



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

---

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

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΕ**  
**ΣΠΗΛΑΙΑ ΚΑΙ ΖΩΝΕΣ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Δέσποινα Α. Τσουκαλά**

Εξεταστική Επιτροπή :

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

---

Χανιά  
Οκτώβριος, 2013



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη έκλυσης ραδονίου και την συγκέντρωση αυτού σε σπηλαιώδεις δομές και σε ζώνες ρηγμάτων στην ευρύτερη περιοχή του νομού Χανίων, στην Δ. Κρήτη. Για τον λόγο αυτό τοποθετήθηκαν 6 παθητικοί ανιχνευτές ραδονίου τύπου CR-39 σε αντίστοιχο αριθμό σπηλαίων και σπηλαιοβαθάρων για χρονικό διάστημα 3 μηνών, οι οποίοι κατέγραψαν την συγκέντρωση και τιμές διαφυγής στην ατμόσφαιρα του στοιχείου αυτού αντίστοιχα. Έπειτα από επεξεργασία, παρατίθενται οι τιμές των μετρήσεων και τα συμπεράσματα από την αξιολόγηση τους και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα αντίστοιχων μελετών συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια που διενεργήθηκε σε παγκόσμια κλίμακα.

Σε τρεις διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς, τρία σπήλαια εκ των οποίων ένα κλειστό και δύο σπηλαιοβάραθρα, έχουν δημιουργηθεί σε πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων και ένα σπήλαιο σε πετρώματα της ενότητας του Τρυπαλίου. Τα άλλα δύο σπήλαια έχουν σχηματιστεί εντός των ανθρακικών σχηματισμών του Νεογενούς. Τέσσερις από τις σπηλαιώδεις δομές είναι κλειστά σπήλαια ενώ δύο είναι ανοιχτά σπηλαιοβάραθρα. Οι μεγαλύτερες τιμές μετρήθηκαν στο κλειστό σπήλαιο της Κρυονερίδας (εντός των πετρωμάτων της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων) με συγκέντρωση ραδονίου ίση με  $2207 \text{ Bq/m}^3$  και εντός των σπηλαίων του Νεογενούς, σπήλαιο Καραβότοπος και σπήλαιο των Κουρουπήδων, με αντίστοιχες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου  $1687 \text{ Bq/m}^3$  και  $1374 \text{ Bq/m}^3$ . Αξιοσημείωτο είναι ότι στα δύο σπηλαιοβάραθρα (που συνδέονται άμεσα με ρήγματα και σχηματίστηκαν εντός των πετρωμάτων της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων) μετρήθηκαν σχετικά υψηλές τιμές διαφυγής ραδονίου στην ατμόσφαιρα: Η τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου στο Σπήλαιο Περιστέρε είναι  $275 \text{ Bq/m}^3$  ενώ αντίστοιχα στο σπήλαιο του «Καβρού η τρύπα» είναι  $110 \text{ Bq/m}^3$ . Η μικρότερη τιμή συγκέντρωσης ραδονίου ( $74 \text{ Bq/m}^3$ ) μετρήθηκε στο σπήλαιο «του Αγίου Ιωάννη του Ερημίτη» που έχει σχηματιστεί εντός των πετρωμάτων της ενότητας του Τρυπαλίου.

Τα ανωτέρω καταδεικνύουν ότι: α) οι τεκτονοκαρστικές δομές που μετρήθηκαν στα πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων εμφανίζουν αυξημένες τιμές είτε συγκέντρωσης είτε διαφυγής ραδονίου, β) αυξημένες τιμές ραδονίου εμφανίζουν τα σπήλαια εντός των ασβεστολιθικών πετρωμάτων του Νεογενούς που πιθανώς η πηγή προέλευσης του ραδονίου σχετίζεται με τις εμφανίσεις λιγνιτών που υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή, γ) από τα παραπάνω κρίνεται αναγκαία η συστηματική μελέτη τόσο των ρηγμάτων – τεκτονοκαρστικών σπηλαίων που έχουν σχηματιστεί σε πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων όσο και οι αντίστοιχες δομές στα ανθρακικά του Νεογενούς.

**Λέξεις κλειδιά:** Ραδόνιο, θυγατρικά ραδιοϊσότοπα, ακτινοβολία α και γ, σπήλαια, καρστ, ρήγματα, παθητικοί και ενεργητικοί ανιχνευτές ραδονίου, CR-39.

## ABSTRACT

This thesis focuses on releases and concentration of radon in caves and fracture zones in the area of Chania, in western Crete. For this purpose, 6 passive radon detectors CR-39 were placed to corresponding number of caves for 3 months period, which recorded the concentration of radon. After the necessary processing, the measurements and the results of their evaluation are provided and comparison with results of relevant studies of radon concentration in caves worldwide, as well.

In three different geological formations, three caves, of which one is closed and two are vertical, are created in rock of the Plattenkalk Group and one cave in rock of the "Tripali Unit". The other two caves are formed in the carbonate formations of the Neogene. Four of the caves are closed and two of them are open vertical caves. The highest values were measured in the close cave "Krionerida" (in rock of Plattenkalk) with radon concentration up to 2207 Bq/m<sup>3</sup>, and in the caves of the Neogene, "Karavotopos" and "Kouroupidon", where the values of radon concentration are 1687 Bq/m<sup>3</sup> and 1374 Bq/m<sup>3</sup>. It is noteworthy that in the two vertical caves (which are connected to each other through fractures and formed in Plattenkalk), high values of radon releases into the atmosphere were measured. The radon concentration in "Peristere" cave is 275 Bq/m<sup>3</sup> while in the cave "Kavrou i Tripa " is 110 Bq/m<sup>3</sup>. The lowest radon concentration (74 Bq/m<sup>3</sup>) was measured at the cave "Ag. Ioanni Erimiti ", formed in the rocks of the "Tripali Unit".

The above show that a) the tectonic-karst structures in rock of Plattenkalk Group have high radon concentration or releases, b) elevated values of radon were detected in caves within the limestone of the Neogene and probably the source of radon is associated with the presence of lignite in the region, c) of the above it is proved the necessity of systematically study of fractures and caves formed both in rock of Plattenkalk Group and in carbonates of the Neogene.

**Keywords:** radon, progeny radioisotopes, radiation  $\alpha$  and  $\gamma$ , caves, karst, fractures, active and passive radon detectors, CR-39.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση και η αξιολόγηση της συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια και ζώνες ρηγμάτων. Οι μετρήσεις ραδονίου πραγματοποιήθηκαν με την χρήση παθητικού ανιχνευτή CR-39, τρίμηνης διάρκειας, σε έξι σπήλαια της ευρύτερης περιοχής του νομού Χανίων, στην Δ.Κρήτη. Οι μετρήσεις έγιναν σε συνεργασία με την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας και τον κ.Κωνσταντίνο Ποτηριάδη (Ειδικός Λειτουργός Επιστήμονας βαθμίδας Α').

Η εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια. Στο **1<sup>ο</sup> κεφάλαιο** γίνεται μία γενική αναφορά για το ραδόνιο και τις ιδιότητες του, τη προέλευση και τη σημασία μέτρησης του, ενώ, στο **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο** περιγράφεται η παρουσία ραδονίου σε σπήλαια και σε άλλους γεωλογικούς σχηματισμούς (φαινόμενο καρστ, ρήγματα). Στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου καθώς οι υπάρχουσες μετρητικές διατάξεις. Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** γίνεται ένα γεωλογικό περίγραμμα των έξι σπηλαίων στα οποία τοποθετήθηκαν οι μετρητές. Στο **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ραδονίου. Τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις, καθώς προοπτικές για μελλοντικές έρευνες. (**6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο**). Στο **παράρτημα** δίνονται τα ισχύοντα νομοθετικά μέτρα για τις οριακές τιμές ραδονίου και επιπλέον οι χαρτογραφήσεις των σπηλαίων.

## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, μετά το πέρας της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διατηρώ το ίδιο συναίσθημα ενθουσιασμού με την πρώτη στιγμή που πήρα τους μετρητές Ραδονίου στα χέρια μου, κι αυτό γιατί ένα από τα θέματα που πραγματεύεται, είναι τα σπήλαια, που αποτελούν αντικείμενο μιας από τις αγαπημένες μου δραστηριότητες, την σπηλαιοεξερεύνηση. Για την στήριξη αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Μαρία Κολοβού από το τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος (Ε.Ε.Α.Ε) για την ουσιαστική βοήθειά της στις μετρήσεις.

Κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής δέχτηκα βοήθεια από πάρα πολλά άτομα, καθώς η πρόσβαση στα σπήλαια είναι πάντα ομαδική, έτσι για να μην μακρηγορήσω, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της Σπηλαιολογικής Ομάδας του Ελληνικού Ορειβατικού Συλλόγου Χανίων, καθώς και όλους τους φίλους που συμμετείχαν και έδωσαν ξεχωριστή νότα στις αποστολές.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω την στήριξη που είχα όλα αυτά τα χρόνια από τους γονείς και την οικογένειά μου.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	1
1.1 Γενικά για το Ραδόνιο .....	2
1.2 Φυσικές και χημικές Ιδιότητες Ραδονίου .....	3
1.2.1 Μονάδες μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου .....	6
1.3 Σχηματισμός, Εκροή και Διαφυγή Ραδονίου .....	8
1.4 Ραδόνιο στα οικοδομικά υλικά και τα κτήρια .....	12
1.4.1 Επιπτώσεις στην υγεία .....	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΡΑΔΟΝΙΟ ΣΕ ΣΠΗΛΑΙΑ</b>	
2.1 Ο Όρος Κάρστ και Καρστικοποίηση .....	16
2.2 Σπηλαιογένεση .....	19
2.3 Ρήγματα .....	22
2.4 Έρευνες σε σπήλαια .....	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</b>	
3.1 Γενικά για τις τεχνικές ανίχνευσης .....	30
3.1.1 Παθητικοί ανιχνευτές .....	31
3.1.2 Ενεργητικοί ανιχνευτές .....	37
3.2 Αρχή Λειτουργίας Ανιχνευτή CR-39 .....	40
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΩΝ ΣΠΗΛΑΙΩΝ</b>	
4.1 Περιγραφή των σπηλαίων .....	43
4.2 Γεωτεκτονική περιγραφή των σπηλαίων .....	52
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΑΠΟ ΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b> .....	59
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b> .....	64
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΕΙΣ .....	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ .....	76

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1.1:</b> Φυσικές ιδιότητες του ραδονίου.....	2
<b>Πίνακας 1.2:</b> Ραδιενεργός σειρά Ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ). .....	4
<b>Πίνακας 1.3:</b> Μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας και συντελεστές μετατροπής.....	8
<b>Πίνακας 2.1:</b> Απεικόνιση αποτελεσμάτων της κατανομής συγκέντρωσης του ραδονίου σε σχέση με την λογαριθμική κατανομή περιεκτικότητας ραδονίου σε 220 σπήλαια παγκόσμιας κλίμακας.....	28
<b>Πίνακας 3.1:</b> Σύνοψη κυριότερων χαρακτηριστικών ανιχνευτών ραδονίου.....	40
<b>Πίνακας 4.1:</b> Ονομασία και περιοχή σπηλαίων.....	43
<b>Πίνακας 4.2:</b> Στίγματα εισόδων σπηλαίων.....	44
<b>Πίνακας 5.1:</b> Κωδικοί μετρητών ραδονίου και χρονική διάρκεια μέτρησης τους.....	60
<b>Πίνακας 5.2:</b> Μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας στα αντίστοιχα σπήλαια.....	60
<b>Πίνακας 5.3:</b> Αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης ραδονίου.....	61
<b>Πίνακας 5.4:</b> Συγκριτική απεικόνιση αποτελεσμάτων της κατανομής της συγκέντρωσης του ραδονίου σε σχέση με την λογαριθμική κατανομή περιεκτικότητας ραδονίου σε 220 σπήλαια παγκόσμιας κλίμακας.....	62
<b>Πίνακας Α:</b> Οι περιοχές με τη μεγαλύτερη συσσώρευση ραδονίου στην Ελλάδα.....	72
<b>Πίνακας Β:</b> Όρια συγκέντρωσης στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών.....	76

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 3.1:</b> Παθητικοί ανιχνευτές καταγραφής ιχνών.....	32
<b>Εικόνα 3.2:</b> Εικόνες από ίχνη διασπάσεων ραδονίου σε διαφορετικές αναλύσεις.....	34
<b>Εικόνα 3.3:</b> Τυπική εικόνα ιχνών διασπάσεων ραδονίου σε ανιχνευτή CR-39.....	35
<b>Εικόνα 3.4:</b> Ενεργητικός ανιχνευτής AlphaGUARD.....	39
<b>Εικόνα 3.5:</b> Παθητικός ανιχνευτής CR-39 που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας.....	42
<b>Εικόνα 4.1:</b> Θέσεις των σπηλαίων που έγιναν οι μετρήσεις στο Ν.Χανίων.....	45
<b>Εικόνα 4.2:</b> Είσοδος σπηλαίου Κρυονερίδας στο Βαφέ.....	46
<b>Εικόνα 4.3:</b> Κολώνα από την ένωση σταλακτίτη και σταλαγμίτη στο σπήλαιο του Αγ.Ιωάννη στο Γουβερνέτο.....	47
<b>Εικόνα 4.4:</b> Μικροί σταλακτίτες στο σπήλαιο του Καβρού στο Κόκκινο χωριό.....	48
<b>Εικόνα 4.5:</b> Αίθουσα στο σπήλαιο των Κουρουπιδών στην Αλμυρίδα.....	49
<b>Εικόνα 4.6:</b> Είσοδος σπηλαιοβάραθρου Περιστερέ στο Κόκκινο χωριό.....	50
<b>Εικόνα 4.7 :</b> Είσοδος σπηλαίου Καραβότοπος στην Αλμυρίδα.....	51
<b>Εικόνα 4.8:</b> Τμήμα του Γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:500.000. με κίτρινες και πράσινες αποχρώσεις οι λεκάνες του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς..	52
<b>Εικόνα 4.9:</b> Παλαιογεωγραφική εξέλιξη των Νεογενών ιζημάτων στην Κρήτη.....	57
<b>Εικόνα 4.10:</b> Νεοτεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής της βόρειας ζώνης του νομού Χανίων Κρήτης στον οποίο έχουν σημειωθεί τα ρήγματα της γεωλογικής χαρτογράφησης του Ι.Γ.Μ.Ε, καθώς και η θέση των υπό μελέτη σπηλαίων (τροποποιημένος χάρτης από Μουντράκης, 2002).....	58
<b>Εικόνα β<sub>1</sub> :</b> Χαρτογράφηση Σπηλαίου του «του Καβρού η τρύπα».....	73
<b>Εικόνα β<sub>2</sub> :</b> Χαρτογράφηση Σπηλαίου του «του Αγ. Ιωάννη του Ερημίτη».....	74
<b>Εικόνα β<sub>3</sub> :</b> Χαρτογράφηση Σπηλαίου των Κουρουπιδών.....	75

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1.1:</b> Περιοδικός πίνακας χημικών στοιχείων και δομή Ραδονίου.....	2
<b>Σχήμα 1.2:</b> Διάσπαση ραδονίου σε μόλυβδο.....	5
<b>Σχήμα 1.3. :</b> Διεσδυτικότητα των διαφόρων τύπων ακτινοβολίας.....	7
<b>Σχήμα 1.4:</b> Σχηματισμός, εκροή και διαφυγή ραδονίου από γεωλογικούς σχηματισμούς - Έξοδος ραδονίου από το έδαφος.....	10
<b>Σχήμα 1.5:</b> Ραδόνιο στα κτήρια.....	12
<b>Σχήμα 1.6:</b> Είσοδος ραδονίου και θυγατρικών του στον ανθρώπινο οργανισμό.....	14
<b>Σχήμα 1.7:</b> Συνεισφορά των διαφόρων πηγών ακτινοβολήσης στη μέση ετήσια δόση σύμφωνα με την UNSCEAR 93 (2.4 mSv).....	15
<b>Σχήμα 2.1:</b> Παραδείγματα καρστικοποιημένων δομών.....	18
<b>Σχήμα 2.2:</b> Σπήλαιο, ένα φαινόμενο καρστικοποίησης.....	20
<b>Σχήμα 2.3:</b> Κύκλος νερού και σχηματισμός σπηλαίων.....	22
<b>Σχήμα 2.4 :</b> Οι κυριότεροι τύποι ρηγμάτων.....	25



# 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην καθημερινή μας ζωή συνυπάρχουμε με ακτινοβολίες, καθώς μας περιβάλλουν φυσικές και τεχνητές πηγές ακτινοβολίας. Τα φυσικά ραδιοϊσότοπα προϋπάρχουν στη γη από τη στιγμή της δημιουργίας της. Τα κυριότερα είναι το ουράνιο, το θόριο, το κάλιο και τα θυγατρικά τους ραδιοϊσότοπα. Στην ραδιενεργή σειρά του ουρανίου ανήκει το ευγενές χημικό αέριο στοιχείο με το όνομα Ραδόνιο (Rn). Τα φυσικά ραδιοϊσότοπα, εκτός από το έδαφος και τα ορυκτά, ανιχνεύονται στο νερό, στον αέρα, στους ζώντες οργανισμούς, στις τροφές και τα οικοδομικά υλικά. Τα τεχνητά ραδιοϊσότοπα είναι ανθρωπογενή και παράγονται στο πλαίσιο των εφαρμογών της πυρηνικής τεχνολογίας και των πυρηνικών επιστημών στη βιομηχανία, την ενέργεια, την υγεία, και άλλους τομείς.

Τα τελευταία χρόνια αυξημένο ενδιαφέρον παρουσιάζει παγκοσμίως αλλά και στην Ελλάδα, η μελέτη της έκλυσης του ραδονίου και ο τρόπος που αυτή μπορεί να φανεί χρήσιμη στη γεωλογία και σε άλλες επιστήμες. **Ο εντοπισμός πρώτων υλών όπως το ουράνιο και το πετρέλαιο, ο καθορισμός γεωθερμικών πηγών ενέργειας, η χαρτογράφηση ρηγμάτων, η πρόγνωση σεισμών, η μελέτη ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι αντικείμενα στα οποία η συστηματική έρευνα μελέτης ραδονίου μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες.** Πέραν όμως όλων αυτών και συμπληρωματικά στα πλαίσια της έρευνας για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, γίνονται μετρήσεις για την έκλυση του ραδονίου σε φυσικούς σχηματισμούς αλλά και σε κτήρια, καθώς το στοιχείο αυτό μετά την διάσπαση και είσοδό του στην ατμόσφαιρα έρχεται σε άμεση επαφή με τον άνθρωπο και τις δραστηριότητες του. Τα σπήλαια αποτελούν μορφοτεκτονικές δομές που από την δομή τους αλλά και από την θέση δημιουργία τους μπορούν να συνεισφέρουν στην έρευνα της έκλυσης του ραδονίου.

## 1.1 Γενικά για το Ραδόνιο

Το Ραδόνιο (Radon) ανακαλύφθηκε το 1900 από τον Γερμανό φυσικό Φρήντιχ Ερστ Ντόρν και αποτελεί το τρίτο κατά σειρά ραδιενεργό στοιχείο που βρέθηκε μετά το ράδιο και το πολώνιο. Αρχικά το ονόμασε «απόρροια ραδίου» (radiumemanation) διότι προερχόταν από υλικά που περιείχαν ράδιο, ενώ τελικά, το 1923 προτάθηκε το όνομα ραδόνιο. Το 1908 οι Ramsay και Gray το απομόνωσαν, προσδιόρισαν την πυκνότητά του και διαπίστωσαν ότι αποτελεί το βαρύτερο από τα ευγενή αέρια. Οι φυσικές ιδιότητες του Ραδονίου φαίνονται στον Πίνακα 1.1.

Το χημικό στοιχείο Ραδόνιο με σύμβολο Rn (Σχήμα 1.1) είναι άχρωμο, άγευστο, άοσμο και εμφανίζει 27 ισοτοπικές μορφές από το  $^{200}\text{Rn}$  έως το  $^{226}\text{Rn}$ . Το πιο σταθερό του ισότοπο είναι το  $^{222}\text{Rn}$  με χρόνο ημιζωής 3,81 ημέρες, ατομικό αριθμό 86 και ατομικό βάρος 222. Η ηλεκτρονιακή του δομή είναι  $1s^2 2s^2 2p^6 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$ .

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

Πυκνότητα σε κανονικές συνθήκες	9.96 Kgr/m <sup>3</sup>
Σημείο εξάτμισης σε πίεση 1 atm	-61,8 °C
Σημείο τήξης	-71 °C
Κρίσιμη θερμοκρασία	104 °C
Κρίσιμη πίεση	62 atm
Ιξώδες σε πίεση 1 atm και θερμοκρασία 20°C	0.229 poise
Διαλυτότητα σε υγρά υπό πίεση 1 atm και θερμοκρασία 18°C	
-Νερό	230 cm <sup>3</sup> /Kgr
-Αιθυλική αλκοόλη	7,4 cm <sup>3</sup> /Kgr
-Υγρή παραφίνη	9,2 cm <sup>3</sup> /Kgr
-Λάδι ελιάς	29 cm <sup>3</sup> /Kgr

The image contains a periodic table of elements and a diagram of a radon atom. The periodic table is a standard layout with elements grouped by their chemical properties. The radon atom diagram shows a central nucleus with 86 protons and 136 neutrons, surrounded by six electron shells. An arrow points from the radon element in the periodic table to the atom diagram.

Σχήμα 1.1: Περιοδικός πίνακας χημικών στοιχείων [Link: 1] και δομή ραδονίου. [Link: 2]

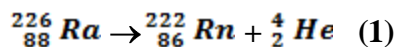
## 1.2 Φυσικές και χημικές Ιδιότητες Ραδονίου

Με τον όρο φυσική ραδιενέργεια εννοούμε την ιονίζουσα ακτινοβολία από πηγές που προϋπάρχουν στη φύση ή δημιουργούνται με τρόπο φυσικό σε αντίθεση με τη ραδιενέργεια που εκλύεται από ανθρώπινες δραστηριότητες (τεχνητή ραδιενέργεια). Κατατάσσεται σε δύο κατηγορίες:

- Την **Κοσμική** ακτινοβολία, δηλαδή το σύνολο της ιονίζουσας 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 ραδιενεργών σειρών, του Ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ), του Θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ) και του Ακτινίου ( $^{235}\text{U}$ ). Επιπλέον, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν παραχθεί μερικές εκατοντάδες τεχνητών ραδιενεργών ισωτόπων, τα οποία περιλαμβάνουν τα γνωστά κέσιο-137, στρόντιο-90 και ιώδιο-131.

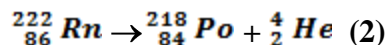
Ένα από τα μέλη της ραδιενεργούς σειράς του Ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ) (Πίνακας 1.2) είναι και το  $^{222}\text{Rn}$ . Το ραδόνιο ( $^{222}\text{Rn}$ ) παράγεται με  $\alpha$ -διάσπαση του ασταθούς ισωτόπου  $^{226}\text{Ra}$  και δίνει ένα σύνολο ισωτόπων που είναι γνωστά ως θυγατρικά του ραδονίου.



