



**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)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Συγκριτική αξιολόγηση συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια με χρήση  
ανιχνευτών SSNT**

**Ιωαννίδης Πασχάλης**

Εξεταστική Επιτροπή:

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

Χανιά  
Ιούνιος 2021

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ραδόνιο (Rn) είναι ένα φυσικό άχρωμο, άοσμο, ευγενές ραδιενεργό αέριο και αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή ιονίζουσας ακτινοβολίας. Προέρχεται από συγκεντρώσεις ουρανίου και θυγατρικών του σε πετρώματα, έδαφος και ύδατα και τείνει να συγκεντρώνεται σε κλειστούς χώρους όπως υπόγεια ορυχεία, σπήλαια αλλά και κατοικίες. Η συγκέντρωση ραδονίου στους παραπάνω χώρους, συμβάλλει σημαντικά στη αύξηση της δόσης της ιονίζουσας ακτινοβολίας που λαμβάνει ο άνθρωπος. Για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, οι οποίες ταξινομούνται ανάλογα με το αν καταγράφουν το ραδόνιο ή τα θυγατρικά του, τον απαιτούμενο χρόνο μέτρησης και την ύπαρξη ή όχι συνεχούς πηγής ενέργειας του οργάνου μέτρησης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο, να συγκρίνει τους τρόπους καταμέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια, που πραγματοποιούνται μέσω διαφορετικών τύπων παθητικών ανιχνευτών καταγραφής ιχνών (Solid-State Nuclear Track Detector's, SSNTD's) οι οποίοι χρησιμοποιούνται διεθνώς. Για την αποτελεσματική σύγκριση και αξιολόγηση της συγκέντρωσης ραδονίου, με την παθητική αυτή μέθοδο έγινε χρήση δεδομένων από την διεθνή βιβλιογραφία. Συνολικά μελετήθηκαν και ταξινομήθηκαν οι μέθοδοι μέτρησης της συγκέντρωσης του ραδονίου σε εξήντα μία (61) δημοσιευμένες εργασίες που έχουν τύχει των περισσότερων αναφορών στην διεθνή βιβλιογραφία, που αναφέρονται σε μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου με SSNTD's σε 381 διαφορετικά σπήλαια, καταναμεμένα ανά τον κόσμο. Όπως προκύπτει από τα στοιχεία των εργασιών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται οι ανιχνευτές CR-39 να είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι παθητικοί ανιχνευτές παγκοσμίως αγγίζοντας το 54,55%. Με διαφορά ακολουθούν οι ανιχνευτές τύπου LR-115 με 33,33% με βάση τα στοιχεία από τα δεδομένα των εργασιών που χρησιμοποιήθηκαν και τέλος οι υπόλοιποι ανιχνευτές SSNT στο σύνολο τους προσεγγίζουν το 12,12%. Εκτός της ανωτέρω κατάταξης καταγράφηκαν ιδιομορφίες, ακραίες και μέσες τιμές της συγκέντρωσης ραδονίου στα σπήλαια που έχουν μελετηθεί στις εργασίες που χρησιμοποιήθηκαν. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην καταγραφή, επεξεργασία και των λόγων για τους οποίους πραγματοποιήθηκαν οι μελέτες αυτές τα αποτελέσματα των οποίων δημοσιεύτηκαν σε διεθνή ειδικευμένα περιοδικά. Όπως προέκυψε η πλειοψηφία των εργασιών αφορούσε στην επίδραση των διαφορετικών

χωροχρονικών συγκεντρώσεων ραδονίου στα σπήλαια στην ανθρώπινη υγεία και κυρίως των ατόμων που εργάζονταν εντός των σπηλαίων (ξεναγοί, κ.λπ.). Περαιτέρω λόγοι για τους οποίους έχουν γίνει έρευνες είναι ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων ραδονίου εντός των σπηλαίων, η σύγκριση των μεθόδων μεταξύ διάφορων τύπων ανιχνευτών ραδονίου καθώς και η συσχέτιση των τιμών συγκέντρωσης ραδονίου στα σπήλαια είτε με την ύπαρξη φυσικών γεωλογικών δομών όπως τα ρήγματα ή/και γεωλογικών φαινομένων όπως οι σεισμοί.

