφνέ (πλησίον οικισμού Λιτσάδρα) και Νεροσπηλιά (πλησίον οικισμού Χωρδάκι Ακρωτηρίου).

Στην ΠΕ Ρεθύμνης: Simonelli, Αγίου Αντωνίου, Αγίου Νικολάου, Αγίου Σπυρίδωνα-Ιωάννη (και τα 4 πλησίον Ρεθύμνου), Γερανίου (πλησίον οικισμού Γεράνη), Αγίου Νικολάου, Ψιμάκη ή Σταθούρη (πλησίον Αργυρούπολης).

Η παρούσα άδεια χορηγείται με την προϋπόθεση ότι θα τηρηθούν οι εξής όροι:

1. Δε θα γίνει καμία επέμβαση ή αλλοίωση στο φυσικό περιβάλλον.
2. Δε θα μετακινηθεί οποιοδήποτε εύρημα αρχαιολογικό, ανθρωπολογικό, παλαιοντολογικό ή άλλο, αλλά σε περίπτωση εντοπισμού του θα ειδοποιηθεί η Εφορεία μας.
3. Θα κατατεθεί στην Υπηρεσία μας αντίγραφο της μεταπτυχιακής διατριβής...

Ο Προϊστάμενος της Εφορείας  
Ανδρέας Ι. Ντάρλας  
Αρχαιολόγος

Ακριβές Αντίγραφο  
Η Προϊσταμένη του Τμήματος Διοικητικής,  
Οικονομικής Υποστήριξης Φύλαξης & Ασφάλειας  
(Κατερίνη Σπανού)

**Εικόνα 30:** Άδεια χορήγησης εισόδου σε σπήλαια της Δυτικής Κρήτης στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