Η μέση κινητική ενέργεια ανά ζεύγος φορτισμένων σωματίων ( $^{222}_{86}\text{Rn}$  και  $^4_2\text{He}$ ) που παράγεται κατά την αντίδραση- $\alpha$  του  $^{226}\text{Ra}$ , είναι:

$$E_{\alpha} = 0.946 \times (4.78\text{MeV}) + 0.054 \times (4.60\text{MeV}) = 4.77 \text{ MeV}$$

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

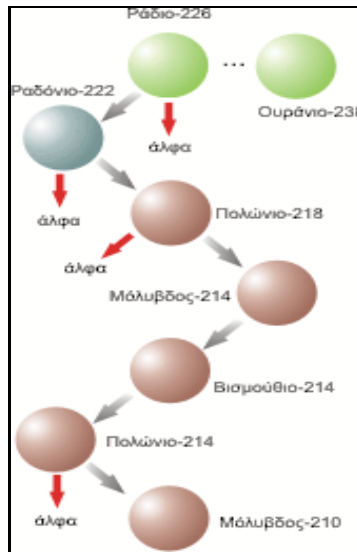


**Πίνακας 1.2:** Ραδιενεργός σειρά Ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ). [Link: 4]

Στοιχείο	Z	Εκπομπή	Χρόνος ημιζωής
Ουράνιο-238	92	$\alpha$	$4,51 \times 10^9$ έτη
Θόριο-234	90	$\beta, \gamma$	24,1 ημέρες
Προτακτίνιον-234	91	$\beta, \gamma$ ή $\beta$	1,18 λεπτά 6,7 ώρες
Ουράνιο-234	92	$\alpha$	$2,48 \times 10^5$ έτη
Θόριο-230	90	$\alpha$	$8 \times 10^4$ έτη
Ράδιον-226	88	$\alpha, \gamma$	1622 έτη
Ραδόνιον-222	86	$\alpha$	3,825 ημέρες
Πολώνιον-218	84	$\alpha, \beta$	3,05 λεπτά
Μόλυβδος-214	82	$\beta, \gamma$	26,8 λεπτά
Αστάτιο-218	85	$\alpha$	2 δευτερόλεπτα
Βισμούθιο-214	83	$\beta, \alpha, \gamma$	19,7 λεπτά
Πολώνιον-214	84	$\alpha$	$1,6 \times 10^{-4}$ δευτερόλεπτα
Θάλλιον-210	81	$\beta, \gamma$	1,3 λεπτά
Μόλυβδος-210	83	$\beta, \gamma$	20 έτη
Βισμούθιο-210	83	$\beta, \alpha$	5,0 ημέρες
Πολώνιον-210	84	$\alpha$	138,4 ημέρες
Θάλλιον-206	81	$\beta$	4,2 λεπτά
Μόλυβδος-206	82	Σταθερό	

Και τα δύο ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ) αποτελούν μέλη της σειράς του ουρανίου  $^{238}\text{U}$ , όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Το  $^{238}\text{U}$  συναντάται στη γη με τη μορφή  $\text{UO}_2$  και η συγκέντρωση του διαφέρει σημαντικά από τόπο σε τόπο, με τη μέγιστη να παρατηρείται στα κοιτάσματα φυσικού ουρανίου, όπου το  $\text{UO}_2$  είναι περίπου το 0.1 μέχρι 0.5% της μάζας του ορυκτού.

Η διάσπαση του καθώς και η δευτερεύουσα διάσπαση των θυγατρικών του ολοκληρώνεται με το σχηματισμό σταθερού μολύβδου (Σχήμα 1.3).



**Σχήμα 1.2:** Διάσπαση ραδονίου σε μολύβδο. [Link: 3]

Οι πιο συνηθισμένες ακτινοβολίες, κατά τη διάσπαση φυσικών ραδιενεργών πυρήνων είναι:

- **ακτινοβολία α:** όπου ο ραδιενεργός πυρήνας εκπέμπει ένα σωματίδιο α (πυρήνα ηλίου  ${}^4_2\text{He}$ ).
- **ακτινοβολία β:** πρόκειται για ηλεκτρόνιο που εκπέμπεται από τον πυρήνα, κατά τη μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο (εκπομπή σωματιδίου β-) ή εκπομπή ηλεκτρονίου κατά τη μετατροπή ενός πρωτονίου του πυρήνα σε νετρόνιο (εκπομπή σωματιδίου β+).
- **ακτινοβολία γ:** 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 (0,1 έως 10 MeV περίπου).
- **Απορροφούμενη δόση:** καλείται η ενέργεια που εναποθέτει οποιαδήποτε ραδιενεργή ακτινοβολία συμπεριλαμβανομένης της γ και X σε οποιοδήποτε

υλικό. Μονάδα της απορροφούμενης δόσης ορίζεται στο διεθνές σύστημα το Gray (Gy) και ισχύει  $1\text{Gy}=1\text{ Joule/kg}$ .

- **Ισοδύναμη ή βιολογική δόση:** Ορίζεται ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης με έναν συντελεστή ποιότητας  $Q$ , ο οποίος λαμβάνεται κατά περίπτωση από πίνακα ανάλογα με την ενέργεια της ακτινοβολίας. Μονάδα της ισοδύναμης δόσης στο διεθνές σύστημα είναι το Sievert (Sv) και ισχύει ότι:  $\text{Ισοδύναμη δόση (Sv)}=\text{απορροφούμενη δόση (Gray)} \times Q$ . (Κασινάλης, 2008)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διεισδυτικότητα των διαφόρων τύπων ακτινοβολίας σε διάφορα υλικά μέσα.

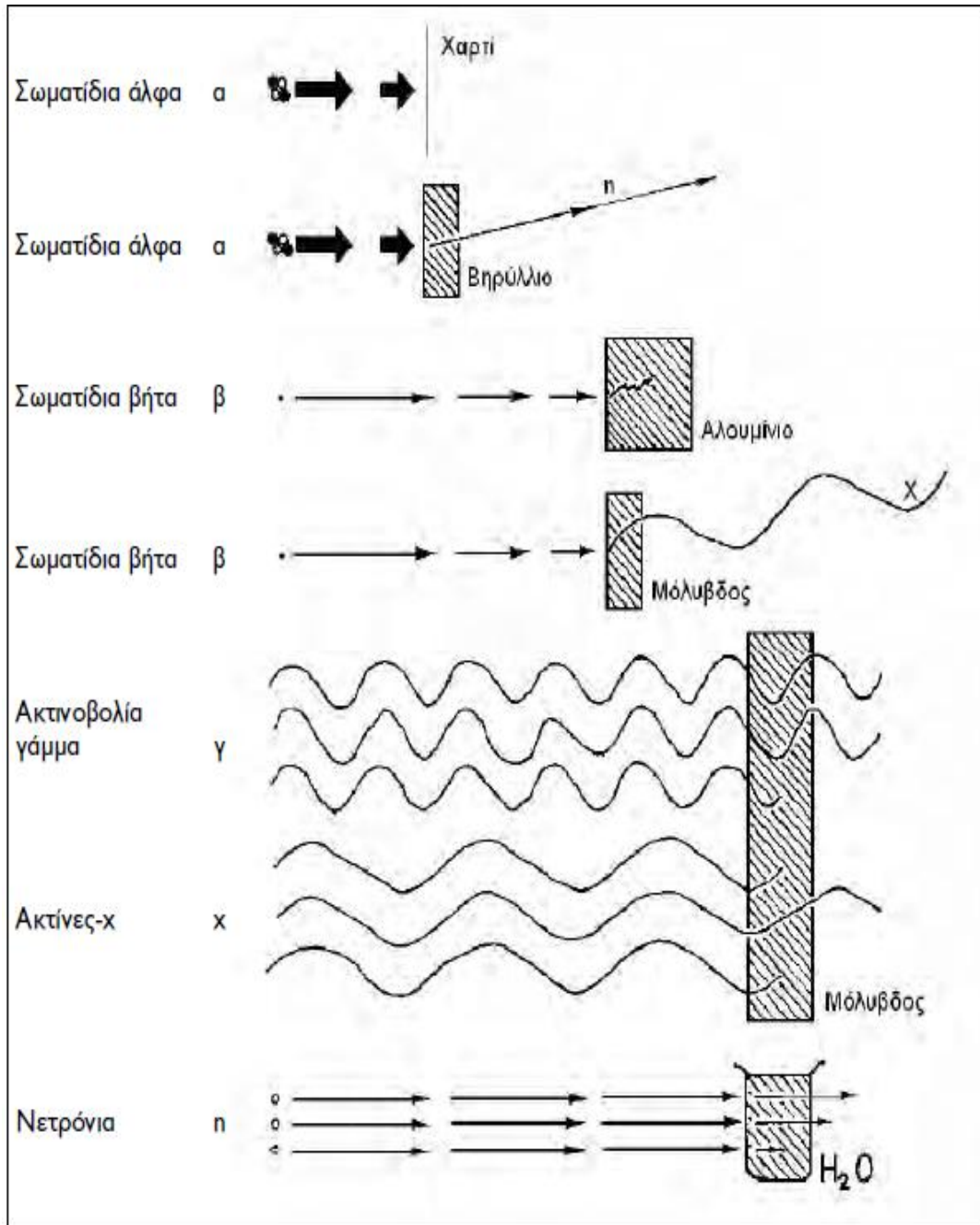
### 1.2.1 Μονάδες μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου

Στην συνέχεια αναφέρονται διάφορες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου, για αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν αρχικά οι μονάδες μέτρησης του στοιχείου, έτσι ώστε να είναι κατανοητά τα αποτελέσματα και η τάξη μεγέθους τους.

Η μονάδα μέτρησης της δραστηριότητας των ραδιενεργών πυρήνων είναι το Bq (μπεκερέλ). Το μπεκερέλ πήρε το όνομά του από τον Γάλλο επιστήμονα Ανρί Μπεκερέλ, 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 (ή μετασχηματισμός) ανά δευτερόλεπτο.

Το αποτέλεσμα μίας μέτρησης της συγκέντρωσης Ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$ ) με παθητικούς ανιχνευτές μπορεί, λοιπόν, να εκφράζεται σε  $\text{Bq/m}^3$ . Εκφράζει τη μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου που είναι και η πλέον αντιπροσωπευτική για τον εσωτερικόαέρα. Δηλαδή, 1  $\text{Bq/m}^3$  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,  $\mu\text{Ci}$  και

pCi. Αυτή η μονάδα μέτρησης πήρε το όνομά της από τη Φυσικό Marie Curie, η οποία ήταν η πρωτοπόρος στην έρευνα πάνω σε ραδιενεργά στοιχεία και στις διασπάσεις τους .  
 1 pCi είναι ίσο με τη διάσπαση 0,037 ραδιενεργών ατόμων ανά λεπτό. [Link:5]



**Σχήμα 1.3:** Διεσδυτικότητα των διαφόρων τύπων ακτινοβολίας, (Υπ.Εργασίας.Κοιν.Ασφαλίσεων, 2009).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μετατροπές που απαιτούνται από την μία μονάδα μέτρησης στην άλλη:

**Πίνακας 1.3:** Μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας και συντελεστές μετατροπής. \* Δίνονται οι ορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά για τον ορισμό του φυσικού μεγέθους, [Link:12].

Μονάδα	Ορισμός	Μετατροπή
<b>R (ραίντγκεν)</b>	Ακτινοβολία που απαιτείται για να παραχθεί 1 ηλεκτροστατική μονάδα φορτίου (e.s.u), σε 1 cm <sup>3</sup> αέρα (υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας)*	1 e.s.u. φορτίου=2,083x10 <sup>15</sup> ιόντα/m <sup>3</sup>
<b>Bq (μπεκερέλ)</b>	1 πυρηνική διάσπαση/s	1Bq=27pCi
<b>Ci (κιουρί)</b>	Ακτινοβολία 1 g <sup>226</sup> Ra	1 Ci=3,7x10 <sup>10</sup> Bq
<b>pCi/L</b>	Η ενεργότητα ανά μονάδα όγκου (συνήθως χρησιμοποιείται μετρηθείσα σε υγρά)	1 pCi/L=37 Bq/m <sup>3</sup>

### 1.3 Σχηματισμός, Εκροή και Διαφυγή Ραδονίου

Στο σημείο αυτό παρατίθενται οι φυσικοί μηχανισμοί σχηματισμού, εκροής και μεταφοράς του ραδονίου.

Το γεγονός ότι το ραδόνιο ανήκει στην ραδιενεργό σειρά του ουρανίου εξηγεί τη παρουσία <sup>222</sup>Rn στους κόκκους των πετρωμάτων και εδαφών και παρότι το ουράνιο και το ράδιο είναι στερεά στοιχεία και εγκλωβίζονται εκεί, αυτό, όντας αέριο, μπορεί να διαφύγει.

Η ικανότητα σχηματισμού ραδονίου σε πετρώματα και εδάφη καθορίζεται από την περιεκτικότητα των κόκκων σε ράδιο, η οποία καταχρηστικά ταυτίζεται με την ειδική

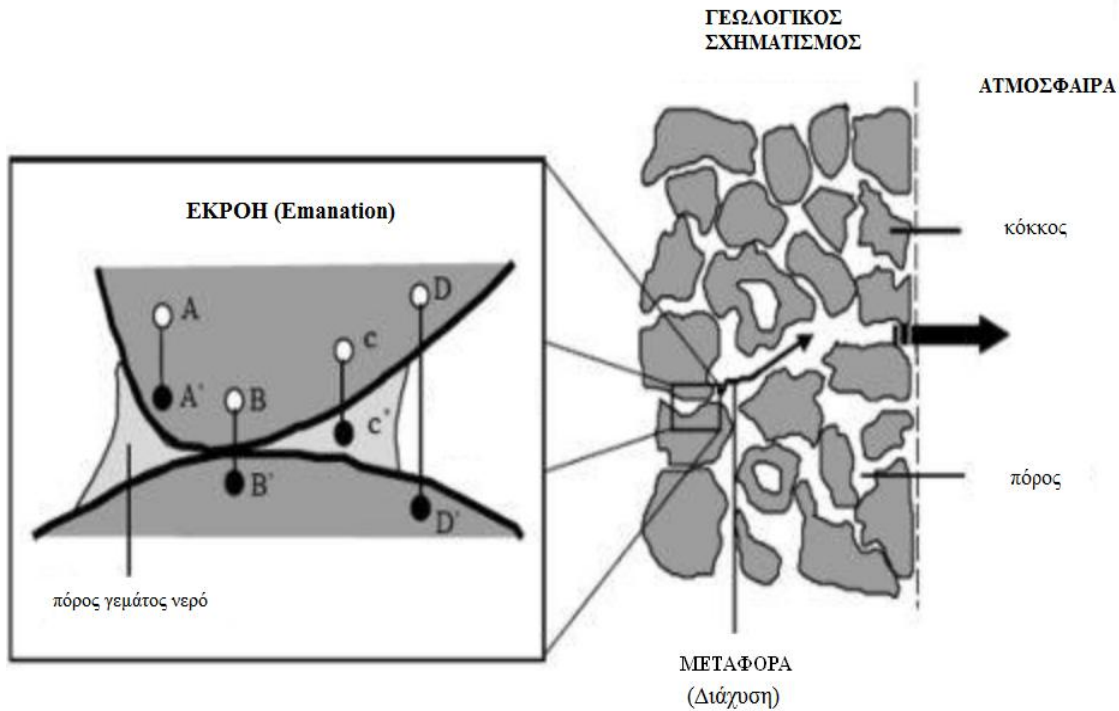


ενεργότητα (specific activity) του συγκεκριμένου εδάφους. Τονίζεται όμως, ότι η περιεκτικότητα του εδάφους σε ράδιο δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας που επιδρά, επειδή ένα μόνο ποσοστό από το ραδόνιο που παράγεται στους κόκκους διαφεύγει και εισέρχεται στους πόρους του εδάφους. Το ποσοστό αυτό καλείται συντελεστής εκροής (emanation coefficient) ή ποσοστό εκροής (emanation fraction). (Nazaroff et al., 1988)

Αν τα καταφέρει και διαφύγει, το ραδόνιο εισέρχεται είτε στους πόρους του εδάφους ή λόγω της ορμής του, ενσωματώνεται σε γειτονικούς κόκκους. Ένα ποσοστό μόλις της τάξης του 10- 50% του  $^{222}\text{Rn}$  που σχηματίζεται στους κόκκους, εισέρχεται στους πόρους. Η διατήρηση της ορμής επιβάλλει ότι μετά τη ραδιενεργό διάσπαση του ραδίου, δημιουργείται ένας πυρήνας ραδονίου, ο οποίος ανακρούει λαμβάνοντας κάποιο ποσοστό κινητικής ενέργειας. Με βάση την κινητική ενέργεια και το υλικό του κόκκου, ο παραπάνω πυρήνας έχει τρεις δυνατότητες: α) να διασχίσει τον κόκκο στον οποίο δημιουργήθηκε και να περάσει στο ρευστό του εδαφικού πορώδους τελειώνοντας τη διαδρομή του σε αυτό. 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 και γ) να τελειώσει τη διαδρομή του μέσα στον κόκκο στον οποίο δημιουργήθηκε. 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 εδαφικό πόρο, έχοντας όμως διαπορευτεί, εν τω μεταξύ, ανάμεσα από δύο ή περισσότερους συνορεύοντες ή μή κόκκους.

Σύμφωνα με το σχήμα 1.4 μόνο κατά την περίπτωση C, το σχηματιζόμενο ραδόνιο τερματίζει την κίνηση του εντός ενός πόρου και εν συνεχεία διαχέεται προς το περιβάλλον. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, όπου το ραδόνιο βρίσκεται εντός ενός κόκκου, λόγω της πολύ μικρής ικανότητάς του να διαχέεται εντός της ύλης (διαχεόμενο εντός της ύλης διανύει αποστάσεις  $0,02\mu\text{m}-0.07\mu\text{m}$ ) (Taner, 1980), είναι πολύ δύσκολο να καταφέρει να μετακινηθεί προς ένα γειτονικό πόρο και από εκεί προς το περιβάλλον. Έτσι τα ποσοστά εκροής, που αντιστοιχούν στις διαδικασίες A, B και D θεωρούνται αμελητέα ως προς το σύνολο της εκροής του ραδονίου. Η συγκέντρωση του ραδονίου εντός ενός πορώδους υλικού αυξάνεται με την αύξηση της υγρασίας. Τόσο το  $^{220}\text{Rn}$  όσο

και το  $^{222}\text{Rn}$  διανύουν ανακρουόμενα πολύ μικρότερες αποστάσεις εντός του ύδατος (περίπου 72 nm και 80 nm αντίστοιχα) σε σχέση με εκείνες που διανύουν στον αέρα (65 $\mu\text{m}$  και 76 $\mu\text{m}$  αντίστοιχα). (Ziegler and Biersak, 1985- Πατήρης, 2009)



**Σχήμα 1.4:** Σχηματισμός, εκροή και διαφυγή ραδονίου από γεωλογικούς σχηματισμούς- Έξοδος ραδονίου από το έδαφος. (Πιθανές περιπτώσεις τερματισμού της ανάκρουσης του θυγατρικού πυρήνα μετά την μεταστοιχείωση του ραδίου. A: ο σχηματισμός του ραδονίου γίνεται σε απαγορευτικό για την απελευθέρωση του βάθος, εντός του κόκκου του υλικού, B και D: η κινητική του ενέργεια επαρκεί ώστε να μεταφερθεί σε γειτονικό κόκκο όπου και εγκλωβίζεται, C: το ραδόνιο σταματά στον γειτονικό πόρο (που περιέχει συνήθως νερό) από όπου εύκολα διαχέεται προς το περιβάλλον.) (Knutson, 1988)

Το ραδόνιο εκρέει και διαφεύγει από τα διάφορα εδάφη με διαφορετικούς ρυθμούς. Η διαφυγή του ραδονίου καθορίζεται από την ικανότητα μετακίνησης (migration) ραδονίου. (Nazaroff et al. 1988)

Έτσι, λοιπόν η έξοδος του  $^{222}\text{Rn}$  από τους γεωλογικούς σχηματισμούς ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις:

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

Οι μηχανισμοί διαφυγής μπορεί να είναι:

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

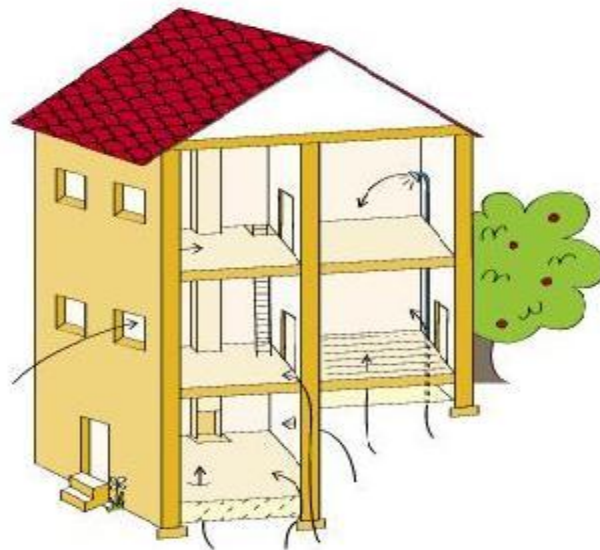
Γενικά από τις κλιματολογικές παραμέτρους που μπορεί να μεταβάλλουν το ρυθμό διαφυγής του ραδονίου είναι η βαρομετρική πίεση, το ύψος βροχόπτωσης, η θερμοκρασία και ο άνεμος, με τις δύο πρώτες παραμέτρους να επιδρούν κυρίως. (Schery et al., 1984)

Η συγκέντρωση  $^{222}\text{Ra}$  στο έδαφος κυμαίνεται παγκοσμίως μεταξύ 10 και 50 Bq kg<sup>-1</sup>. Μπορεί να φθάσει και σε αρκετές εκατοντάδες Bq.kg<sup>-1</sup> μέση συγκέντρωση παγκόσμια είναι 40 Bq.kg<sup>-1</sup> (UNSCEAR, 1993). Εδάφη που είναι δυνατόν, λόγω μεγάλων συγκεντρώσεων σε ράδιο, να παράγουν πολύ ραδόνιο είναι τα γρανιτικά και ηφαιστειακά

πετρώματα και τα λιγνιτικά κοιτάσματα που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις ραδίου, από τη φύση της δημιουργίας τους.