**Λέξεις κλειδιά:** Ραδόνιο, ενεργή δόση, ανθρώπινη υγεία, σπήλαια, καρστ, παθητική ανιχνευτές καταγραφής ιχνών, SSNTD's, CR-39, LR-115

ABSTRACT

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα **«Συγκριτική αξιολόγηση συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια με χρήση ανιχνευτών SSNT»** θα αναλυθούν με λεπτομέρεια οι παθητικοί μέθοδοι μέτρησης της **συγκέντρωσης ραδονίου** σε διάφορα σπήλαια παγκοσμίως. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κεφάλαια στα οποία θα στηριχθεί η ανάλυση και τα συμπεράσματα της εργασίας. Στο **πρώτο κεφάλαιο** δίνονται, οι σχετικές έννοιες - ορισμοί και οι μονάδες μέτρησης και τα χαρακτηριστικά του **ραδονίου**, που θα διευκολύνουν στην κατανόηση του παρόντος θέματος, οι επιπτώσεις στην **ανθρώπινη υγεία**. Επίσης αναλύεται το εθνικό θεσμικό πλαίσιο για το ραδόνιο όπως προκύπτει από τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις. Στο **δεύτερο κεφάλαιο** παρουσιάζονται μερικά από τα χαρακτηριστικά των **σπηλαίων**, καθώς και η αξιοποίησή τους ως τουριστικά αξιοθέατα. Στο **τρίτο κεφάλαιο** δίνεται έμφαση στην ανάλυση των ανιχνευτών συγκέντρωσης του ραδονίου και ειδικότερα στους **παθητικούς ανιχνευτές καταγραφής ιχνών (SSNTD's)**. Το **τέταρτο κεφάλαιο** αφορά στην παρουσίαση των περιγραφικών στοιχείων, χαρακτηριστικών των επιλεγμένων μελετώμενων σπηλαίων και των μετρήσεων συγκέντρωσης ραδονίου εντός αυτών. Από τα παραπάνω προκύπτουν τα εκάστοτε αποτελέσματα που παρατίθενται μέσω πινάκων και διαγραμμάτων. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο προκύπτουν συμπεράσματα και παρατηρήσεις, τόσο από τα γενικότερα στοιχεία της ανάλυσης, όσο και από μελέτη των υπό μελέτη σπηλαίων.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό, μετά το πέρας της διπλωματική μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου για την εμπιστοσύνη, την υποστήριξη και την ευγένεια που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές Νικόλαο Καλλίθρακα – Κόντο και Αντώνιο Βαφείδη για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ τους φίλους μου Άγγελο Πλαγερά, Παναγιώτη Ταραντίλη και Ισίδωρο Βαρδαρό για τη στήριξη και τις συμβουλές τους.

Τέλος, ευχαριστώ τον Λευτέρη, την Χριστίνα, τον Αλέκο, την Λίλια και τους γονείς μου.

Για όλα.

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Γενικά στοιχεία ραδονίου – Θεσμικό πλαίσιο.....	8
1.1 Έννοιες – Ορισμοί, Μονάδες μέτρησης, Χαρακτηριστικά ραδονίου.....	8
1.2 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία .....	10
1.3 Εθνικό θεσμικό πλαίσιο .....	13
Κεφάλαιο 2: Χαρακτηριστικά σπηλαίων και Τουριστική αξιοποίηση.....	21
2.1. Περιγραφή των σπηλαίων.....	21
2.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά.....	21
2.1.2. Ταξινόμηση και σχηματισμός.....	22
2.1.3. Εσωτερικό περιβάλλον .....	23
2.2. Τουριστική αξιοποίηση σπηλαίων .....	24
2.2.1. Ιστορική αναδρομή και χρήση των σπηλαίων .....	24
2.2.2. Επιστημονική σημασία .....	28
2.2.3. Τρόποι σχεδιασμού, εφαρμογής και διαχείρισης.....	30
Κεφάλαιο 3: Ανιχνευτές συγκέντρωσης ραδονίου .....	34
3.1. Εισαγωγικά στοιχεία ανιχνευτών.....	34
3.2. Παθητικοί ανιχνευτές.....	35
3.3. Ανιχνευτές CR – 39 και LR – 115 .....	38
Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια .....	42
4.1 Μεθοδολογική προσέγγιση.....	42
4.2 Στόχοι των μελετών μέτρησης συγκεντρώσεως ραδονίου. ....	43
4.2.1. Η επικινδυνότητα του ραδονίου ως προς την ανθρώπινη υγεία .....	43
4.2.2. Επίδραση παραμέτρων στην συγκέντρωση ραδονίου εντός των σπηλαίων .....	46
4.2.3. Σύγκριση και ανάπτυξη μεθόδων .....	47
4.2.4. Διάφορες συσχετίσεις .....	48
4.3 Αποτελέσματα.....	49
Κεφάλαιο 5: Συζήτηση και συμπεράσματα.....	53
Βιβλιογραφία .....	55