#### 1.4 Ραδόνιο στα οικοδομικά υλικά και τα κτήρια

Επόμενο στάδιο μετά την διαφυγή του ραδονίου από το έδαφος στην ατμόσφαιρα είναι η κυκλοφορία του στοιχείου σε κτήρια, καθώς το ραδόνιο βρίσκεται κατά πλειοψηφία με ποσοστό 85-90% στο έδαφος και ακολουθεί με 5-10% στα οικοδομικά υλικά και τέλος μόλις το 2% στον αέρα και το νερό. Καθώς η πίεση στο εσωτερικό του κτηρίου είναι χαμηλότερη από εκείνη στο εξωτερικό του, ο αέρας εισέρχεται από ρωγμές στα θεμέλια ή τους τοίχους, από υπόγεια, υδρορροές κι άλλα ανοίγματα. Στη συνέχεια, με τη θέρμανση του εσωτερικού αέρα, το ραδόνιο μεταφέρεται στα υψηλότερα πατώματα. Σε γενικές γραμμές, οι συγκεντρώσεις του ραδονίου που μετρώνται σε πολυκατοικίες με πολλούς ορόφους, είναι μικρότερες στους πάνω ορόφους. 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. Υπάρχουν, ωστόσο, υλικά όπως ο γρανίτης και ορισμένα είδη πέτρας και γύψου που είναι ιδιαίτερα ραδιενεργά. (E.E.A.E., 2005)



Σχήμα 1.5: Ραδόνιο στα κτήρια, (E.E.A.E., 2005).

Τα οικοδομικά υλικά, περιέχουν ποσότητες από ραδιοϊσότοπα που είτε είναι μέλη των φυσικών ραδιενεργών σειρών, είτε όχι. Τονίζεται ότι, η ακτινοβολία από τα οικοδομικά υλικά εξετάζεται σε εσωτερικούς χώρους. Έκθεση από τα οικοδομικά οφείλεται κυρίως στη γ-ακτινοβολία την οποία εκπέμπουν. Τα τρία πιο σημαντικά ισότοπα που εμφανίζονται στα οικοδομικά υλικά είναι το  $^{226}\text{Ra}$ , το  $^{232}\text{Th}$  και το  $^{40}\text{K}$ . Το εύρος της ειδικής ενεργότητας των οικοδομικών υλικών σε  $^{226}\text{Ra}$  διεθνώς, κυμαίνεται μεταξύ 4 και  $600 \text{ Bq kg}^{-1}$ , σε  $^{232}\text{Th}$  μεταξύ 1 και  $100 \text{ Bq kg}^{-1}$  και σε  $^{40}\text{K}$  μεταξύ 10 σε  $1200 \text{ Bq kg}^{-1}$ , αν και μπορεί να παρατηρηθούν υψηλότερες τιμές (Louizi et al., 1994).

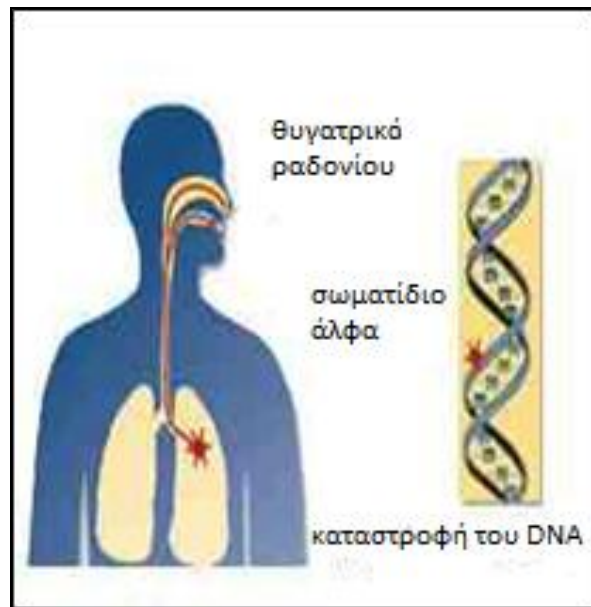
Σε σύγκριση των μέσων τιμών ρυθμού εξωτερικής δόσης απορρόφησης από γ-ακτινοβολία τους εσωτερικούς χώρους με τις αντίστοιχες τιμές στην ύπαιθρο, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα οικοδομικά υλικά προκαλούν μια κατά μέσο όρο αύξηση του ρυθμού εξωτερικής δόσης απορρόφησης μεταξύ 40 και 50% (UNSCEAR, 1993, Νικολόπουλος, 2000)

#### 1.4.1 Επιπτώσεις στην υγεία

Από υλικά που εμπεριέχουν  $^{238}\text{U}$  και θυγατρικά αυτού, εκρέει αέριο  $^{222}\text{Rn}$  στην ατμόσφαιρα. Τα θυγατρικά του τελευταίου, σε αντίθεση με αυτό, είναι στερεά στοιχεία με αποτέλεσμα να επικάθονται στα σωματίδια της σκόνης (aerosol) και τα σταγονίδια της βροχής. Έτσι εισέρχονται στους πνεύμονες με την αναπνοή. Ένα μικρό μέρος του αερίου ραδονίου διαλύεται στο αίμα και κατανέμεται σε ολόκληρο το σώμα. Ένα άλλο μέρος επιστρέφει στην ατμόσφαιρα κατά την εκπνοή, ενώ το υπόλοιπο διασπάται και τα στερεά θυγατρικά επικάθονται στους πνεύμονες. Η βιολογική βλάβη των πνευμόνων, που είναι δυνατό να οδηγήσει σε καρκίνο, προκαλείται κυρίως από τους πυρήνες ηλίου  $^4_2\text{He}$  που προέρχονται από τη διάσπαση των στερεών θυγατρικών νουκλιδίων του ραδονίου. Επιπλέον, μέσω του ποσίμου νερού και της εισόδου του στη ροή του αίματος, τα στομαχικά κύτταρα καθώς και άλλα όργανα εκτίθενται στη ραδιενέργεια του ραδονίου και των θυγατρικών του. Προς την κατεύθυνση αυτή, συμβάλλει και το ράδιο

( $^{226}\text{Ra}$ ) που είναι εγκλωβισμένο, όντας χημικά παρόμοιο με το ασβέστιο, στα ανθρώπινα οστά.

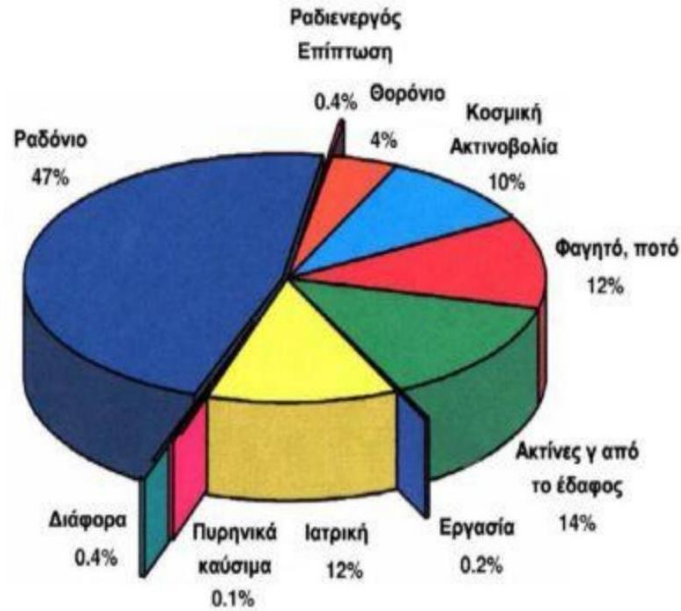
Στην πραγματικότητα επειδή το ραδόνιο είναι χημικά αδρανές και ο χρόνος ημιζωής του είναι πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο αναπνοής, το μεγαλύτερο μέρος της δόσης που δέχεται ο πνευμονικός ιστός οφείλεται στα βραχύβια θυγατρικά του.



**Σχήμα 1.6:** Είσοδος ραδονίου και θυγατρικών του στον ανθρώπινο οργανισμό. [Link: 3]

Επιδημιολογικές μελέτες μάλιστα εκτιμούν ότι το 10 -12% των θανατηφόρων καρκίνων του πνεύμονα οφείλονται στο ραδόνιο αν και το μεγαλύτερο μέρος αυτού, συνδέεται και με μακροχρόνιο κάπνισμα. Πιο συγκεκριμένα το 1998, από τους 160.000 θανάτους στην επικράτεια των Ηνωμένων Πολιτειών οι 19.000 αποδόθηκαν στην παρουσία ραδονίου σε κλειστούς χώρους. Υπολογίζεται ότι περίπου το 47% της συνολικής ετήσιας δόσης που δέχεται ο μέσος κάτοικος του πλανήτη εξαιτίας των φυσικών ραδιενεργών πηγών οφείλεται στο ραδόνιο, το οποίο κατατάσσεται ως καρκινογόνο κλάσης 1. Σχετικό είναι το σχήμα 1.8, που απεικονίζει σύμφωνα με την UNSCEAR 93 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) τη συνεισφορά των διάφορων πηγών ακτινοβολίας στη μέση ενεργό ετήσια δόση η οποία προσδιορίζεται στα 2.4 mSv.

Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) είναι η αρμόδια αρχή για την παρακολούθηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος στη χώρα μας. (Ε.Ε.Α.Ε., 2005)



**Σχήμα 1.7:** Συνεισφορά των διαφόρων πηγών ακτινοβόλησης στη μέση ετήσια δόση σύμφωνα με την **UNSCEAR 93** (2.4 mSv).

# 2

## ΡΑΔΟΝΙΟ ΣΕ ΣΠΗΛΑΙΑ

### 2.1 Ο Όρος Κάρστ και Καρστικοποίηση

Ο όρος **κάρστ** (karst) προέρχεται από τη σλαβική λέξη karst και την ιταλική λέξη carso, προέλευση και των δύο η λέξη kar, που σημαίνει πέτρα, βράχος (Ανδρεαδάκης, 2003). Η λέξη καρστ είναι ένας όρος που ενσωματώνει πλήθος γεωλογικών, μορφολογικών, υδρολογικών, υδροχημικών, παλαιογεωγραφικών και άλλων εννοιών, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ευρύτατα μεν, αλλά να μην εννοούν όλοι οι επιστήμονες που τον χρησιμοποιούν ακριβώς το ίδιο πράγμα.

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

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



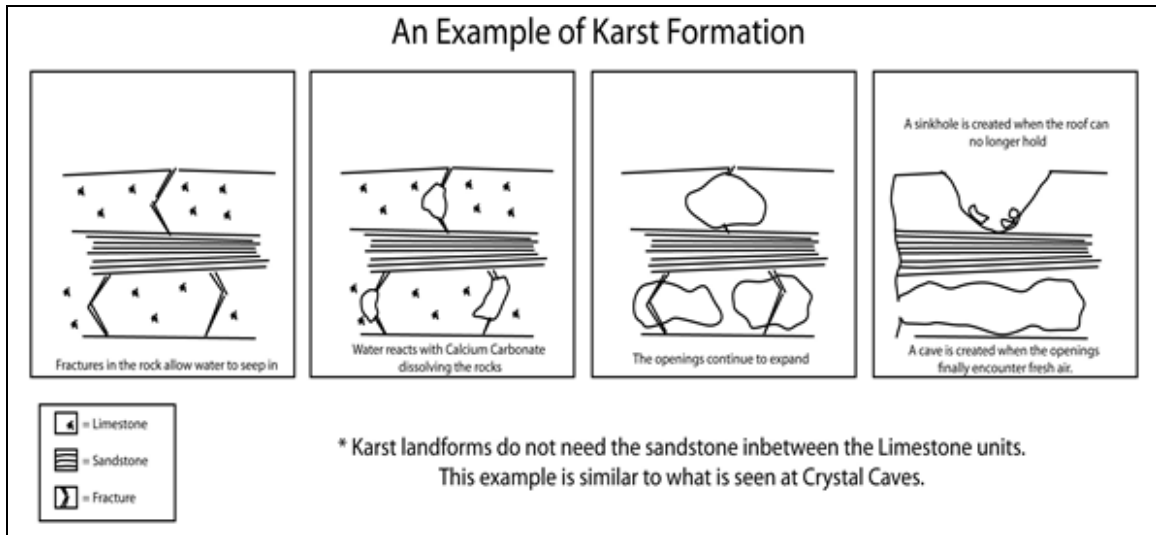
Η Παπαπέτρου-Ζαμάνη (1988) προτείνει ότι «ως καρστ εννοούμε περιοχές με καθορισμένα χαρακτηριστικά ανάγλυφου και αποστράγγισης, οι οποίες συνήθως αναπτύσσονται σε πετρώματα υψηλής διαλυτότητας στο νερό», ενώ η Παπαδοπούλου-Βρυνιώτη (2000) με τον όρο καρστ χαρακτηρίζει «περιοχές δομούμενες από ευδιάλυτα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

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

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή μέσω του COST action 65 (1995) χρησιμοποιεί τον ακόλουθο ορισμό: «Καρστ είναι πρωτίστως ένα τοπίο, με ιδιότυπες γεωμορφές και χαρακτήρες διάλυσης, που αναπτύσσονται κυρίως σε ανθρακικά πετρώματα. Οι καρστικές περιοχές χαρακτηρίζονται από τη γενική απουσία μόνιμης επιφανειακής ροής και την παρουσία ρηχών οπών και κλειστών ταπεινώσεων, την κοινή εμφάνιση σπηλαίων και γενικότερα μεγάλων υπογείων περασμάτων και την ύπαρξη μεγάλων πηγών, συχνά ευρισκόμενων στη βάση της ανθρακικής ακολουθίας. Έτσι, το καρστ είναι ένα επιφανειακό τοπίο, αλλά επίσης και υπόγειο τοπίο, και υδροφόρος ορίζοντας».» Ανάλογη έννοια με αυτήν του karst είναι αυτή της καρστικοποίησης (karstification), που δείχνει το σύνολο των γεωλογικών διεργασιών που καταστρέφουν ευδιάλυτα πετρώματα, δημιουργώντας έτσι μοναδικά μορφολογικά χαρακτηριστικά, ειδικό τύπο πορώδους, ή συγκεκριμένο υδρογεωλογικό περιβάλλον (Milanovic, 1981).

Από τα παραπάνω γίνεται προφανές ότι ο όρος καρστ είναι τόσο περίπλοκος και περιεκτικός, που δημιουργεί μεν στους ερευνητές μια πολύ συγκεκριμένη εικόνα του τι

περιγράφει, αλλά πολύ δύσκολα περικλείεται σε έναν ολιγόλογο ορισμό.



**Σχήμα 2.1:** Παραδείγματα καρστικοποιήμενων δομών [Link: 6].

Σε αντίθεση με τα άλλα μικροπερατά ή αδιαπέρατα πετρώματα, τα ανθρακικά πετρώματα, λόγω της διαλυτότητάς τους, αποτυπώνουν μέσα στη μάζα τους, εκτός από τις γεωλογικές διεργασίες που έχουν επιδράσει πάνω τους στο παρελθόν, και τις κλιματικές, υδρολογικές και υδρογεωλογικές μεταβολές του παρελθόντος τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η διαδικασία της καρστικοποίησης είναι μια δυναμική διεργασία, χαρακτηριστικά εγγενής των ανθρακικών πετρωμάτων, εξελισσόμενη στο χρόνο μόνο υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Αυτή η διαδικασία εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, από την ιστορία του ιζήματος από το οποίο προέρχεται το πέτρωμα και την τεκτονική εξέλιξη του περιβάλλοντος χώρου και του ίδιου του πετρώματος αργότερα, μέχρι τις κλιματικές μεταβολές και τις σύγχρονες ανθρωπογενείς επιδράσεις. Αυτό σημαίνει απλά ότι κάθε ανθρακικό πέτρωμα είναι «δυνάμει» καρστικό, και ακριβώς η καρστικοποίησή του δείχνει ποιες συνθήκες και με ποιο τρόπο επέδρασαν πάνω του πριν κατά την έκθεσή του στον υδρολογικό κύκλο, αλλά και μετά από αυτήν. (Ανδρεαδάκης, 2003)

## 2.2 Σπηλαιογένεση

Με τον όρο σπηλαιογένεση εννοείται το σύνολο των φυσικοχημικών και βιολογικών φαινομένων που γίνονται η αιτία της δημιουργίας του πρώτου μικρού εγκοίλου μέσα σε ένα πέτρωμα, το οποίο με την πάροδο του χρόνου θα εξελιχθεί σε σπήλαιο. Ήδη από το 1726 άρχισαν να διατυπώνονται οι πρώτες σπηλαιογενετικές θεωρίες. Σκοπός όλων αυτών των θεωριών ήταν να δώσουν μια εξήγηση για την γένεση και την εξέλιξη κυρίως του καρστικού φαινομένου.

Στην δεκαετία του '80, ο καθηγητής P. Forti διατυπώνει τις μοντέρνες θεωρίες σπηλαιογένεσης του καρστικού φαινομένου, κάνοντας έναν σπηλαιογενετικό διαχωρισμό με βάση την στιγμή δημιουργίας του σπηλαίου σε σχέση με την στιγμή δημιουργίας του περιβάλλοντος πετρώματος.

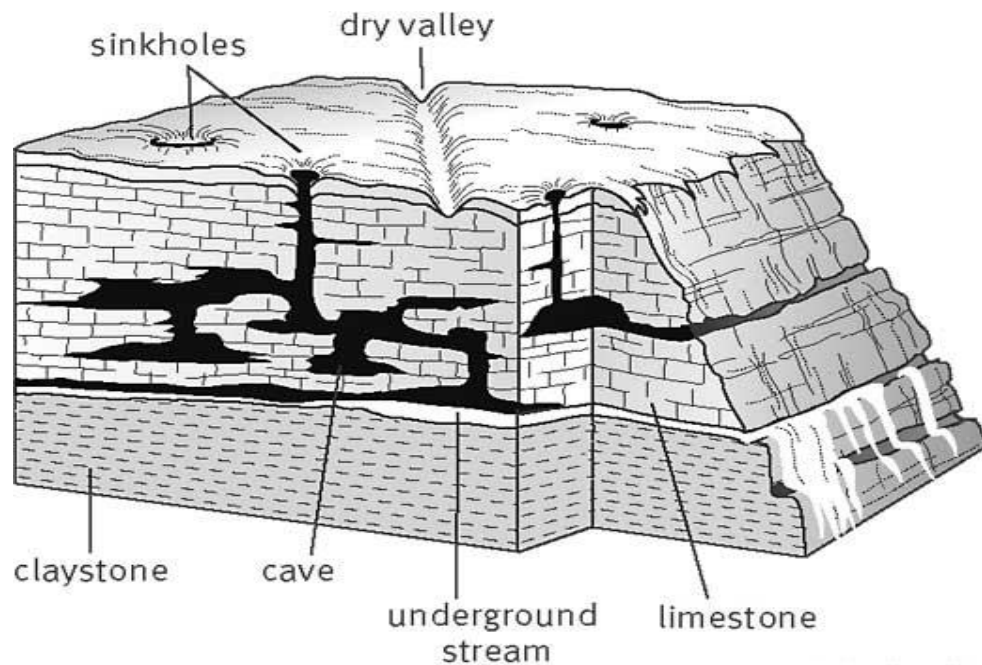
- 1) Πέτρωμα νεότερο του σπηλαίου - Σπήλαια σε Τραβερτίνη.
- 2) Πέτρωμα ίδιας ηλικίας με το σπήλαιο - Γαιώδες, ορισμένα σπήλαια σε λάβες.
- 3) Πέτρωμα παλαιότερο του σπηλαίου - Όλα τα άλλα σπήλαια.

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

Η δημιουργία των κενών ή η εναπόθεση των υλικών μπορεί να γίνει από μηχανική ή τεκτονική ενέργεια και μεταφορά ή από φυσικοχημική ενέργεια δηλ. διάβρωση, διάλυση και εναπόθεση. Όλοι οι άλλοι παράγοντες μαζί και ο υδρολογικός μπορούν να επιδράσουν στην εξέλιξη ή την ταχύτητα των μηχανικών ή φυσικοχημικών μηχανισμών. Για την καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών σπηλαιογένεσης κρίνεται σκόπιμο να

χωριστεί σε δύο στάδια. Στο στάδιο της γένεσης του εγκοίλου, που είναι η δημιουργία του πρώτου κενού, και στο στάδιο της εξέλιξης, κατά το οποίο το έγκοιλο παίρνει την "τελική" του μορφή.

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



**Σχήμα 2.2:** Σπήλαιο ένα φαινόμενο καρστικοποίησης, [Link: 7]

Οι μηχανισμοί εξέλιξης των σπηλαίων, εκτός των τεκτονικών και αυτών που προέρχονται από διάβρωση, οφείλονται κυρίως στη διάλυση του πετρώματος, είναι δηλαδή φυσικοχημικοί. Επειδή λοιπόν η μορφολογία ενός σπηλαίου εξαρτάται από τους μηχανισμούς της εξέλιξης του, οι νέες μελέτες και θεωρίες ασχολούνται με τους φυσικοχημικούς μηχανισμούς. Η πρώτη γενική κατάταξη των σπηλαιογενετικών μηχανισμών βασίστηκε στα φυσικοχημικά φαινόμενα. Με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατό να υποδιαιρεθούν οι διάφοροι σπηλαιογενετικοί μηχανισμοί ανάλογα με τον αριθμό των

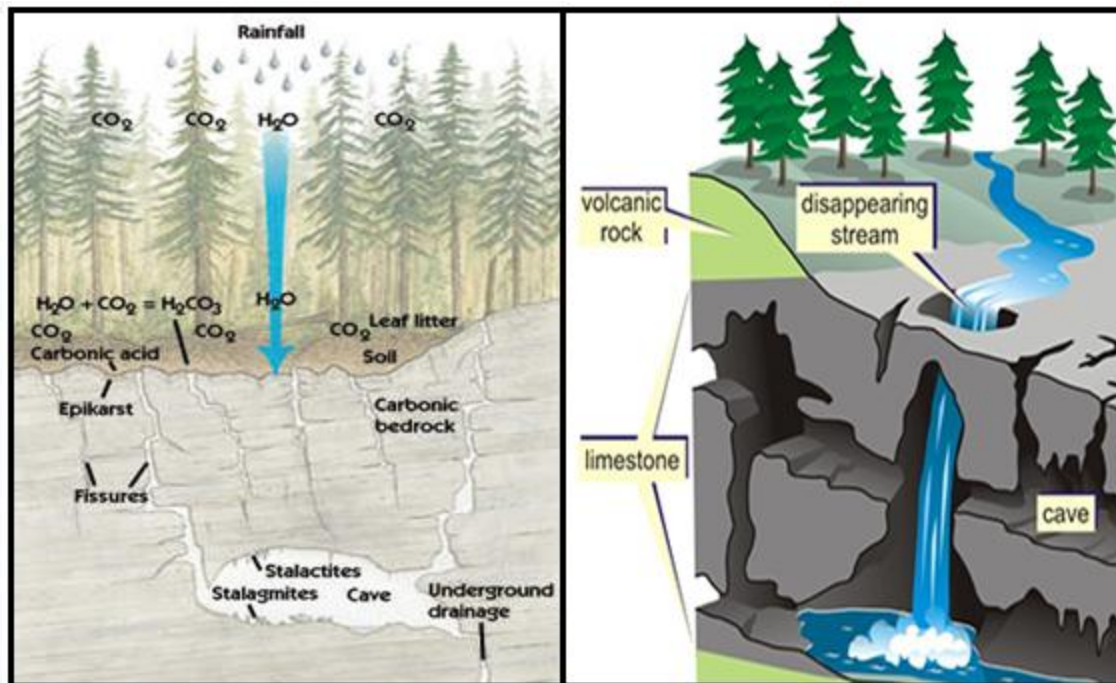
ελεύθερων συστατικών (παραμέτρων) που ενυπήρχαν την στιγμή που ο ίδιος μηχανισμός ήταν σε ισορροπία.

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

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

Εκτός όμως από την υδροδυναμική μεταβολή, η βλάστηση επιδρά και στην γεωχημική. Λόγω των φυτικών οργανισμών το  $H_2O$  εμπλουτίζεται  $CO_2$  με αποτέλεσμα την διάλυση του αμέσως υποκειμένου πετρώματος (βιοκαρστικό φαινόμενο) και σε συνέχεια την εναπόθεση κρυσταλλικού  $CaCO_3$  σε μεγαλύτερο βάθος. Πρωταρχικό ρόλο, εξάλλου,

διαδραματίζει το νερό: Η επίδραση του νερού είναι πολύ σημαντική στην εξέλιξη ενός σπηλαιίου όπως παρουσιάζουν τα επόμενα σχήματα. (Μυρμηγιάννης,2005)



Σχήμα 2.3: Κύκλος νερού και σχηματισμός σπηλαίων, [Link: 8].

## 2.3 Ρήγματα

Ένας ακόμα ιδιαίτερος γεωλογικός σχηματισμός που έχει καθοριστικό ρόλο στην διαφυγή του αερίου από το έδαφος είναι τα ρήγματα καθώς σας ασυνέχειες του φλοιού της γης επιτρέπουν στο αέριο ραδόνιο να απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

Τα ρήγματα ως ασυνέχειες του στερεού φλοιού της γης απαντώνται σε όλες τις κλίμακες μετατοπίζοντας κρυστάλλους, στρώματα, ακολουθίες, ιζηματογενείς λεκάνες, μαγματικούς όγκους, μεγάλα ηπειρωτικά τεμάχια κτλ. 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 ήτοι σπασμένα και κατακερματισμένα πετρώματα, πυκνές δέσμες διακλάσεων και μικρορηγμάτων, με μικροκαμπυλώσεις, εκατέρωθεν της ρηξιγενούς επιφάνειας, υδροθερμική εξαλοίωση κλπ.

Μια ρηξιγενής επιφάνεια έχει συνήθως ένα ελλειπτικό σχήμα που περιγράφεται από το μήκος και το ύψος της αντίστοιχα (Doutsos and Koukouvelas, 1990). Η μέγιστη μετατόπιση εκδηλώνεται στο κέντρο της ελλείψεως, ενώ προς την περιφέρειά της η μετατόπιση μειώνεται βαθμιαία έως ότου γίνει μηδενική. Διαδοχικές ενεργοποιήσεις της ρηξιγενούς επιφάνειας συντελούν στη διεύρυνση της, έως ότου αποκτήσει το τελικό της μέγεθος. Σε άλλες περιπτώσεις η ρηξιγενής επιφάνεια σχηματίζεται από σύνεωση μικροδιαρρήξεων. Οι επιμέρους διαρρήξεις ή τμήματα ρήγματος μπορεί να συνενώνονται, να απέχουν μεταξύ τους ή να αλληλεπικαλύπτονται. Στις δυο τελευταίες περιπτώσεις αναπτύσσονται μεταξύ των τμημάτων οι ζώνες μεταβίβασης.

Τα ρήγματα επί του φλοιού της γης σχηματίζονται από την εφαρμογή τάσης, οι κύριοι άξονες της οποίας διατάσσονται με τρόπο ώστε ο ένας να είναι κάθετος επί της επιφάνειας της γης ενώ οι άλλοι δυο να κείνται επ' αυτής. Επί των ρηγμάτων γίνονται κινήσεις διατμητικής ολίσθησης, η διεύθυνση και φορά των οποίων χρησιμοποιείται για την ταξινόμησή τους σε τρεις τύπους: τα κανονικά, τα ανάστροφα και τα οριζόντια ρήγματα (Δούτσος, 2000).

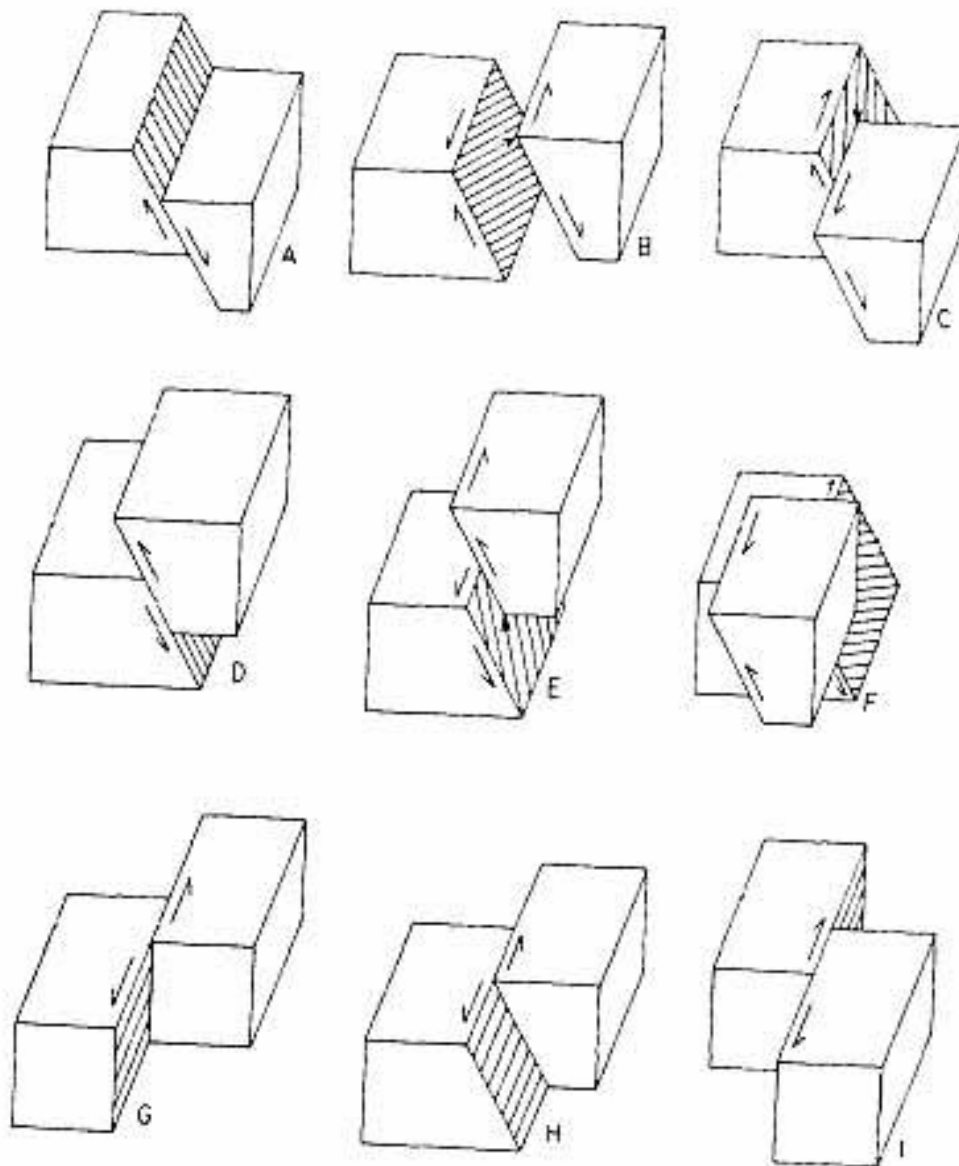
Στην συνέχεια περιγράφονται οι τύπου ρηγμάτων που υπάρχουν καθώς ακολουθεί σχετικό σχήμα:

1) Τα κανονικά ρήγματα. Σε αυτά, τα ρηξιγενή τεμάχια εκατέρωθεν του ρήγματος απομακρύνονται μεταξύ τους με σύγχρονη βύθιση της οροφής και ανύψωση της βάσης. Προκαλείται έτσι μια διαστολή και απολέπνωση του φλοιού της γης που εκφράζεται συνήθως με τη δημιουργία στενόμακρων ζωνών βύθισης και ανύψωσης, τις τεκτονικές τάφρους και τα τεκτονικά κέρατα αντίστοιχα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα περιοχής εκδήλωσης παραμόρφωσης λόγω κανονικών ρηγμάτων είναι ο Κορινθιακός Κόλπος.

2) Τα ανάστροφα ρήγματα. Σ' αυτά τα ρηξιγενή τεμάχια εκατέρωθεν του ρήγματος πλησιάζουν μεταξύ τους με σύγχρονη ανύψωση της οροφής και βύθιση της βάσης. Προκαλείται έτσι μια συστολή και πάχυνση του φλοιού της γης, από ρήγματα κλίσεως  $\sim 30^\circ$ , ως αποτέλεσμα οριζόντιας συμπίεσης. Ανάστροφα ρήγματα με κλίσεις  $>45^\circ$  λέγονται επωθήσεις, ενώ με κλίσεις  $<45^\circ$  εφιππεύσεις.

3) Τα οριζόντια ρήγματα. Είναι ρήγματα στα οποία επικρατεί η οριζόντια κίνηση. Εμφανίζονται ως μια μικρού εύρους, επιμήκης και κατακόρυφη ζώνη μικρότερων ρηγμάτων και χωρίζουν συχνά εκατέρωθεν αυτών περιοχές με διαφορετική παραμόρφωση. Τα οριζόντια ρήγματα μπορούμε να τα χωρίσουμε σε δεξιόστροφα και αριστερόστροφα. Το μεγαλύτερο οριζόντιο ρήγμα στον Ελληνικό χώρο είναι αυτό της Ξάνθης-Καβάλας που έχει μήκος  $>150$  km. (Koukouvelas and Doutsos, 1990-Οικονομόπουλος, 2008)





**Σχήμα 2.4:** Οι κυριότεροι τύποι ρηγμάτων. Α. κανονικό ρήγμα, Β. πλάγιο κανονικό ρήγμα αριστερόστροφο, C. πλάγιο κανονικό ρήγμα δεξιόστροφο, D. ανάστροφο ρήγμα. E. πλάγιο ανάστροφο ρήγμα αριστερόστροφο. F. πλάγιο ανάστροφο ρήγμα δεξιόστροφο, G. ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κατακόρυφη ρηξιγενή επιφάνεια αριστερόστροφο, H. ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κεκλιμμένη ρηξιγενή επιφάνεια αριστερόστροφο, I. ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με κατακόρυφη ρηξιγενή επιφάνεια δεξιόστροφο. (C.T.H. 16, 1978). [Link: 9]

## 2.4 Έρευνες σε σπήλαια

Η ύπαρξη ραδονίου σε σπήλαια έχει μελετηθεί εδώ και πολλά χρόνια και ένα μεγάλο ποσοστό γνώσεων σχετικά με τη συμπεριφορά αυτού είναι διαθέσιμο. Είναι γνωστό ότι το ραδόνιο, καθώς και το διοξείδιο του άνθρακα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ιχνηλάτες για να διερευνηθεί το κλίμα στα σπήλαια, ιδιαίτερα η κυκλοφορία του αέρα σε αυτά. Σε πολλές χώρες, το ραδόνιο είναι αντικείμενο κανονισμών που υιοθετήθηκαν για λόγους προστασίας από την ακτινοβολία. Υπάρχουν πειστικές ενδείξεις για καρκίνο του πνεύμονα που τεκμηριώνονται από μελέτες σε υπόγεια ορυχεία (Doll, 1992). Έρευνες αποκάλυψαν υψηλότερη συγκέντρωση ραδονίου στα υπόγεια ορυχεία.

Λόγω αυτών των αποτελεσμάτων, πολλές νομοθετικές διατάξεις θέσπισαν περιορισμούς για την συγκέντρωση ραδονίου, παρά το γεγονός ότι ο κίνδυνος στα σπίτια δεν είναι ακόμα επαρκώς προσδιορισμένος, λόγω διαφορετικών συνθηκών έκθεσης. Μια σειρά από μελέτες που αφορούν τα σπήλαια, τράβηξαν την προσοχή σε αυτό το ιδιόμορφο περιβάλλον. Έτσι, σπήλαια, σήραγγες και υπόγειοι χώροι συχνά αναφέρονται ρητά σε συστάσεις και κανονισμούς. Οι επιπτώσεις στην υγεία οφείλονται στην εισπνοή ραδονίου.

Ορισμένοι οργανισμοί, όπως η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (US Environmental Protection Agency) ή η Εθνική Ακαδημία Επιστημών των ΗΠΑ (the US National Academy of Sciences), τονίζουν τον κίνδυνο ύπαρξης ραδονίου στα κτήρια. Πρόσφατα, ο οργανισμός προστασίας του περιβάλλοντος (US-EPA, 2003) εξέδωσε μια έκθεση εκτίμησης καρκίνου σε έναν πληθυσμό που οφείλεται στο ραδόνιο. Σημειώνεται, ότι τα ποσοστά έκθεσης στις κατοικίες είναι μικρότερης τάξης μεγέθους από εκείνη στα ανθρακωρυχεία.

Στην πραγματικότητα, οι σχέσεις μεταξύ της εκτιμώμενης δόσης και τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν από διαφορετικές μελέτες, συχνά δεν είναι συγκρίσιμα, για αυτό η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP 1993-1994) συνέστησε κάποιες κοινές παραδοχές και συμβάσεις.

Τα σπήλαια έχουν ενδιαφέρον, διότι η συγκέντρωση ραδονίου σε αυτά μπορεί μερικές φορές να φτάσει υψηλές τιμές. Ένας πολύ μεγάλος αριθμός ερευνών έχει πραγματοποιηθεί σε όλο τον κόσμο, σχετικά με τη συμπεριφορά του ραδονίου σε ένα περιβάλλον, την ακτινοβολία και την προστασία από αυτήν. Η συγκέντρωση του θορονίου στα σπήλαια συνήθως κυμαίνεται από το 5 έως το 15 % των τιμών του ραδονίου, δηλαδή εντός του σφάλματος που επηρεάζει συνήθως τις μετρήσεις ραδονίου. Για το λόγο αυτό και προκειμένου να απλοποιηθεί αυτό το πρόβλημα, λαμβάνεται υπόψη μόνο το ραδόνιο.

Οι Hakl, Hunyadi και Várhegyi (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. Σε ένα σπήλαιο ο αέρας είναι σε γενικές γραμμές αρκετά καθαρός, δηλαδή υπάρχουν λιγότερα μικροσωματίδια από ότι σε εξωτερικούς χώρους ή αστικές περιοχές.

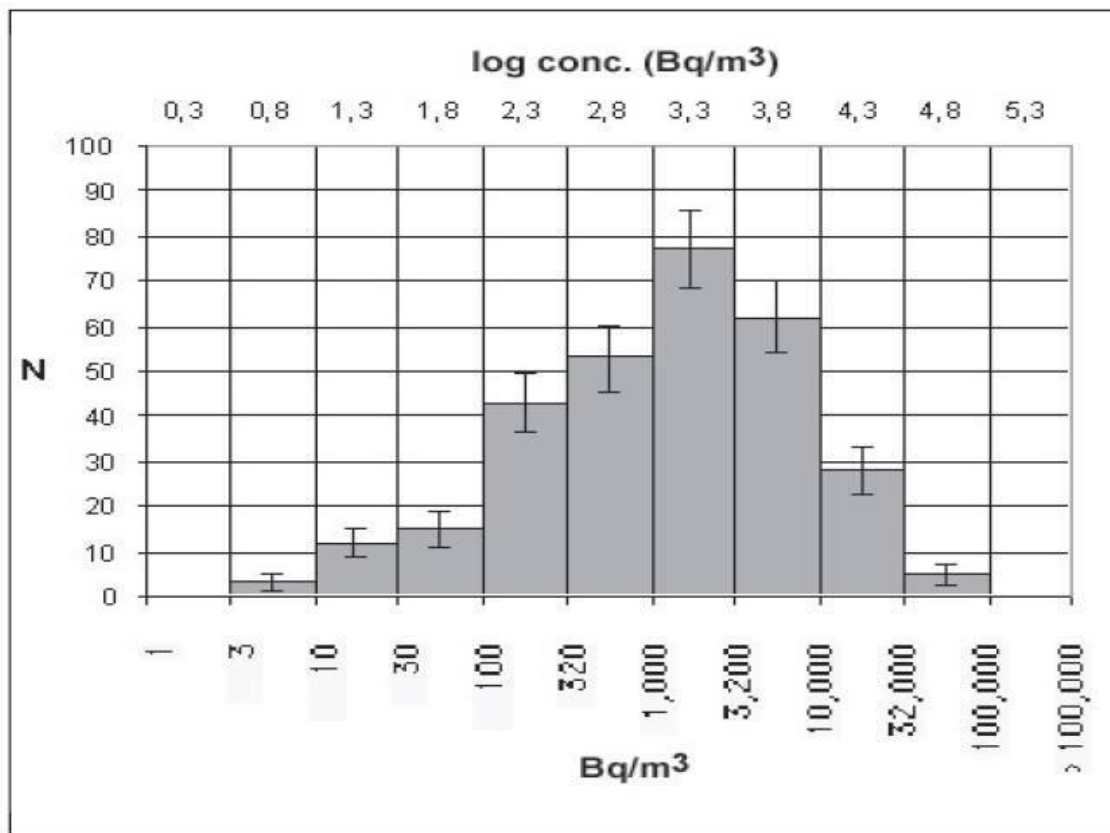
Κατά τη διάρκεια μιας έρευνας, που έγινε στο πιο σημαντικό σπήλαιο της Ιταλίας «Grande Grotta del Vento», πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων της συγκέντρωσης ραδονίου σε τμήμα τουριστικής διαδρομής. Οι χαμηλότερες τιμές βρέθηκαν σε χώρους κοντά στα τμήματα αυτά, καθώς οι επισκέπτες αποτελούν πηγή μικροσωματιδίων, όπως σκόνη και χνούδι, τα οποία αποτελούν μορφές ρύπανσης του περιβάλλοντος του σπηλαίου.

Αυτή η σειρά των μετρήσεων δείχνει επίσης ότι εκτός από την εποχιακή επιρροή, οι διακυμάνσεις της συγκέντρωσης ραδονίου συσχετίζονται επίσης, με άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Τέτοιοι παράγοντες είναι: η συγκέντρωση ραδίου στο πέτρωμα, το πορώδες, η ροή του αέρα και του νερού, η ατμοσφαιρική πίεση, οι σεισμοί

και πολλοί άλλοι. Αλλά σε γενικές γραμμές, η εποχιακή διακύμανση δείχνει μέγιστη τιμή το καλοκαίρι και ελάχιστη το χειμώνα.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή του μέσου όρου τιμών συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια, από τον Hakl και τους συναδέλφους του (1995), ο οποίος συνέλεξε στοιχεία από 220 διαφορετικά σπήλαια με πολλές διαφορετικές παραμέτρους που επηρεάζουν την διαφυγή ραδονίου στα σπήλαια.

**Πίνακας 2.1:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της κατανομής της συγκέντρωσης του ραδονίου σε σχέση με την λογαριθμική κατανομή περιεκτικότητας ραδονίου σε 220 σπήλαια παγκόσμιας κλίμακας, (Cigna, 2005).



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 πανομοιότυπα κατανεμημένων μεταβλητών. Απαντάται συχνά σύνδεση κανονικών κατανομών και γεωλογικών χαρακτηριστικών, όπως ρήγματα.

Δεδομένου ότι αυτή είναι η περίπτωση της συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια, έχει υπολογισθεί η λογαριθμοκανονική κατανομή των στοιχείων βάση του Hackl. Το αποτέλεσμα, όπως αναφέρεται στον πίνακα 2.1, έχει μέση τιμή γύρω από μια συγκέντρωση περίπου 2500 Bq/m<sup>3</sup>, 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 <sup>226</sup>Ra. Στη συνέχεια, στους μηχανισμούς μεταφοράς του ραδονίου, η ροή αέρα και νερού, είναι ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Τέλος, πρέπει να εξακριβωθεί αν το μεγαλύτερο μέρος της πηγής του ραδονίου σε ένα σπήλαιο, είναι στον ασβεστόλιθο ή σε άλλα πετρώματα που συνδέονται με αυτόν μέσω ρωγμών.

Έκθεση σε ραδόνιο μπορεί να προκύψει, επίσης, έξω από ένα σπήλαιο και στην ευρύτερη περιοχή του. Έξω από την είσοδο σπηλαίων, έχουν κατασκευαστεί κτήρια ως χώροι εργασίας. Αυτό μπορεί να αλλάξει το φυσικό μικροκλίμα του σπηλαίου και να οδηγήσει μία δόση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Είναι σαφές ότι κάθε μεταβολή του φυσικού μικροκλίματος των σπηλαίων πρέπει να αποφεύγεται.

Συμπέρασμα όλων όσων αναφέρθηκαν προηγουμένως, το ραδόνιο μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη του μικροκλίματος ενός σπηλαίου, καθώς και σε άλλες ενδιαφέρουσες διαδικασίες. (Cigna, 2005)

# 3

## ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 3.1 Γενικά για τις τεχνικές ανίχνευσης

Η μεγάλη συχνότητα με την οποία απαντά το  $^{222}\text{Rn}$  στο περιβάλλον, σε συνδυασμό με τις σημαντικές επιπτώσεις του στην ανθρώπινη υγεία, οδήγησαν στην ανάπτυξη πολλών μεθόδων για τον προσδιορισμό 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 (οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια). 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  $^{222}\text{Rn}$  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  $^{222}\text{Rn}$ .

- **Τεχνικές προσδιορισμού μέσω θυγατρικών.**

Μετά την αποκατάσταση ραδιενεργούς ισορροπίας, η ενεργότητα των θυγατρικών ισούται με αυτή του ραδονίου σε προγενέστερες περιόδους. (Κασινάλης, 2008)

### 3.1.1 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 ηλεκτρική ενέργεια 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. 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 προκαλεί το χτύπημα ενός πυρηνικού σωματιδίου σε αυτά και 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, μήκους συνήθως 20 με 70  $\mu\text{m}$ , 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 πιο γρήγορα κατά μήκος της εγγεγραμμένης τροχιάς από ότι αλλού, με αποτέλεσμα τη διεύρυνσή της. Η παραπάνω διαδικασία είναι γνωστή ως χημική διάβρωση. 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)

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 κυρίως για ολοκληρωτικές μετρήσεις μακρού χρονικού διαστήματος (3-12 μήνες). Παρ' όλ' αυτά ολοκληρωτικές μετρήσεις μικρού χρονικού διαστήματος (μισό με ένα μήνα) έχουν αναφερθεί, σε περιορισμένα όμως επίπεδα.

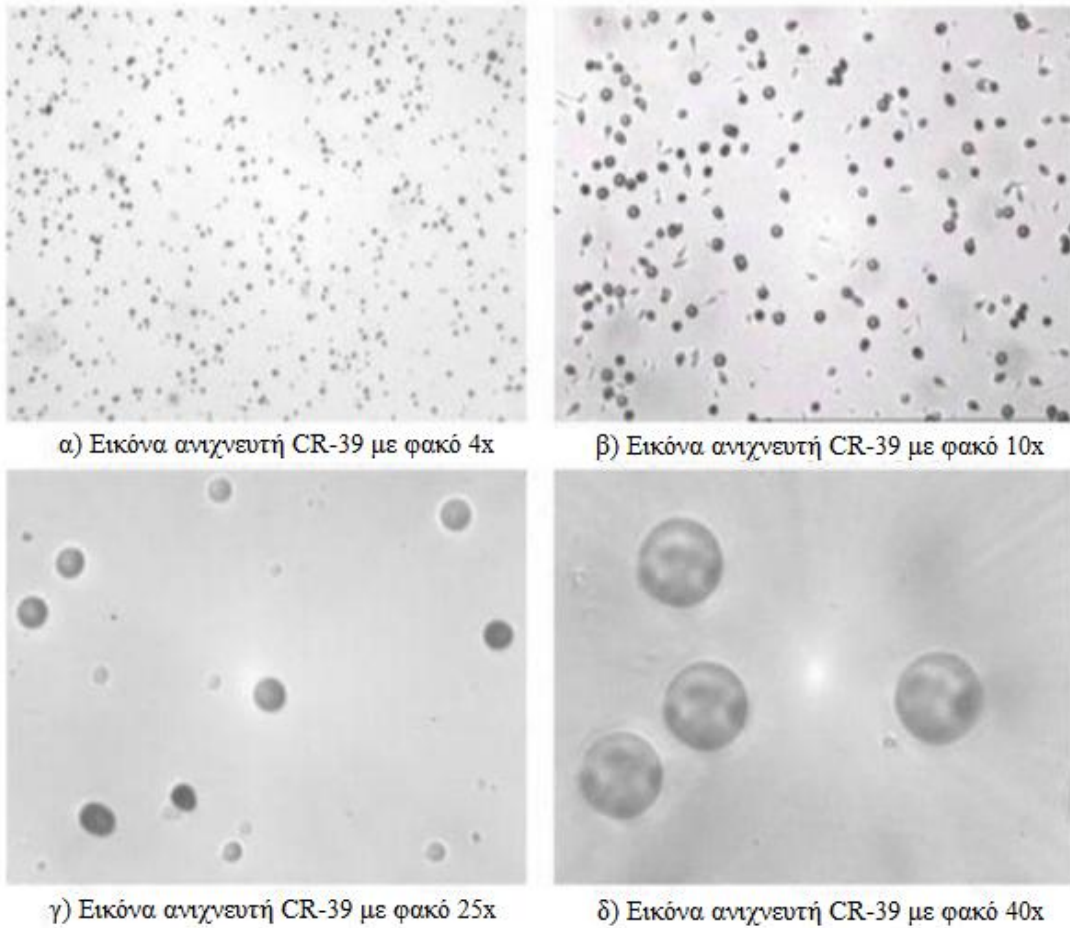


**Εικόνα 3.1:** Παθητικοί ανιχνευτές καταγραφής ιχνών (E.E.A.E, 2005).



Προκειμένου για τη μέτρηση, χρησιμοποιούνται μερικά  $\text{cm}^2$  ανιχνευτή (συνήθως 2 έως 3). 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). Η διάταξη αυτή καταλαμβάνει πολύ λίγο χώρο. 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. Η διάταξη συνήθως εμποδίζει την είσοδο θυγατρικών από το περιβάλλον. Τα α-σωματίδια που παράγονται από τις διασπάσεις της αλυσίδας του ραδονίου που διαχύθηκε προς το θάλαμο, καταγράφονται στο SSNTD καθ'όλη τη διάρκεια της μέτρησης. Με την καταμέτρηση των καταγεγραμμένων ιχνών στο SSNTD είναι δυνατός ο υπολογισμός της μέσης συγκέντρωσης του ραδονίου στο χώρο τοποθέτησης του μετρητή.

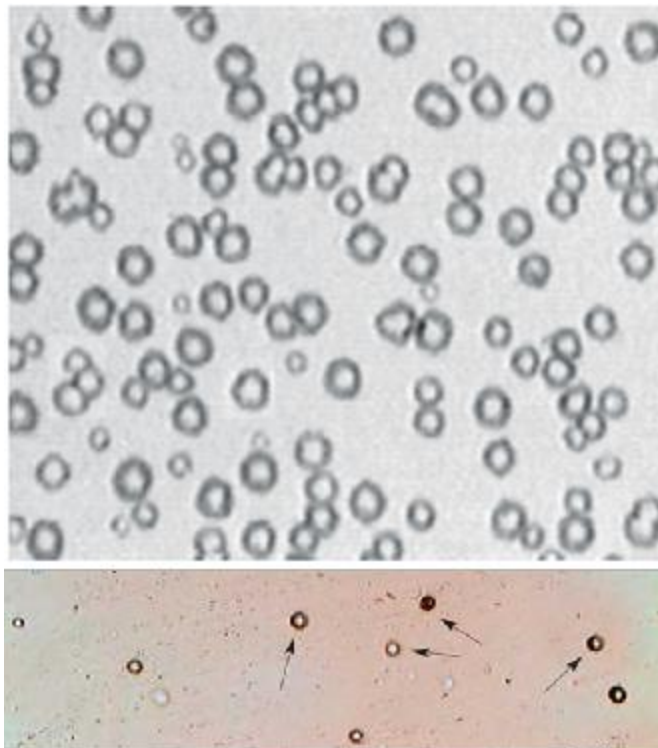
Εκτός από της χρήση SSNTD's για τη μέτρηση ραδονίου, έχουν αναφερθεί και χρήσεις για μέτρηση θυγατρικών ραδονίου. Συνήθως οι ανιχνευτές εκτίθενται γυμνοί, ή εντός πολύ ειδικών κατασκευών που επιτρέπουν επιλεκτική μέτρηση α-σωματιδίων. Η τεχνική είναι ολοκληρωτική και μάλιστα η μόνη τέτοιου τύπου τεχνική η οποία υφίσταται σήμερα για μέτρηση θυγατρικών ραδονίου. Εκτός πάντως πολύ ειδικών περιπτώσεων, παρουσιάζει πολλές διακυμάνσεις οι οποίες οφείλονται στο πλήθος των παραγόντων που επιδρούν στη συγκέντρωση θυγατρικών ραδονίου στον αέρα (Handler and Paulo,1994). Έτσι η τεχνική μέτρησης θυγατρικών με χρήση SSNTD's κρίνεται γενικά ανεπαρκής από μόνη της και πρέπει να συνοδεύεται από πλήθος ταυτοχρόνως μετρούμενων παραγόντων για να δώσει κάποια αποτελέσματα και μάλιστα αμφιλεγόμενης ακρίβειας και χρησιμότητας, με αποτέλεσμα τελικά εκείνο που ενδιαφέρει στη περίπτωση των θυγατρικών δεν είναι η μέση συγκέντρωσή τους, αλλά οι πιθανά εμφανιζόμενες αιχμές, κατά τη διάρκεια των οποίων - σύμφωνα με όσα εκτέθηκαν προηγούμενα - υπάρχει έντονη ραδιοβιολογική επιβάρυνση. (CEC.1994, Νικολόπουλος, 2000)



**Εικόνα 3.2:** Εικόνες από ίχνη διασπάσεων ραδονίου σε διαφορετικές αναλύσεις. (Νικολόπουλος, 2000)

Σε γενικές γραμμές μπορεί να υποστηριχτεί ότι τα ίχνη διασπάσεων ραδονίου σε 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 στο σχήμα 3.5. Εκτός όμως από τα ίχνη διασπάσεων ραδονίου, υπάρχει μια πλειάδα από ίχνη τα οποία οφείλονται σε καταστροφές του υλικού που δε σχετίζονται με δίοδο σωματιδίων-α (θόρυβος). Μερικά από τα ίχνη αυτά μοιάζουν με αγνά 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, να καταμετρηθούν. (Νικολόπουλος, 2000)



**Εικόνα 3.3:** Τυπική εικόνα ιχνών διασπάσεων ραδονίου σε ανιχνευτή CR-39. [Link: 3]

### **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  $400 \text{ cm}^3$ . Η διάταξη που δημιουργείται καλείται κάνιστρο άνθρακα (charcoal canister). Κατά τη διάρκεια της έκθεσης, το ραδόνιο προσροφάται στην επιφάνεια του ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα. Ο ρυθμός προσρόφησης του ραδονίου είναι ανάλογος της συγκέντρωσης του τελευταίου στην ατμόσφαιρα και του χρόνου έκθεσης (Bochicchio et al., 1995). Μετά το τέλος της έκθεσης το κάνιστρο μετράται σε κάποιον ειδικό ανιχνευτή που συνήθως είναι ένας ανιχνευτής NaI(Tl) ή ένας ανιχνευτής Ge. Εκεί γίνεται καταγραφή της  $\gamma$ -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 - μέσα σε διάστημα μερικών ημερών. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι ο ολοκληρωτικός της χρόνος περιορίζεται σε μερικές μόνο ημέρες διότι ο ξυλάνθρακας προσροφά υγρασία, η οποία τον εμποδίζει να προσροφήσει επιπλέον ραδόνιο. Δεν μπορεί επομένως, να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της συγκέντρωσης σε ολοκληρωτικές μετρήσεις μακρού χρόνου και χρησιμοποιείται κυρίως για σύντομες επισκοπήσεις (Νικολόπουλος και συν.,1997). Οι ανιχνευτές πρέπει να στέλνονται στο 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. Αναφέρεται τέλος, ότι όπως είναι προφανές, η μέθοδος αυτή δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση θυγατρικών ραδονίου.

#### **γ) Ανιχνευτές ηλεκτρίσιμων υλικών.**

Ένα ηλεκτρίσιμο υλικό (electret) είναι ένα υλικό το οποίο όταν φορτιστεί μπορεί να κρατάει το φορτίο του και το συνδεδεμένο με αυτό ηλεκτρικό δυναμικό, για μια μεγάλη περίοδο ενός χρόνου ή παραπάνω (Νικολόπουλος και συν., 1997). 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. Η τεχνική αυτή όμως δε βρήκε στο παρελθόν μεγάλη ανταπόκριση. Από το 1995 και έπειτα έχει γίνει δυνατή η κατασκευή εξαιρετικής ακρίβειας μετρητών ραδονίου οι οποίοι βασίζονται στη χρήση ηλεκτρίσιμων υλικών. 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 απορροφάται, 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 χαμηλό και η ακρίβειά του ανιχνευτή είναι ικανοποιητική αλλά μικρότερη από αυτή των άλλων παθητικών ανιχνευτών. Όπως φάνηκε, η τεχνική είναι ολοκληρωτική με χρονική διάρκεια μερικές μέρες. Δεν χρησιμοποιείται για τη μέτρηση θυγατρικών ραδονίου (Νικολόπουλος και συν., 1997).

### **3.1.2 Ενεργητικοί ανιχνευτές**

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει ανιχνευτές που καταγράφουν τη συγκέντρωση ραδονίου σε πραγματικό χρόνο. Λέγονται και ενεργητικές τεχνικές (active techniques) και σε αυτές απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια και συνήθως η χρήση αντλιών αέρα. Σε κάθε περίπτωση πάντως, αποτελούνται από ένα κατάλληλο θάλαμο εντός του οποίου εισέρχεται το 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. (IEKEM TE)

Οι κυριότεροι τύποι θαλάμων που χρησιμοποιούνται σε ενεργητικούς ανιχνευτές είναι α) σπινθηρισμών, β) ιοντισμού και γ) ημιαγωγίων τοιχωμάτων.

#### **α) Θάλαμοι σπινθηρισμών**

Στην περίπτωση αυτή, 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, 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.

## **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.

## **γ) Θάλαμοι ημιαγωγίων τοιχωμάτων**

Σε αυτήν την περίπτωση, ο θάλαμος φέρει στα τοιχώματά του ημιαγωγία υλικά τα οποία καταμετρούν γεγονότα α-διασπάσεων. Από τα καταμετρούμενα γεγονότα υπολογίζεται πάλι 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 τη συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου με α φασματοσκοπικές μεθόδους. Καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση και των μεταβολών της συγκέντρωσης των θυγατρικών στον αέρα. Τονίζεται τέλος, ότι στα τελευταία δυο χρόνια έχουν εμφανιστεί όργανα που έχουν τη δυνατότητα να διακρίνουν ακόμη και μεταξύ των ελεύθερων θυγατρικών και εκείνων που είναι προσκολλημένα σε σωματίδια αεροζόλ. (Νικολόπουλος, 2000)



**Εικόνα 3.4:** Ενεργητικός ανιχνευτής AlphaGUARD, (Κασινάλης, 2008).

Η επιλογή λοιπόν μιας εκ των παραπάνω κατηγοριών και κατ' επέκταση ενός συγκεκριμένου οργάνου έγκειται στο αναμενόμενο κόστος, τον επιθυμητό χρόνο των μετρήσεων καθώς επίσης στο είδος των πληροφοριών και της ακρίβειας που επιθυμούμε αυτές να έχουν. Στην παρούσα διπλωματική έγιναν χρήση μετρητών ραδονίου CR-36 και SARAD 16988-2, ανάλογα με την διάρκεια και τον τρόπο λήψης δείγματος στο πεδίο. Συγκεκριμένα, όπως ήδη έχει αναφερθεί, στην μέτρηση ραδονίου στα σπήλαια χρησιμοποιήθηκαν 6 μετρητές από την πρώτη κατηγορία και στις μετρήσεις ραδονίου σε νερό από την δεύτερη. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του κάθε ανιχνευτή και της αρχής λειτουργίας του.

**Πίνακας 3.1:** Σύνοψη κυριότερων χαρακτηριστικών ανιχνευτών ραδονίου, (Νικολόπουλος, 2000).

<b>Ανιχνευτής</b>	<b>Στιγμαιαία</b>	<b>Ολοκληρωτική</b>	<b>Συνεχής</b>	<b>Ενεργός</b>	<b>Παθητική</b>
<b>Καταγραφής Ιχνών</b>	-	Ναι	-	-	Ναι
<b>Ενεργοποιημένου Ξυλάνθρακα</b>	-	Ναι	-	-	Ναι
<b>Ηλεκτρίσιμου Υλικού</b>	-	Ναι	-	-	Ναι
<b>Θαλάμου Σπινθηρισμών</b>	Ναι	-	Ναι	Ναι	-
<b>Θαλάμου Ιοντισμού</b>	Ναι	-	Ναι	Ναι	-
<b>Θαλάμου Ημιαγωγού</b>	Ναι	-	Ναι	Ναι	-

### 3.2 Αρχή Λειτουργίας Ανιχνευτή CR-39

Πριν την περιγραφή της λειτουργίας του συγκεκριμένου μετρητή αξίζει να σημειωθεί ότι το πολυμερές CR-39 χρησιμοποιήθηκε ως ανιχνευτής για πρώτη φορά το 1978 (Cartwright et al., 1978). Το αρκτικόλεξο CR-39 (συντόμευση του Columbia Resin) είναι η εμπορική ονομασία του πολυμερούς πλαστικού ανθρακικής αλλυλ-διγλυκόλης (allyl diglycol carbonate) (Stejny, 1987)

Οι 6 ανιχνευτές τύπου CR-39 που χρησιμοποιήθηκαν στις συγκεκριμένες μετρήσεις αποτελούνται από ένα μικρό κομμάτι πλαστικού ή ένα φιλμ (διαστάσεων 2-5 cm) τα οποία είναι τοποθετημένα σε δοχείο. Η οπή του τελευταίου καλύπτεται από φίλτρο που αποτρέπει την είσοδο θυγατρικών και σκόνης. Καθώς σωματίδια 2α, προερχόμενα από τη διάσπαση του ραδονίου και των θυγατρικών του, προσπίπτουν στο φιλμ, αφήνουν



ίχνη. Μετά την πάροδο του χρόνου έκθεσης (διάρκειας 3 μηνών) ο ανιχνευτής αφαιρέθηκε και υποβλήθηκε 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 ΕΕΑΕ παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης της συγκέντρωσης Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους με αυτούς τους παθητικούς ανιχνευτές ιχνών. Οι παθητικοί ανιχνευτές ιχνών αποτελούν μία από τις μεθόδους επιλογής για ολοκληρωτικές μετρήσεις της συγκέντρωσης του Ραδονίου στον εσωτερικό αέρα κτηρίων, και αυτό γιατί είναι μία απλή και οικονομική τεχνική.

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

Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην τοποθέτηση ενός ανιχνευτή (Solid State Nuclear Track Detector), συγκεκριμένα πρόκειται για ένα NRPB/SSI δοσίμετρο που περιέχει TASTRAK CR39 (columbia resin 39 trademark) στοιχείο (προμηθευμένο από τη TASL-UK) διαστάσεων 13 ×37 mm και πάχους 1 mm. Ο ανιχνευτής δρα σε θάλαμος διάχυσης ραδονίου αποκλείοντας την είσοδο στα θυγατρικά του ραδονίου, την σκόνη και την υγρασία επιτρέποντας όμως την είσοδο στο ραδόνιο. Με την παραλαβή των στοιχείων CR-39 τοποθετούνται στο ψυγείο σε αεροστεγή συσκευασία για την μείωση του ageing και του υποβάθρου.

Η χημική διάβρωση πραγματοποιείται με τοποθέτηση των στοιχείων σε καυστικό νάτριο NaOH 5N στους 77°C για 6 ώρες. Τα διαβρωμένα στοιχεία μετρούνται σε μικροσκοπική διάταξη. Η διάταξη αποτελείται από μικροσκόπιο (4×μεγέθυνση) συνδεδεμένο με

ψηφιακή κάμερα. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται αποθηκεύει στις διαδοχικές λήψεις και αθροίζει τα ίχνη σε εμβαδό  $0,4\text{cm}^2$  ( $0,8\text{cm}^2$  για το υπόβαθρο). Επιπλέον παρέχει την δυνατότητα ορισμού των κριτηρίων επιλογής των ιχνών: μέγεθος, διάμετρο και στρογγυλότητα. Σε κάθε διάβρωση προστίθενται και 2 στοιχεία εκτεθειμένα σε πρότυπη άλφα πηγή 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.

Η μέση συγκέντρωση ραδονίου  $\bar{C}$  υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\bar{C} = (n_g - \bar{n}_b) \cdot \frac{1}{t \cdot S_{SSNTD} \cdot F_c}$$

Όπου:

- $F_c$  συντελεστής βαθμονόμησης
- $n_g$  ο αριθμός των ιχνών
- $\bar{n}_b$  μέσος όρος των ιχνών του υποβάθρου
- $S_{SSNTD}$  SSNTD επιφάνεια που μετρήθηκε ( $\text{cm}^2$ )



**Εικόνα 3.5:** Παθητικός ανιχνευτής CR-39 που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική.

# 4

## ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΩΝ ΣΠΗΛΑΙΩΝ

### 4.1 Περιγραφή των σπηλαίων

Τα σπήλαια στα οποία τοποθετήθηκαν οι μετρητές ραδονίου είναι 6 εκ των 1503 σπηλαίων που έχουν καταγραφεί μέχρι το 1999, στο νομό Χανίων. Καθένα από τα οποία είναι ξεχωριστό για τις γεωμορφολογικές του ιδιότητες καθώς και για τους κοινωνικόθρησκευτικούς λόγους επισκεψιμότητας τους. Ακολουθεί πίνακας με την ονομασία των σπηλαίων, την περιοχή που ανήκουν καθώς παρατίθενται τα στίγματα από την είσοδο τους (Τα στίγματα δίνονται με ακρίβεια 3-5 μέτρων σύμφωνα με το GPS που χρησιμοποιήθηκε).

**Πίνακας 4.1:** Ονομασία και περιοχή σπηλαίων.

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΠΗΛΑΙΟΥ	ΠΕΡΙΟΧΗ
Σπήλαιο Κρουνερίδας	Βαφές (Επαρχία Αποκόρωνα)
Σπήλαιο Περιστερέ	Κόκκινο χωριό (Επαρχία Αποκόρωνα)
Σπήλαιο Καββρού	Κόκκινο χωριό (Επαρχία Αποκόρωνα)
Σπήλαιο των Κουρουπήδων	Αλμυρίδα (Επαρχία Αποκόρωνα)
Σπήλαιο Καραβότοπος	Αλμυρίδα (Επαρχία Αποκόρωνα)
Σπήλαιο Αγίου Ιωάννη του Εριμίτη	Γουβερνέτο (Δήμος Ακρωτηρίου)

**Πίνακας 4.2:** Στίγματα εισόδων σπηλαίων.

<b>ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΠΗΛΑΙΟΥ</b>	<b>ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ</b>	<b>ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΜΗΚΟΣ</b>	<b>ΥΨΟΜΕΤΡΟ</b>
<b>Σπήλαιο Κρυονερίδας</b>	N 35° 21.508	E 024° 10.180	262
<b>Σπήλαιο Περιστερέ</b>	N 35° 27.081	E 024° 14.986	118
<b>Σπήλαιο του Καβρού η τρύπα</b>	N 35° 27.328	E 024° 14.325	166
<b>Σπήλαιο των Κουρουπήδων</b>	N 35° 27.996	E 024° 14.070	29
<b>Σπήλαιο Καραβότοπος</b>	N 35° 27.815	E 024° 13.800	44
<b>Σπήλαιο Αγίου Ιωάννη του Εριμήτη</b>	N 35° 35.407	E 024° 08.772	82

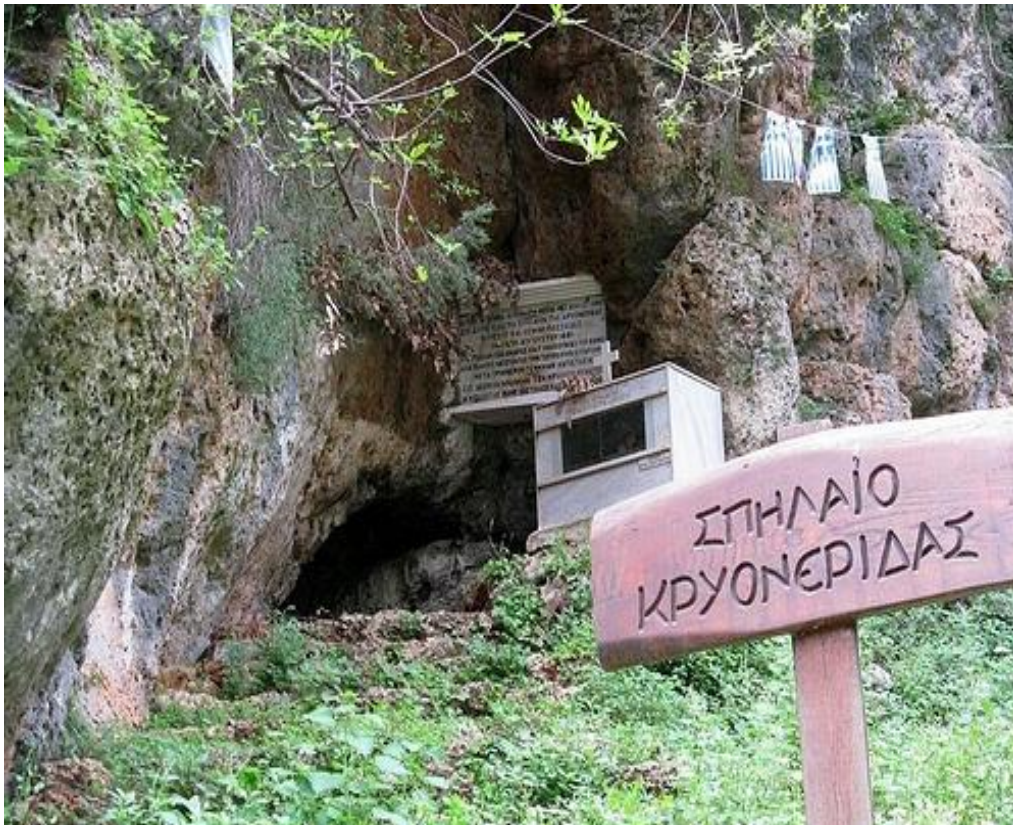
Συγκεκριμένα, από τις πολλαπλές επισκέψεις στα σπήλαια αυτά πριν και κατά την διάρκεια της διεξαγωγής της προετοιμασίας και των μετρήσεων, σε συνδυασμό με τα δεδομένα που παραχωρήθηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία από το κ. Αντώνη Πλυμάκη και το βιβλίο του «Σπήλαια στα Χανιά» και την Σπηλαιολογική Ομάδα του Ορειβατικού Συλλόγου Χανίων ακολουθεί μικρή περιγραφή για κάθε σπήλαιο, καθώς και φωτογραφικό υλικό (Στο παράρτημα παρουσιάζονται χειρόγραφες χαρτογραφήσεις-σκαριφήματα των σπηλαίων):



Εικόνα 4.1: Θέσεις των σπηλαίων στον Ν.Χανίων σύμφωνα με το Google Earth.

## Σπήλαιο Κρυονερίδας στο Βαφέ

Το οριζόντιο αυτό σπήλαιο βρίσκεται στο Βαφέ, ένα μικρό χωριό της επαρχίας Αποκόρωνα, η είσοδος του οποίου βρίσκεται σε υψόμετρο 262 μέτρων και έχει διαστάσεις πλάτος 1.8μ. και ύψος 1.5μ. . Αποτελείται από τέσσερις αίθουσες, εκ των οποίων μεγαλύτερη είναι η πρώτη, ενώ στη δεύτερη διατηρείται μικρό κενοτάφιο με οστά Ελλήνων μαρτύρων που σφαγιάστηκαν κατά την περίοδο της τουρκοκρατίας. Το όνομά του οφείλεται στην μικρή γούρνα με κρύο νερό που βρίσκεται στο βάθος του σπηλαίου. Το συνολικό του μήκος είναι περίπου 30 μέτρα και δεν έχει φυσικό διάκοσμο. Από μετρήσεις που έγιναν το σπήλαιο έχει 84% ποσοστό υγρασίας σε 14,6 °C θερμοκρασίας. Είναι ένα τεκτονοκαρστικό σπήλαιο που αναπτύσσεται εντός των Τριαδικό -Ιουρασικών πετρωμάτων της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων πλησίον του ρήγματος που οριοθετεί την λεκάνη του Νεογενούς στην περιοχή.



**Εικόνα 4.2:** Είσοδος σπηλαίου Κρυονερίδας στο Βαφέ.

### Σπήλαιο Αγίου Ιωάννη του Ερημίτη στο Γουβερνέτο

Ένα οριζόντιο σπήλαιο που βρίσκεται στο Δήμο Ακρωτηρίου, δίπλα στην Ιερά Μονή Γουβερνέτου, μόλις μερικά μέτρα από την Αρκουδοσπηλιά, με συνολικό μήκος 150 μέτρων και ανώμαλη διαδρομή στο εσωτερικό του. Πήρε το όνομά του από τον Όσιο Ιωάννη τον Ερημίτη ο οποίος έζησε στο εσωτερικό του σπηλαίου. Πλούσιο σε φυσικό διάκοσμο σε πολλά σημεία με μεγάλους σταλακτίτες και σταλαγμίτες, που με το πέρασμα του χρόνου οι τουριστικές και θρησκευτικές επισκέψεις έχουν αλλοιώσει σε μεγάλο βαθμό. Το σπήλαιο βρίσκεται σε υψόμετρο 82 μέτρων και από μετρήσεις που έγιναν το σπήλαιο έχει ποσοστό υγρασίας 82% σε 17,5°C θερμοκρασία. Είναι ένα τεκτονοκαρστικό σπήλαιο που αναπτύσσεται εντός μεταμορφωμένων ανθρακικών της ενότητας του Τρυπαλίου αλλά δεν σχετίζεται με εμφανή μεγάλη ρηγματογόνο ζώνη.



**Εικόνα 4.3:** Κολώνα από την ένωση σταλακτίτη και σταλαγμίτη στο σπήλαιο του Αγ.Ιωάννη στο Γουβερνέτο.

### **Σπήλαιο «του Καβρού η τρύπα» στο Κόκκινο χωριό**

Το σπήλαιο αυτό ανήκει στην κατηγορία των σπηλαιοβαράθρων, δηλαδή δεν είναι οριζόντιας αλλά κάθετης ανάπτυξης σπήλαιο, γεγονός που επιβάλει την χρήση σχοινιών καθώς γνώση τεχνικών κάθετης σπηλαιολογίας για την πρόσβση σε αυτό. Η περιοχή της επαρχίας Αποκόρωνα είναι πλούσια σε σπηλαιοβάραθρα καθώς έχουν ήδη ανακαλυφθεί περίπου 280 αντίστοιχα σπήλαια, χάρη στην ιδιαίτερη γεωγραφική θέση του τόπου, μεταξύ των οποίων και το σπηλαιοβάραθρο Γουργούθακας, το βαθύτερο των Βαλκανίων. Η είσοδος του σπηλαίου του Καβρού βρίσκεται σε υψόμετρο 166 μέτρων και έχει συνολική υψομετρική απόσταση με τον πυθμένα του 168 μέτρα. Από μετρήσεις που έγιναν το ποσοστό υγρασίας του σε θερμοκρασία 17,7°C είναι 71%. Είναι ένα σπηλαιοβάραθρο που αναπτύσσεται εντός των Ανωτριάδικών-Ιουρασικών τμημάτων της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων και σχετίζεται με το ρηξιτέμαχος μιας πτυχής.



**Εικόνα 4.4:** Μικροί σταλακτίτες στο σπήλαιο του Καβρού στο Κόκκινο χωριό. (Φωτογραφία Γ. Μαζωνάκη)



### Σπήλαιο Περιστερέ στο Κόκκινο χωριό

Στην ίδια ευρύτερη περιοχή, κοντά στο χωριό της Αλμυρίδας, βρίσκεται το κατακόρυφο αυτό σπήλαιο (σπηλαιοβάραθρο) σε υψόμετρο 118 μέτρων. Η υψομετρική απόσταση από την είσοδο μέχρι τον πυθμένα του σπηλαιού είναι 58 μέτρα και συνεπώς απαιτείται η χρήση σχοινιών για την επίσκεψη των δύο αιθουσών που σχηματίζονται στο βάθος. Το όνομά του οφείλεται στην ύπαρξη περιστεριών που φωλιάζουν καθ' ύψος του σπηλαιοβάραθρου. Από μετρήσεις το σπήλαιο παρουσιάζει ποσοστό υγρασίας 71% σε θερμοκρασία 17,8°C. Είναι ένα σπηλαιοβάραθρο που αναπτύσσεται κατά μήκος μιας εμφανούς ρηγματογόνου ζώνης στην ευρύτερη περιοχή ΒΒΑ διεύθυνσης, εντός των Ανωκρητιδικών πετρωμάτων της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων.



**Εικόνα 4.5:** Είσοδος σπηλαιοβάραθρου Περιστερέ στο Κόκκινο χωριό, (Φωτογραφία Γ.Μαζωνάκη).

## Σπήλαιο των Κουρουπήδων στην Αλμυρίδα

Στην περιοχή της Αλμυρίδας βρίσκεται, επίσης, το οριζόντιο αυτό σπήλαιο σε υψόμετρο 29 μέτρων. Η είσοδός του είναι στενή και το άνοιγμά της περιορίζεται στο ύψος του ενός μέτρου, γεγονός που καθιστά αναγκαία την κίνηση του έρπειν, έως το σημείο που εμφανίζεται η πρώτη αίθουσα σε οριζόντια απόσταση 10 περίπου μέτρων. Με τον ίδιο τρόπο, λίγα μέτρα παρακάτω, συναντά κανείς τη δεύτερη και τελευταία αίθουσα του σπηλαίου με διάκοσμο σε εμβρυακό στάδιο. Από μετρήσεις που έγιναν το σπήλαιο έχει ποσοστό υγρασίας 79% σε θερμοκρασία 16,8 °C. Το σπήλαιο αναπτύσσεται εντός Μειοκαινικών ανθρακικών πετρωμάτων.



**Εικόνα 4.6:** Αίθουσα στο σπήλαιο των Κουρουπιδών στην Αλμυρίδα, (Φωτογραφία Γ.Μαζωνάκη).

### **Σπήλαιο Καραβότοπος στην Αλμυρίδα**

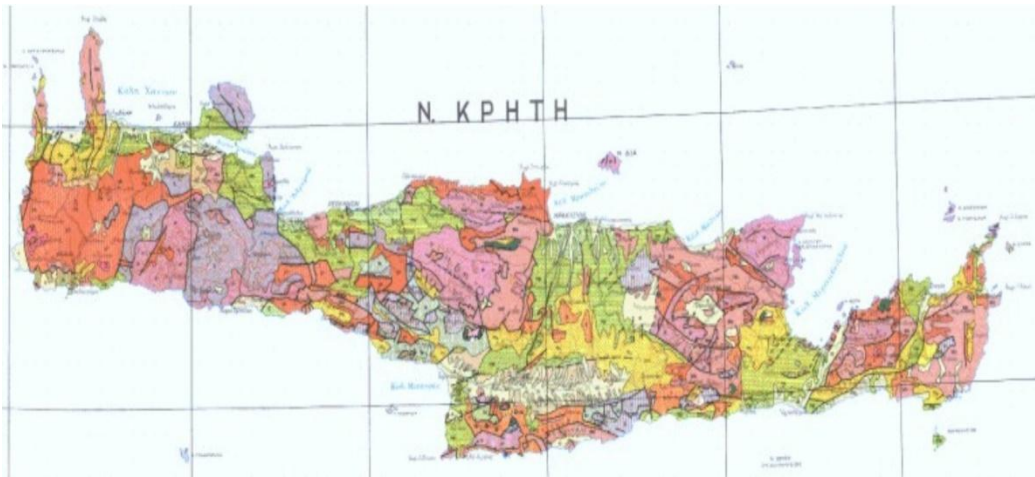
Το σπήλαιο αυτό είναι οριζόντιας ανάπτυξης και βρίσκεται σε υψόμετρο 44 μέτρων. Το πρώτο όνομά του «Καραβότοπος» προέρχεται από την ομόνυμη τοποθεσία, καθώς είναι γνωστό κι ως «του Πετσή ο σπλήλιος» και ως «Μεταξάρη». Χαρακτηριστική είναι η μεγάλη αίθουσα που βρίσκεται ύστερα από 100 μέτρα κατηφορικής διαδρομής. Υπάρχουν αρκετοί σχηματισμοί από σταλακτίτες, κολώνες και πλούσιος σπηλαιοδιάκοσμος. Η ύπαρξη σταγονοροής είναι έντονη γεγονός που καθιστά δύσκολη την κίνηση κατά μήκος του σπηλαίου λόγω ύπαρξης λάσπης. Στο σπήλαιο μετρήθηκε ποσοστό υγρασίας 88% σε θερμοκρασία 16,3°C. Το σπήλαιο αναπτύσσεται εντός Μειοκαινικών ανθρακικών πετρωμάτων.



**Εικόνα 4.7 :** Είσοδος σπηλαίου Καραβότοπος.

## 4.2 Γεωτεκτονική περιγραφή των σπηλαίων

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η γεωλογία και η τεκτονική της περιοχής του Βόρειου τμήματος του Νομού Χανίων, Κρήτης. Ιδιαίτερα του τμήματος στο οποίο ανήκουν τα έξι σπήλαια.



**Εικόνα 4.8:** Τμήμα του Γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:500.000. με κίτρινες και πράσινες αποχρώσεις οι λεκάνες του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς.

Η Κρήτη έχει και αυτή σαν τμήμα των Ελληνίδων Οροσειρών μια πολύπλοκη γεωλογική δομή αντιπροσωπευτική των πολύπλοκων τεκτονομεταμορφικών διαδικασιών του Αλπικού Ορογενετικού Κύκλου στον χώρο της Ανατολικής Μεσογείου. Χαρακτηριστικό της δομής της είναι η καλυμματική τοποθέτηση τεκτονικών ενοτήτων που αποτελούν λιθοστρωματογραφικές ομάδες πετρωμάτων που διαφέρουν όχι μόνο στην αρχική τους παλαιογεωγραφική προέλευση και εξάπλωση, αλλά και στη σύσταση και τον βαθμό μεταμόρφωσης. 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 ενοτήτων που δομούν την νήσο,

εισήγαγαν έναν πολύ μεγάλο αριθμό ονοματολογιών που μόνο οι απόλυτα ειδικοί πλέων μπορούν να διακρίνουν τις ιδιομορφίες και τις διακριτές διαφορές. Η Ομάδα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων κατατάσσεται στην προχώρα των Ελληνίδων. Τα πετρώματα της εμφανίζονται στην Πελοπόννησο δομώντας τους ορεινούς όγκους του Πάρνωνα, του Ταύγετου και ολόκληρης της χερσονήσου της Μάνης. Μέσω της Κρήτης όπου και δομούν πάνω από το 70% της νήσου, συνεχίζουν την εμφάνιση τους στην Κάσο, Κάρπαθο και Ρόδο. Ολόκληρη η ακολουθία χαρακτηρίζεται κυρίως από τεκτονική συμπίεσης με έντονη πτύχωση, λεπίωση, εφιππεύσεις και συγκινηματική μεταμόρφωση.

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 κωνόδοτα) χρονολογήθηκαν ηλικίας Ανωτέρου Πέρμιου. Σαν το παλαιότερο 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 (Ertling et al. 1972, Koenig & 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 δυτικών Ελληνίδων. Στην βάση του βρέθηκαν τρηματοφόρα ηλικίας Κάτω Ολιγόκαινου.

Τεκτονικά επωθημένη στην ενότητα Πλακωδών Ασβεστόλιθων βρίσκεται η ενότητα του Τρυπαλίου, που αποτελείται από μεταμορφωμένους δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, λατυποπαγείς ασβεστόλιθους έως γραουβάκες, σκούρους κυψελώδεις δολομίτες, άσπρα ζαχαρόκοκκα μάρμαρα και εμφανίσεις γύψου στη βάση. Η ηλικία τους καθορίστηκε με την βοήθεια απολιθωμάτων μεταξύ Άνω Τριαδικού-Κάτω Ιουρασικού.

Πάνω από την ενότητα του Τρυπαλίου βρίσκεται η ενότητα των Φυλλιτών-Χαλαζιτών, η οποία περιλαμβάνει φυλλίτες, χαλαζίτες, μετά-ψαμμίτες, μετά-κροκαλοπαγή, φακοειδείς ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, μετά-ανδεσίτες, μεταβασίτες. Η ηλικία της είναι μεταξύ Περμίου-Τριαδικού. Στην ενότητα αυτή συμπεριλαμβάνεται από τους περισσότερους ερευνητές και το ημιμεταμορφωμένο σύστημα των Ραβδούχων που αποτελεί και το υπόβαθρο της ανθρακικής ακολουθίας της ζώνης της Τρίπολης που ακολουθεί επίσης με τεκτονική επίσης επαφή και αποτελείται από στο υποκείμενο και τους μεγάλου πάχους νηριτικούς ασβεστόλιθους. Σε ανώτερη τεκτονική θέση βρίσκεται απωθημένο το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου.

Πάνω από τις παραπάνω αναφερόμενες εξωτερικές ζώνες υπάρχουν σε ανώτερη τεκτονική θέση αλλόχθονα τεκτονικά λείπια των εσωτερικών ζωνών, όπως είναι η ενότητα της Αρβης που περιλαμβάνει τμήματα οφιολιθικού συμπλέγματος, η ενότητα των Αστερουσίων που περιέχει γνεύσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες.

Τέλος, πάνω από τους αλπικούς σχηματισμούς βρίσκονται ιζήματα του Νεογενούς και Τεταρτογενούς τα οποία συνήθως έχουν κυμαινόμενο πάχος και εξάπλωση στις διάφορες περιοχές της Κρήτης (Φυτρολάκης 1980).

Τα τελευταία 30 χρόνια έχουν αναγνωριστεί περισσότερες από 60 λιθολογικές ενότητες του Νεογενούς από πάρα πολλούς ερευνητές. Αυτές οι ενότητες μπορούν να ταξινομηθούν σε έξι ομάδες σχηματισμών (Meulenkamp, 1969), και οι περισσότερες από αυτές μπορούν να αναγνωριστούν σε όλο το νησί. Οι ομάδες αυτές είναι περιληπτικά οι εξής:

- **Ομάδα Πρίνα:** Μαύροι λατυποπαγείς και λατυποκροκαλοπαγείς ασβεστόλιθοι. Όλα τα συστατικά στοιχεία βρίσκονται καλά διαστρωμένα σε καλά λιθοποιημένη κύρια μάζα. Τα λατυποπαγή και λατυποκροκαλοπαγή έχουν εναποτεθεί σε χερσαία υφάλμυρα έως και ρηχής θάλασσας περιβάλλοντα. Η ομάδα Πρίνα αποτελεί την βάση της Νεογενούς ακολουθίας, ή αντιπροσωπεύει το πλευρικό αντίστοιχο τμήμα της υπερκείμενης ομάδας Τεφέλη. Σε ορισμένα σημεία η ομάδα Πρίνα περιέχει μεγάλες πτυχοειδείς δομές που δημιουργήθηκαν

από την ολισθητική κίνηση μεγάλων διαστάσεων αλπικών πετρωμάτων (μαρμάρων, γρανιτών, ασβεστόλιθων κ.λ.π.) που ολίσθησαν στις νεογενείς λεκάνες λόγω βαρύτητας.

- **Ομάδα Τεφελίου:** Αποτελείται από μη συμπαγοποιημένους χερσαίους κλαστικούς σχηματισμούς οι οποίοι υπέρκεινται της ομάδας Πρίνα ή του αλπικού υποβάθρου και υπόκεινται των ανθρακικών ακολουθιών της ομάδας Βρύσες. Οι σχηματισμοί που είναι ενσωματωμένοι στην ομάδα Τεφελίου αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή, άμμο και ιλύ και αντιπροσωπεύουν απόθεση σε γλυκά, υφάλμυρα και θαλάσσια ύδατα.

- **Ομάδα Βρύσες:** Βιοκλαστικοί, συχνά υφαλώδεις φυκώδεις-κοραλλιογενείς ασβεστόλιθοι οι οποίοι αποτελούν το πλευρικό ανάλογο τμήμα εναλλαγών στρωματοποιημένων και ομογενοποιημένων μαργών ρηχής θάλασσας. Σε μερικά σημεία οι μάργες περιέχουν συγκεντρώσεις γύψου. Η ομάδα Βρύσες υπέρκειται της ομάδας Τεφελίου, του αλπικού υποβάθρου και σπανίως της ομάδας Πρίνα.

- **Ομάδα Ελληνικού:** Αποτελείται από ερυθρού χρώματος, χερσαία κροκαλοπαγή, ποταμο-λιμναίες, σχετικά λεπτόκοκκες, ακολουθίες και κατά τόπους υφάλμυρες αποθέσεις με λίγη γύψο. Η ομάδα Ελληνικού υπέρκειται της ομάδας Βρύσες, παλαιών Νεογενών στρωμάτων και κατά τόπους του αλπικού υποβάθρου.

- **Ομάδα Φοινικιά:** Όλοι οι σχηματισμοί οι οποίοι αποτελούνται από ανοιχτής θαλάσσης μάργες και ιλύες και οι οποίοι υπέρκεινται της ομάδας Ελληνικού ή της ομάδας Βρύσες ενσωματώνονται στην ομάδα Φοινικιά. Πολύ συχνά οι μάργες περιέχουν στρωματοποιημένα πυριτικά λεπτά στρώματα. Σε ορισμένα σημεία η βάση της ομάδας Φοινικιά αποτελείται από μαργαϊκά λατυποπαγή.

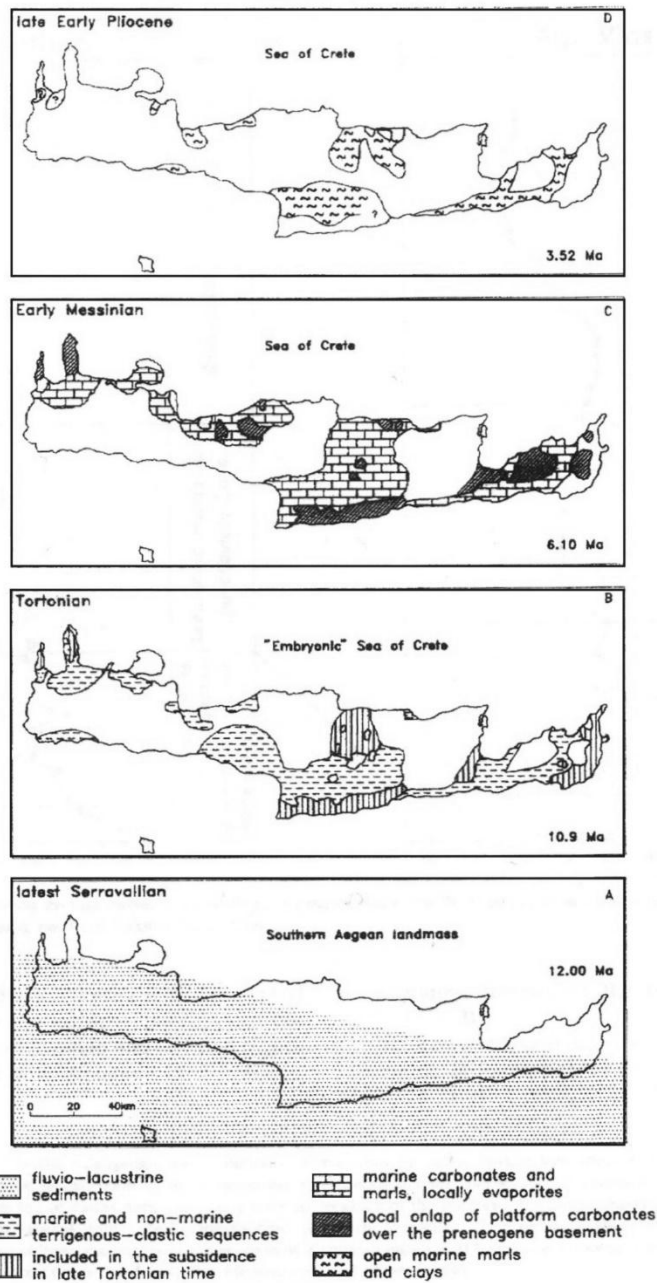
- **Ομάδα Αγ. Γαλήνης:** Αδρομερή, γενικά ερυθρού χρώματος, χερσαία κροκαλοπαγή και ψαμμίτες οι οποίοι υπέρκεινται ή αποτελούν σε ορισμένα μέρη το πλευρικό ανάλογο των ιζημάτων της ομάδας Φοινικιά. Η ομάδα Αγ. Γαλήνης αντιπροσωπεύει την υψηλότερη ενότητα Νεογενών πετρωμάτων της Κρήτης.

- **Πλειστόκαινο:** Δεν έχει γίνει καμία ουσιαστική υποδιαίρεση των θαλασσίων αναβαθμίδων και των ηπειρωτικών αποθέσεων του Πλειστόκαινου. Τα Πλειστοκαινικά ιζήματα υπέρκεινται ασύμφωνα των Νεογενών και αλπικών πετρωμάτων (Ντρίνια, 1996).

Στην Εικόνα. 4.9 παρουσιάζεται μια σειρά από απλοποιημένους παλαιογεωγραφικούς χάρτες. Οι διαδοχικές παλαιογεωγραφικές διατάξεις αντικατοπτρίζουν τέσσερα κύρια επεισόδια κατά την εξέλιξη του ανάγλυφου κατά μήκος της διατομής στην κεντρική Κρήτη. Κατά την διάρκεια του πρώτου επεισοδίου (Άνω Σαρραβάλλιο) στη περιοχή λάμβανε χώρα λιμναία ιζηματογένεση και οριοθετούσε την ξηρά του νοτίου Αιγαίου (Southern Aegean landmass). Το δεύτερο και τρίτο επεισόδιο (Ανώτατο Σαρραβάλλιο-Μεσσήνιο) δημιούργησαν ένα παλαιογεωγραφικό καθεστώς, όπου οι σημερινές κορυφογραμμές που οριοθετούν και διατέμνουν την λεκάνη του Ηρακλείου, άρχισαν να παίζουν ενεργό ρόλο στην παλαιογεωγραφία και την τοπογραφία του πυθμένα. Κατά την διάρκεια του Άνω Μειοκαίνου αναπτύχθηκε η λεκάνη του Ηρακλείου ενώ οι κορυφογραμμές της κεντρική Κρήτης με διεύθυνση Α-Δ άρχισαν να διαχωρίζουν την λεκάνη στο βόρειο και νότιο τμήμα της. Το τέταρτο επεισόδιο χαρακτηρίζεται από την έντονη άνοδο όλης της περιοχής κατά το Πλείο-Πλειστόκαινο.

Λεπτομερειακή ανάλυση της νεοτεκτονικής συμπεριφοράς της περιοχής μελέτης, έδειξε ότι, η περιοχή της Δ. Κρήτης από το Μέσο Μειόκαινο μέχρι σήμερα, επηρεάστηκε από δύο κύρια ρηξιγενή τεκτονικά γεγονότα, που έλαβαν χώρα σε καθεστώς έκτασης του φλοιού και συγχρόνως με τη σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών Αφρικής και Ευρασίας. Τα δύο αυτά νεοτεκτονικά γεγονότα (D1 και D2) αναπτύσσουν μια εντελώς διαφορετική κινηματική και δυναμική εικόνα το ένα από το άλλο, με τους άξονες δράσης της ελάχιστης  $\sigma_3$ -τάσης σχεδόν κάθετους μεταξύ τους. Περίπου B-N διεύθυνση ανάπτυξης για το D1 και ~A-Δ διεύθυνση ανάπτυξης για το D2. Συγχρόνως παρατηρείται ανάλογα, περιστροφή των δύο άλλων αξόνων τάσεων, του ενδιάμεσου  $\sigma_2$ -άξονα και του μέγιστου  $\sigma_1$ - άξονα (Μουντράκης, 2004).





**Εικόνα 4.9:** Παλαιογεωγραφική εξέλιξη των Νεογενών ιζημάτων στην Κρήτη (κατά Meulenkamp et al 1979).



### ΥΠΟΜΝΗΜΑ

#### ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ

- al Αλλουβιακές αποθέσεις. Χαλαρά υλικά που αποτελούνται από άμμους, αργίλους και χαλίκια.
- sc-ca Πλευρικά κορήματα.
- Ter Ερυθρογή. Προϊόν καρπτικής διάβρωσης.
- dl Διλλουβιακές αποθέσεις. Ποτάμιες και χειμαρρώδεις αποθέσεις που αποτελούνται από χαλαρά υλικά αργίλων, άμμων και κροκαλοπατιών.

#### ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ

- M-Pm Μάργες (Ανώτερο Μειόκαινο - Πλειόκαινο).
- Mk Ασβεστολιθοί λευκοί - κίτρινοι με λεπτιές μαργαλικές και φαιμικές ενστρώσεις (Μέσο - Άνω Μειόκαινο).
- Mm Μάργες με εναλλαγές φαιμιτών και κατά θέσεις κροκαλοπατιών, Αστυποπαγιών (Μέσο - Άνω Μειόκαινο).
- Mb Ασβεστολιθικά κροκαλοπατιοπαγή (Μέσο - Άνω Μειόκαινο).
- Me Χαλαζήτικα - φυλλίτικα κροκαλοπατιοπαγή (Μέσο - Άνω Μειόκαινο).

#### ΠΡΟ-ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

##### Ανώτερες Τεκτονικές Ενότητες

###### Τεκτονικό κάλυμμα Πίνδου

- Io Φλώχης Πίνδου. Εναλλαγές φαιμιτών και μαργών (Παλιόκαινο - Νόκαινο).
- Ksk Ασβεστολιθοί πλακάδες με πυριτικές και αργιλικές ενστρώσεις (Άνω Κρητικό).
- sch Σχιστοκρατολιθική διέπλωση και πρώτος φλώχης. Αποτελείται από εναλλαγές κρατολιθων, αργιλικών σχιστολιθων, φαιμιτών, μαργαλικών ασβεστολιθων (Ιουραϊκό - Κάτω Κρητικό).

###### Τεκτονικό κάλυμμα Τρίπολης

- tr Φλώχης Τρίπολης. Εναλλαγές μαργών - φαιμιτών και κροκαλοπαγιών (Ολιγόκαινο).
- Tsk Ανθρακική σειρά Τρίπολης. Ασβεστολιθοί παχυστρωματώδεις τερφοί - μαύροι (Τριαδικό - Νόκαινο).

##### Κατώτερες Τεκτονικές Ενότητες

###### Τεκτονικό κάλυμμα Φυλλιτών - Χαλαζιτών

- Ph Φυλλίτες - Χαλαζίτες. Εναλλαγές μικροί και μεγάλοι πάχους στρωμάτων χαλαζιτών, φυλλιτών, αρακτικών και χλωριτικών σχιστολιθων με σπανιότερες ενστρώσεις ανακρυσταλλωμένων ασβεστολιθων και σιματών βασικών - υπερβασικών πυριγενών πετρωμάτων (Τριδικό - Τριαδικό).

###### Ενότητα Τριταλίου

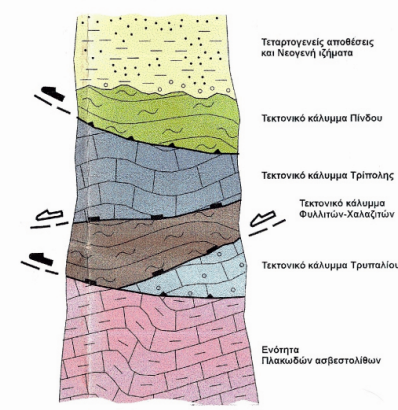
- Jk Ανθρακικά πετρώματα ανακρυσταλλωμένα. Ασβεστολιθοί και δολομίτες παχυστρωματώδεις, κροκαλοπατιοπαγείς, έντονα καρπικοποιημένοι. (Τριαδικό - Ιουραϊκό).

###### Ενότητα Πλακωδών Ασβεστολιθων (Plattenkalk).

- Pc Πλακώδεις ασβεστολιθοί με πυριτικές ενστρώσεις και κονδύλους σκληρά ανακρυσταλλωμένοι - μάρμαρα (Τριαδικό - Νόκαινο).

- Θέσεις σπηλαίων
- Ρήγματα Ι.Γ.Μ.Ε.
- Μεγάλο ενεργό ρήγμα
- Μεγάλο πιθανό ενεργό ρήγμα
- Μεγάλο ανενεργό ρήγμα
- Ανενεργό ρήγμα
- Ρήγμα διαφυγής
- Επώθηση
- Παράρτη και διεύθυνση κλίσης πετρωμάτων
- Παράρτη κατακόρυφων στρωμάτων

- T Γεωλογική Τομή
  - 1, 2, ..., 13 Μετρήσιμα των μεγάλων ρημάτων
  - Παλαιασκή
  - Όρια Δήμων
- Ισοδιάσταση: 100 m



Τεκτονικό ακαρίφημα - στήλη των τεκτονικών ενότητων του προ-Νεογενούς υποβόθρου της Κρήτης, που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης.

Ο Γεωλογικός χάρτης περιέλαβε δεδομένα από τις γεωλογικές χαρτογραφίες της ερευνητικής ομάδας που έγιναν από το 1983 μέχρι σήμερα στα πλαίσια διαφόρων μελετών (Κίλας, Α. et al. 1983, 1984, Παυλάκη, Α. et al. 1990, 1991 κ.α.). Ως βάση της γεωλογίας της Δ. Κρήτης χρησιμοποιήθηκαν ο χάρτης του Spreutzberg (1977) και τα φύλλα γεωλογικών χαρτών του Ι.Γ.Μ.Ε. κλίμακας 1:50.000, με αναμόρφωση της δομής και των ορίων των σχηματισμών σύμφωνα με την έρευνα των Κίλας et al. (1994) και σύμφωνα με τα δεδομένα της νέας χαρτογράφησης.

Ο χάρτης κατασκευάστηκε με χρήση του προγράμματος ArcGIS version 8.1 από τη Γεωλόγο Ε. Φωμάδου στο Εργαστήριο Γεωλογίας & Παλαιοντολογίας του Α.Π.Θ. Ως τοπογραφικό υπόβαθρο χρησιμοποιήθηκαν τα φύλλα της Γ.Υ.Σ. κλίμακας 1:50.000 ψηφιοποιημένα από τον Τοπογράφο Χ.Ριζούτη στο Μελετητικό Γραφείο του Πολιτικού Μηχανικού Π. Παυλάκη στα Χανιά.



**Εικόνα 4.10:** Νεοτεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής της βόρειας ζώνης του νομού Χανίων Κρήτης, στον οποίο έχουν σημειωθεί τα ρήγματα του Ι.Γ.Μ.Ε, καθώς και η θέση των υπό μελέτη σπηλαίων (Μουντράκης, 2002 με τεκτονικά στοιχεία από τα αντίστοιχα φύλλα χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε).

# 5

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκέντρωσης του ραδονίου, έπειτα από 3 μήνες που παθητικοί ανιχνευτές τύπου CR-39 ήταν τοποθετημένοι στα παραπάνω σπήλαια.

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί πως ο αρχικός στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η μέτρηση συγκέντρωσης ραδονίου σε 8 συνολικά σπήλαια. Καθώς, δύο ίδιοι μετρητές είχαν τοποθετηθεί σε δύο επιπλέον σπήλαια από αυτά που ήδη έχουν αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα σπήλαια αυτά ήταν το σπηλαιοβάραθρο «του Τζανή ο σπήλιος» στο Οροπέδιο του Ομαλού και το σπήλαιο «Αρκουδοσπηλιά» στον Δ.Ακρωτηρίου. Οι μετρητές αυτοί εκλάπησαν για άγνωστους λόγους, παρόλο που το πρώτο σπήλαιο είναι κάθετης ανάπτυξης και ήταν τοποθετημένοι σε δυσπρόσιτο σημείο. Συνέπεια αυτού του γεγονότος είναι η μείωση του πλήθους των μετρήσεων και του εύρους της περιοχής αυτών. Στην συνέχεια, χρειάζεται να αναφερθεί πως οι μετρήσεις ποσοστού υγρασίας και θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκαν διαφορετική χρονική περίοδο από εκείνη των μετρήσεων, αν και οι συνθήκες στο περιβάλλον των σπηλαίων διατηρούνται σχεδόν σταθερές καθόλη την διάρκεια του έτους.

**Πίνακας 5.1:** Κωδικοί μετρητών ραδονίου και χρονική διάρκεια μέτρησης τους.

<b>ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΠΗΛΑΙΟΥ</b>	<b>ΚΩΔΙΚΟΣ ΜΕΤΡΗΤΗ</b>	<b>ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</b>	<b>ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</b>
Σπήλαιο Κρυονερίδας	GR 5656	23/03/13	24/06/13
Σπήλαιο Περιστερέ	GR 5662	29/03/13	02/07/13
Σπήλαιο του Καβρού η τρύπα	GR 5658	29/03/13	02/07/13
Σπήλαιο των Κουρουπήδων	GR5655	05/04/13	05/07/13
Σπήλαιο Καραβότοπος	GR 5657	07/04/13	07/07/13
Σπήλαιο Αγίου Ιωάννη τουΕριμήτη	GR 5649	23/03/13	26/06/13

**Πίνακας 5.2:** Μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας στα αντίστοιχα σπήλαια.\

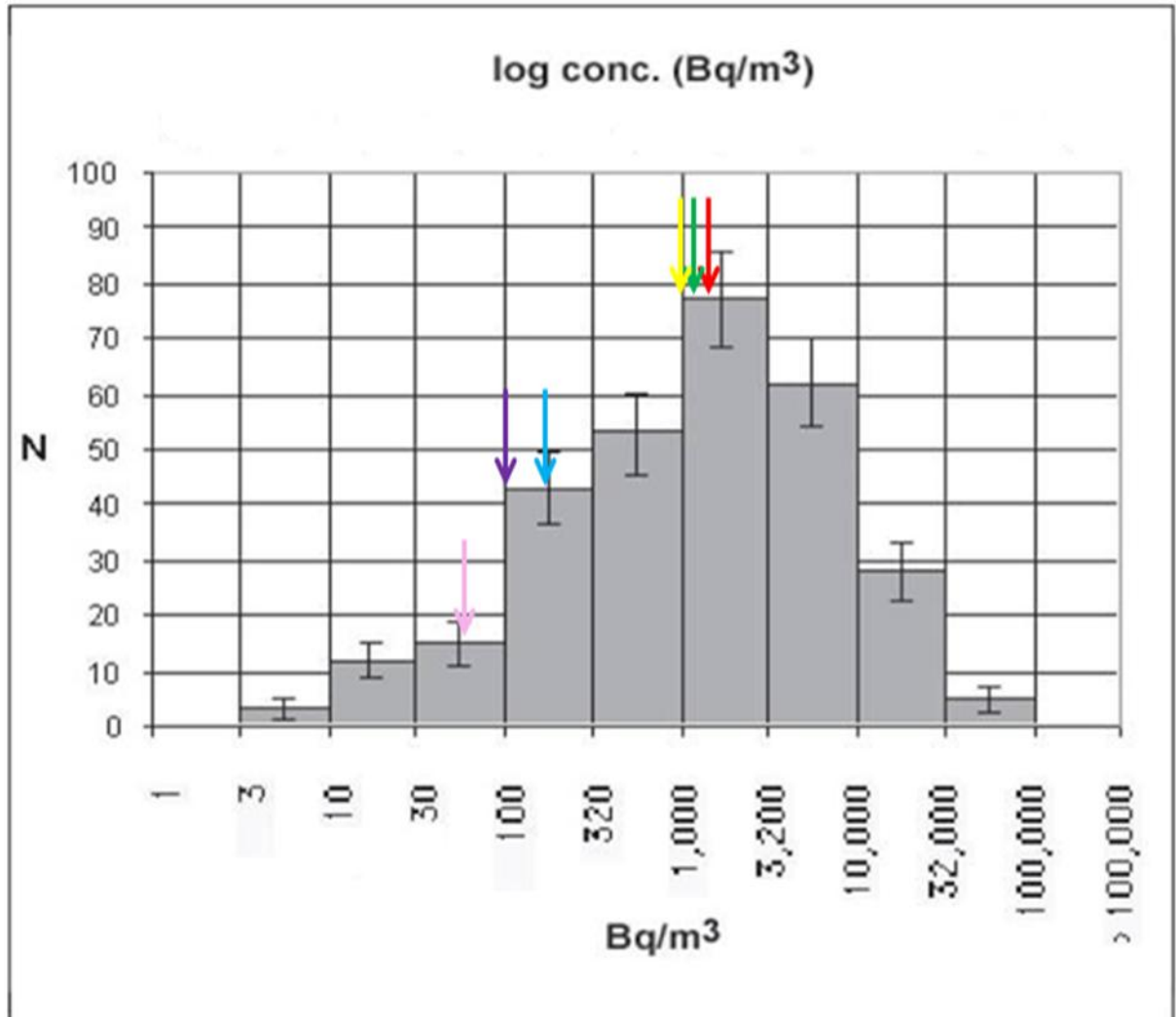
<b>ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΠΗΛΑΙΟΥ</b>	<b>ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΠΗΛΑΙΟΥ (°C)</b>	<b>ΥΓΡΑΣΙΑ ΕΠΙ ΤΙΣ %</b>
Σπήλαιο Κρυονερίδας	14,6	84
Σπήλαιο Περιστερέ	17,8	71
Σπήλαιο του Καβρού η τρύπα	17,7	79
Σπήλαιο των Κουρουπήδων	16,8	79
Σπήλαιο Καραβότοπος	16,3	88
Σπήλαιο Αγίου Ιωάννη του Εριμήτη	17,5	82

**Πίνακας 5.3:** Αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης ραδονίου.

<b>ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΠΗΛΑΙΟΥ</b>	<b>ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Σπήλαιο Κρυονερίδας</b>	2207
<b>Σπήλαιο Περιστερέ</b>	275
<b>Σπήλαιο του Καβρού η τρύπα</b>	110
<b>Σπήλαιο των Κουρουπήδων</b>	1374
<b>Σπήλαιο Καραβότοπος</b>	1687
<b>Σπήλαιο Αγίου Ιωάννη του Ερημίτη</b>	74

Συγκρίνοντας τις παραπάνω μετρήσεις με τις τιμές του γραφήματος που ακολουθεί, παρατηρούμε ότι τρία από τα σπήλαια όπου μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις ραδονίου ανήκουν στην πολυπληθέστερη κατηγορία συγκέντρωσης ραδονίου 1000 έως 3200 Bq/m<sup>3</sup>. Ενώ άλλα δύο από τα έξι σπήλαια ανήκουν στην τέταρτη πολυπληθέστερη κατηγορία των 100 έως 320 Bq/m<sup>3</sup>, και το έκτο ανήκει στην έκτη κατά σειρά αντίστοιχη κατηγορία, με χαμηλότερη συγκέντρωση των 30 έως 100 Bq/m<sup>3</sup>. Παρατηρείται, λοιπόν συμφωνία των μετρηθέντων τιμών με τα στατιστικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε παγκόσμια κλίμακα.

**Πίνακας 5.4:** Συγκριτική απεικόνιση αποτελεσμάτων της κατανομής της συγκέντρωσης του ραδονίου σε σχέση με την λογαριθμική κατανομή περιεκτικότητας ραδονίου σε 220 σπήλαια παγκόσμιας κλίμακας.



	ΣΠΗΛΑΙΟ ΚΡΥΟΝΕΡΙΔΑΣ
	ΣΠΗΛΑΙΟ ΚΑΡΑΒΟΤΟΠΟΣ
	ΣΠΗΛΑΙΟ ΚΟΥΡΟΥΠΙΔΩΝ
	ΣΠΗΛΑΙΟ ΠΕΡΙΣΤΕΡΕ
	ΣΠΗΛΑΙΟ ΤΡΥΠΑ ΤΟΥ ΚΑΒΡΟΥ
	ΣΠΗΛΑΙΟ ΑΙ ΓΙΑΝΝΗ ΤΟΥ ΕΡΗΜΙΤΗ

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής:

Σε τρεις διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς, τρία σπήλαια εκ των οποίων ένα κλειστό και δύο σπηλαιοβάραθρα, έχουν δημιουργηθεί σε πετρώματα της ομάδας των πλακωδών ασβεστολίθων και ένα σπήλαιο σε πετρώματα της ενότητας του Τρυπαλίου. Τα άλλα δύο σπήλαια έχουν σχηματισμοί εντός των ανθρακικών σχηματισμών του Νεογενούς. Τέσσερεις από τις σπηλαιώσεις είναι κλειστά σπήλαια ενώ δύο είναι ανοιχτά σπηλαιοβάραθρα.

Οι μεγαλύτερες τιμές που μετρήθηκαν στα κλειστά σπήλαια της Κρυονερίδας (Εντός των πλακωδών ασβελίθων) με συγκέντρωση ραδονίου ίση με  $2207 \text{ Bq/m}^3$  και εντός των σπηλαίων του Νεογενούς, σπήλαιο Καραβότοπος και των Κουρουπήδων με αντίστοιχες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου  $1687 \text{ Bq/m}^3$  και  $1374 \text{ Bq/m}^3$ .

Αξιοσημείωτο είναι ότι στα δύο σπηλαιοβάραθρα (που συνδέονται άμεσα με ρήγματα και σχηματίστηκαν εντός των πετρωμάτων της ομάδας των πλακωδών ασβεστολίθων μετρήθηκαν υψηλές τιμές διαφυγής ραδονίου στην ατμόσφαιρα (Η τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου στο Σπήλαιο Περιστερέ όπως αυτή μετρήθηκε είναι  $275 \text{ Bq/m}^3$  ενώ αντίστοιχα στο σπήλαιο του «Καβρού η τρύπα» είναι  $110 \text{ Bq/m}^3$ ).

Η μικρότερη τιμή συγκέντρωσης ραδονίου ( $74 \text{ Bq/m}^3$ ) μετρήθηκε στο σπήλαιο «του Αγίου Ιωάννη του Εριμήτη» που έχει σχηματιστεί εντός των πετρωμάτων της ενότητας του Τρυπαλίου.

# 6

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

- Όλες οι τεκτονοκαρστικές δομές που δημιουργήθηκαν στα πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων εμφανίζουν αυξημένες τιμές είτε συγκέντρωσης είτε διαφυγής ραδονίου.
- Αυξημένες τιμές ραδονίου εμφανίζουν τα σπήλαια εντός των ασβεστολιθικών πετρωμάτων του Νεογενούς που πιθανώς η πηγή προέλευσης του ραδονίου σχετίζεται με τις εμφανίσεις λιγνιτών που υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή (Pantinakis et al. 2012).
- Αν και υπάρχει μόνο μια μέτρηση, για την ερμηνεία της τιμής αυτής της μέτρησης, θα μπορούσε να ειπωθεί, ότι ρήγματα εντός των πετρωμάτων της ενότητας του Τρυπαλίου που δεν διαπερνούν το σύνολο της τεκτονικής ενότητας και δεν επικοινωνούν με ρήγματα της υποκείμενης τεκτονικά Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων δίνουν και τις χαμηλότερες μετρηθείσες τιμές σε σπήλαια που δημιουργήθηκαν στην συνέχεια με τη διαδικασία της καρστικοποίησης. Αυτή η θέση θα πρέπει να επαληθευτεί και από άλλες μετρήσεις.
- Από τα παραπάνω αναγκαία είναι η συστηματική μελέτη τόσο των ρηγμάτων – τεκτονοκαρστικών σπηλαίων που έχουν σχηματιστεί σε πετρώματα της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστολίθων όσο και οι αντίστοιχες δομές στα ανθρακικά του Νεογενούς.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική

Ανδρεαδάκης Ι. (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, σελ.91, Αθήνα, 2003.

Γιαννόπουλος Β. (2000): Συμβολή στη μελέτη σύγχρονων και παλαιών περιβαλλόντων των πλέων σημαντικών ελληνικών σπηλαίων. Διδακτορική διατριβή σελ.9-73. Καποδίστρια πανεπιστήμιο. Αθήνα, 2000.

Δούτσος Θ. (2000): Γεωλογία Αρχές και Εφαρμογές, Leader Books, Αθήνα, 2000.

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

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

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

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

Κασινάλης Χ. (2008): Μέθοδος in situ μετρήσεις Ραδονίου στο νερό Αξιολόγηση της μεθόδου και εφαρμογή της στη μέτρηση ραδονίου σε πηγή μεταλλικού νερού. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Θεσσαλονίκη, 2008.

Κουκουβέλας Ι. (1998): Τεκτονική Γεωλογία, Leader Books, Αθήνα, 1998

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

Μυρμηγιάννης Ι. (2005): Μοντελοποίηση καρστικού σπηλαίου στα πλαίσια ανάδειξης και προβολής φυσικών πόρων, Χανιά, Οκτώβρης, 2005. 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.

Ντρίνια Χ. (1996): Κλαστική ιζηματογένεση στο ανώτερο Καινοζωικό της Δυτικής Κρήτης – Η λεκάνη των Αποστόλων – Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα

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.

Παπαδοπούλου Βρυνιώτη, (2000): Σημειώσεις θεμάτων Καρστικής Γεωμορφολογίας, Εθν. και Καποδ. Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχ. Θετ. Επιστημ., Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωγραφίας – Κλιματολογίας.

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

Παπαπέτρου – Ζαμάνη Α., (1968): Η λίμνη της Βουλιαγμένης (Αττική) Α.Γ.Ρ.Η., XXI σ. 210-216, Αθήνα, 1968.

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

Σεφτελής Ι. (2007): Μεταβολές της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στον υπαίθριο επιφανειακό αέρα. Ξάνθη, 2007.

Τεχνικές μετρήσεων κα όργανα για την ενεργειακή επιθεώρηση στα κτήρια και την βιομηχανία (κωδ.ΕΝΕΡ.7) ΙΕΚΕΜ ΤΕΕ.

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

Υπ.Εργασίας.Κοιν.Ασφαλίσεων, (2009): Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας, Η ακτινοβολία στη ζωή μας, Λευκωσία, 2009

## Διεθνής

Bonacci O. (1987): Karst hydrology with special reference to the dynamic karst. Springer – Verlag, 184p., Berlin, Heidelberg, New York, 1987.

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

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

Cigna A.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.

COST action 65 (1995). Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas. Guidelines, European Commission, Directorate – General Science, Research and Development, 16p.

Curl R.L., (2005): Personal communication to A.A.Cigna, 5 April, 2005.

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

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

Hakl J., Hunyadi I. & Vurhegyi 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.

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

Louizi, A., Koukouiiou, 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.

Meulenkamp, J.E., Jonkers, A., Spank, P., (1979): Late Miocene to Early Pliocene development of Crete, -Proceedings of the VI colloquium on the Geology of the Aegean Region, Athens, pp. 137—149.

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

National Council on Radiation Protection and Measurements (1987): Exposure of the population in the United States and Canada from natural background, NCRP Report No.94, 1987.

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

Pantinakis A., Manoutsoglou E. & 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.

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.

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

UNSCEAR (1982): (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) Report to the general assembly, with annexes. United Nations ed.. New York, E.82.IX.8, 1982.

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

U.S. EPA, (2003): EPA Assessment of Risks from Radon in Homes. EPA 402-R-03-003

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

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

## **Παγκόσμιος Ιστός**

Link 1: <http://users.sch.gr/stayrakant/lyk/par/namements.htm>

Link 2: <http://cornellchem.wikispaces.com/Radon>

Link 3: <http://omega.physics.uoi.gr/radon/Greek/Readmore.htm>

Link 4: <http://users.uoa.gr/~jalexopoulos/radioactivity.pdf>

Link 5: [http://www-np.ucy.ac.cy/radio\\_isotopes/wwwen/radon/anastasiou /  
diploma1.pdf](http://www-np.ucy.ac.cy/radio_isotopes/wwwen/radon/anastasiou/diploma1.pdf)

Link 6: <http://www.uwec.edu/johlhm/cave2007/teamb/geology.html>

Link 7: <http://images.yourdictionary.com/karst-topography>

Link 8: <http://earthsci.org/processes/geopro/karst/karst.html>

Link 9: <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg537y/ch5.htm>

Link 10: [http://ipta.demokritos.gr/documents/erl-1-erp032009\\_takis.pdf](http://ipta.demokritos.gr/documents/erl-1-erp032009_takis.pdf)

Link 11: [http://www.buildings.gr/greek/eksoplismos/oikologika\\_ilika/radonio.htm](http://www.buildings.gr/greek/eksoplismos/oikologika_ilika/radonio.htm)

Link 12: <http://www.iaea.org/ns/tutorials/regcontrol/intro/glossarya.htm>

### **Χρήσιμοι σύνδεσμοι**

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

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

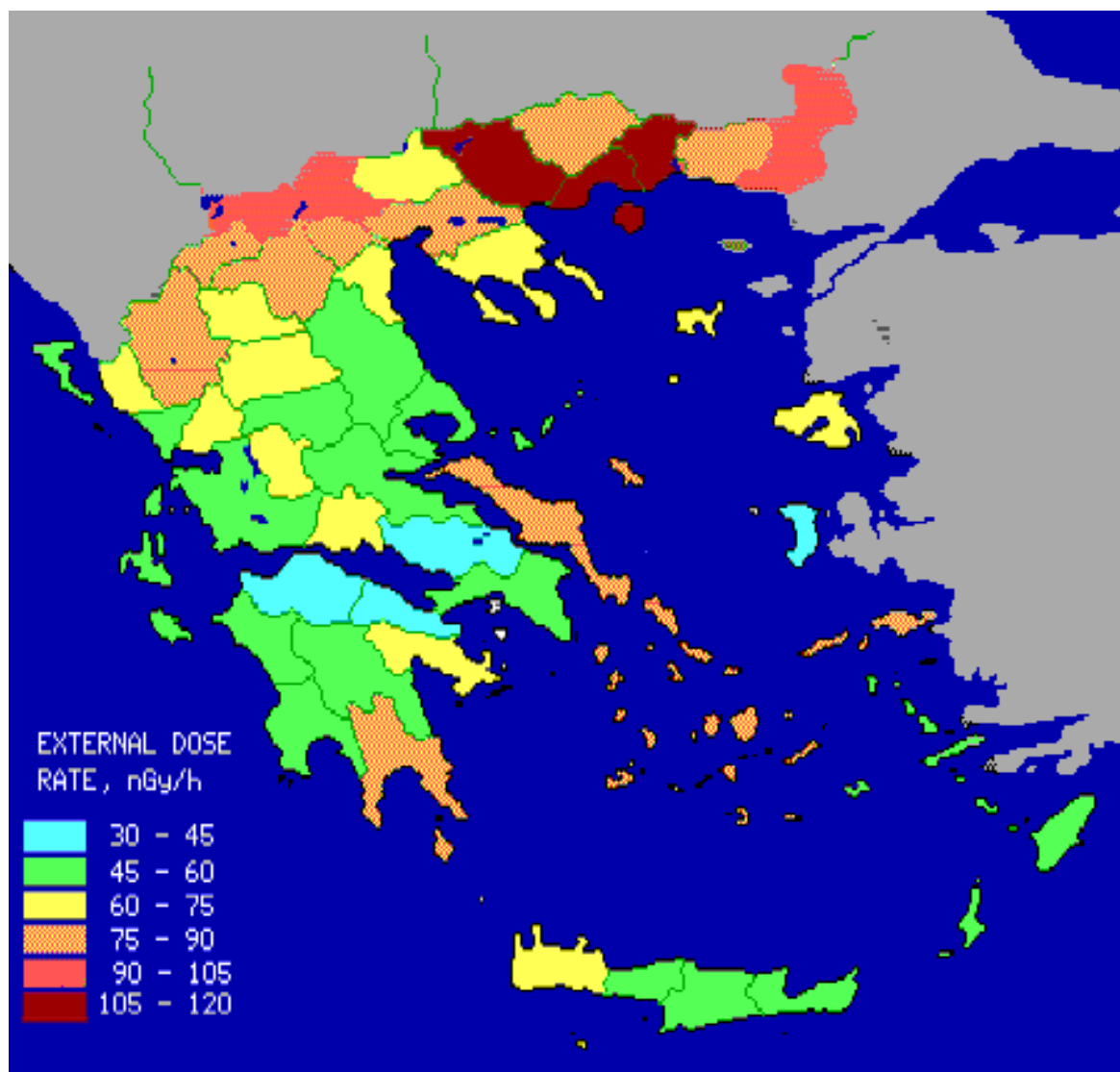
[WHO , Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας](#)

[European Forum on Radon Mapping](#)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΕΙΣ

### Α1.ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΦΥΣΙΚΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΛΔΑΦΩΝ

[Link: 10]



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

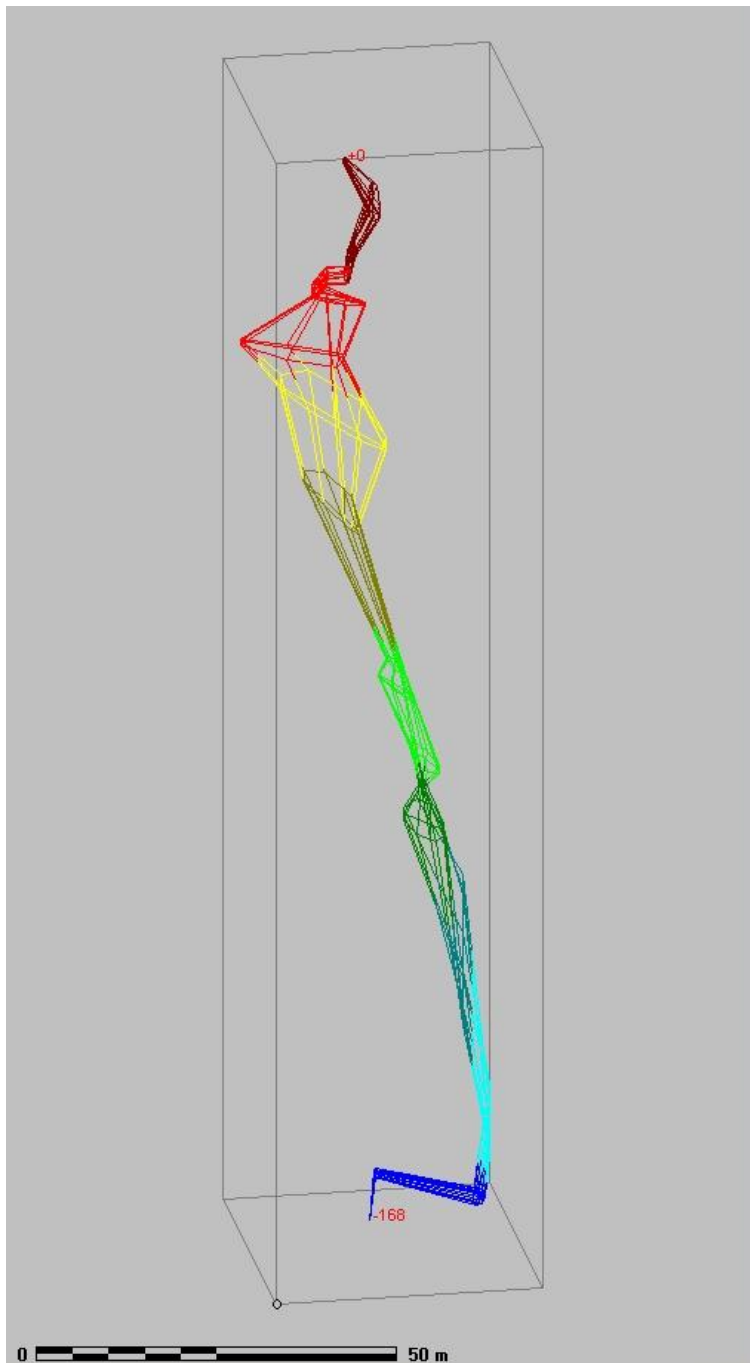
[Link: 12]

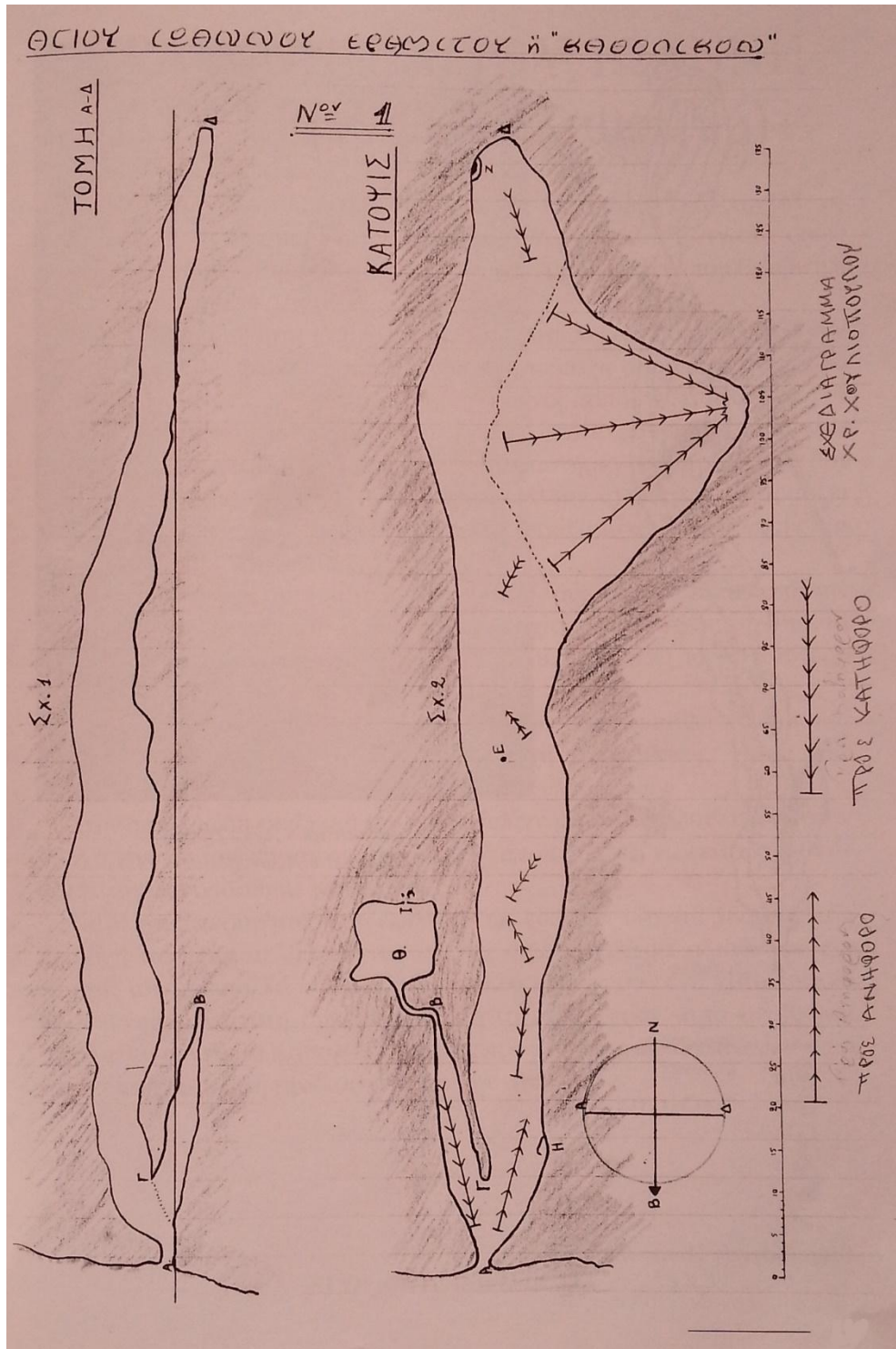
<b>Χωριό</b>	<b>Νομός</b>	<b>Συσσώρευση ραδονίου σε bq/m<sup>3</sup></b>
<b>Νεράιδα</b>	Θεσπρωτίας	511 bq/m <sup>3</sup>
<b>Μελιβοία</b>	Ξάνθης	460 bq/m <sup>3</sup>
<b>Κέντρο Πόλης</b>	Καβάλας	350 bq/m <sup>3</sup>
<b>Σέλερο</b>	Ξάνθης	320 bq/m <sup>3</sup>
<b>Πρασινάδα</b>	Δράμας	280 bq/m <sup>3</sup>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



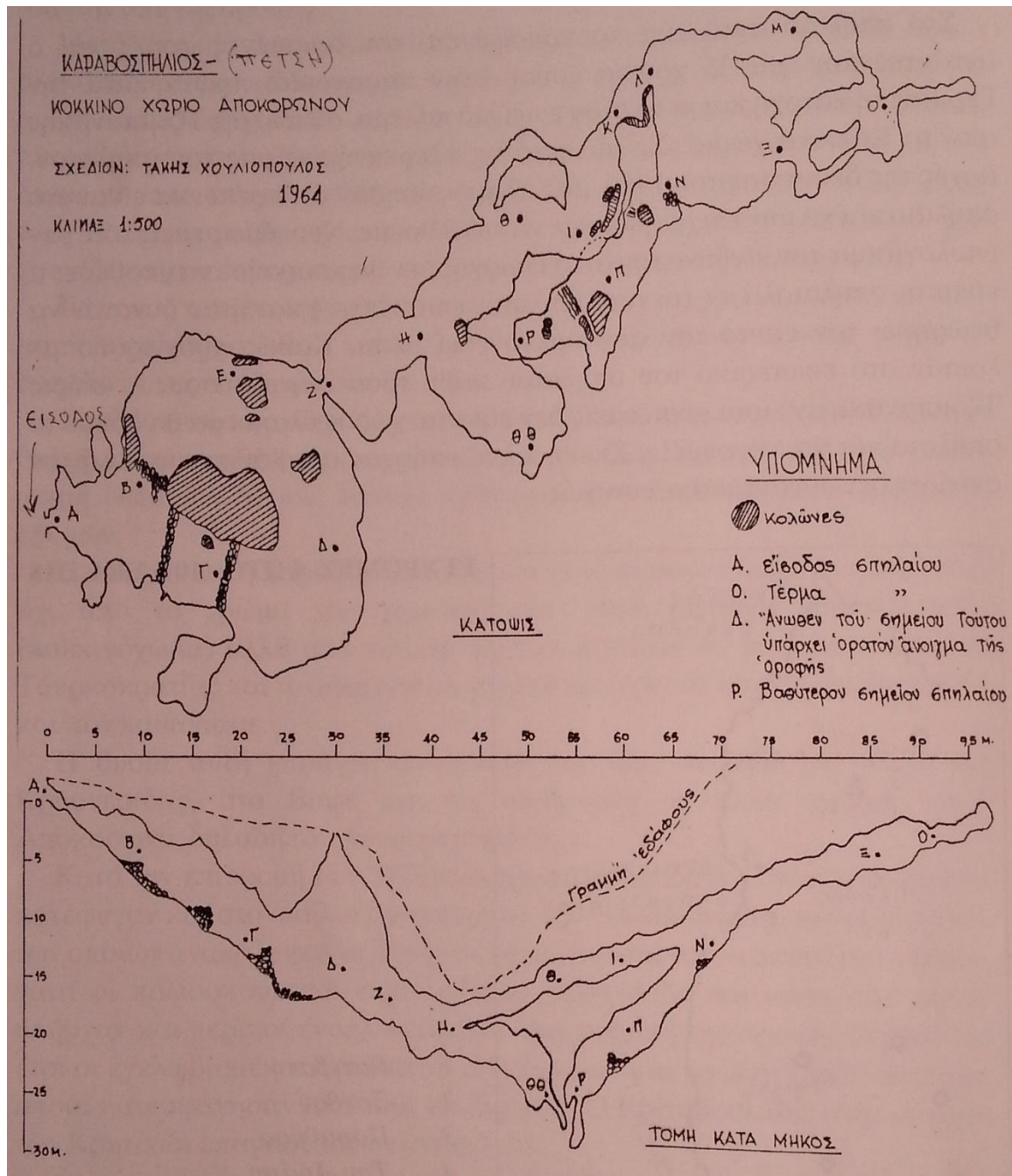
## Α2.ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΕΙΣ ΣΠΗΛΑΙΩΝ

Εικόνα β<sub>1</sub> : Χαρτογράφηση σπηλαιοβαράθρου του «του Καβρού η τρύπα».





**Εικόνα β<sub>2</sub>** : Χαρτογράφηση Σπηλαίου του «του Αγ. Ιωάννη του Ερημίτη».  
(Πλυμάκης Α., 2002)



Εικόνα β<sub>3</sub> : Χαρτογράφηση Σπηλαίου Καραβότοπος. (Πλυμάκης Α., 2002)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

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

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

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

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

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

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

Σύμφωνα με τους Ελληνικούς κανονισμούς Ακτινοπροστασίας (ΦΕΚ 216Β. 5/3/2001), «ου είναι πλήρως εναρμονισμένοι με την Οδηγία 96/29/EURATOM 31/5/1996, τα όρια για τη συγκέντρωση ραδονίου (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας) στους εργασιακούς χώρους είναι:

- Εργασιακοί χώροι, στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 20 ωρών) είναι μικρότερη από  $400 \text{ Bq/m}^3$ . εξαιρούνται περαιτέρω ελέγχου και μέτρων ακτινοπροστασίας.
- Σε εργασιακούς χώρους, στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών) είναι μεγαλύτερη από  $400 \text{ Bq/m}^3$  και μικρότερη από  $1000 \text{ Bq/m}^3$ , θα πρέπει να διερευνηθεί η δυνατότητα μείωσης των ανωτέρω συγκεντρώσεων με κατάλληλες τεχνικές. Οι χώροι αυτοί χαρακτηρίζονται ως επιβλεπόμενες περιοχές, τα δε λαμβανόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας εγκρίνονται από την ΕΕΑΕ.
- Εργασιακοί χώροι, στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών) είναι μεγαλύτερη από  $1000 \text{ Bq/m}^3$  και μικρότερη από  $3000 \text{ Bq/m}^3$ , χαρακτηρίζονται ως ελεγχόμενες περιοχές και οι πρακτικές αδειοδοτούνται από τη ΕΕΑΕ, τα δε λαμβανόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας εγκρίνονται από την ΕΕΑΕ.
- Η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση του ραδονίου, σε εργασιακούς χώρους, δεν μπορεί να υπερβαίνει τα  $3000 \text{ Bq/m}^3$  λαμβανομένων υπόψη των 2000 ωρών διάρκειας εργασίας.

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

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

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

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