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 3. 1: Ανιχνευτές ραδονίου.....	34
Διάγραμμα 4. 1: Ανιχνευτές ραδονίου σε 61 διαφορετικές μελέτες διεθνώς.....	49
Διάγραμμα 4. 2: Σκοπός των 61 διαφορετικών μελετών διεθνώς .....	50
Διάγραμμα 4. 3: Διάγραμμα κατανομής ελαχίστων τιμών της συγκέντρωσης ραδονίου στα σπήλαια. ....	51
Διάγραμμα 4. 4: Διάγραμμα κατανομής μέγιστων τιμών της συγκέντρωσης ραδονίου	

στα σπηλαία. ....	52
-------------------	----

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2. 1: Οι τρεις ζώνες (είσοδος, λυκόφως, σκοτάδι) ενός σπηλαίου (Lee,2012). .....	24
Εικόνα 2. 2: Η μπρούτζινη πλακέτα της πύλης του βασιλικού παλατιού στο Balawat, που εκτίθεται τώρα στο Βρετανικό Μουσείο στο οποίο παρουσιάζεται η επίσκεψη σε ένα σπήλαιο (Cigna, 2013). ....	25
Εικόνα 2. 3: Το σπήλαιο “Dog Cave” σε χάλκινη εγχάραξη του 17 <sup>ου</sup> Αιώνα (Cigna, 2013). ....	26
Εικόνα 2. 4: Η κύρια αίθουσα του σπηλαίου της Αντιπάρου σε εγχάραξη του 18ου αιώνα (Cigna, 2013).....	27
Εικόνα 2. 5: Ο άνδρας του Altamura είναι ο καλύτερος συντηρημένος παλαιός σκελετός στην Ευρώπη, ο οποίος χρονολογείται πριν από 100.000 χρόνια (Cigna, 2013). ....	29
Εικόνα 2. 6: Η κάθετη παραμόρφωση στον άξονα του σταλαγμίτη μπορεί να καταγράψει ισχυρούς σεισμούς του παρελθόντος (Cigna, 2013). ....	30
Εικόνα 3. 1: Ανιχνευτές CR-39 (Parravicini, 2012). ....	37
Εικόνα 3. 2: α)Ανιχνευτή ραδονίου Kodalpha, b) ταινία LR-115 και c) Ίχνη α-σωματιδίων πάνω στον LR-115 (Parajuli, 2015). ....	39
Εικόνα 3. 3 Πειραματική διαδικασία CR-39 (Kodaira, 2017). ....	40
Εικόνα 3. 4: Φίλτρα LR-115 και CR-39 (Parravicini, 2012). ....	41
Εικόνα 4. 1: Δεδομένα που καταγράφηκαν στο αρχείο του Excel 1. ....	43
Εικόνα 4. 2: Δεδομένα που καταγράφηκαν στο αρχείο του Excel 2. ....	43

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. 1: Φυσικές ιδιότητες ραδονίου. (UNSCEAR, 1982).....	8
Πίνακας 2. 1: Διαφορετικές παγκόσμιες χρήσεις των σπηλαίων .....	28
Πίνακας 4. 1: Τα δείγματα του πληθυσμού Dolichopoda (Allegrucci G., 2015). ....	45
Πίνακας 4. 2: Μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου σπηλαίων της Ουγγαρίας (Lenart, 1989). ....	46
Πίνακας 4. 3: Δεδομένα που ελήφθησαν για τη δραστηριότητα του ραδονίου σε διαφορετικές θέσεις εντός του σπηλαίου (Oufni, 2001). ....	47
Πίνακας 4. 4: Μετρήσεις ραδονίου στο σπήλαιο Katalekhon κατά την διάρκεια του σεισμού καθώς και ένα και δέκα χρόνια αργότερα. (Taheri, 2020). ....	49
Πίνακας 4. 5: Ανιχνευτές ραδονίου σε 61 διαφορετικές μελέτες διεθνώς. ....	49
Πίνακας 4. 6: Σκοπός των 61 διαφορετικών μελετών διεθνώς.....	50
Πίνακας 4. 7: Πίνακας ελαχίστων τιμών των σπηλαίων. ....	51
Πίνακας 4. 8: Πίνακας μέγιστων τιμών των σπηλαίων. ....	51

## Κεφάλαιο 1: Γενικά στοιχεία ραδονίου – Θεσμικό πλαίσιο

### 1.1 Έννοιες – Ορισμοί, Μονάδες μέτρησης, Χαρακτηριστικά ραδονίου

Το **ραδόνιο** είναι ένα φυσικό άχρωμο, άοσμο, ευγενές ραδιενεργό αέριο και αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή ιονίζουσας ακτινοβολίας, μεταξύ εκείνων που έχουν φυσική προέλευση. Απαντάται σε 27 ισοτοπικές μορφές, από το  $^{200}\text{Rn}$  μέχρι το  $^{226}\text{Rn}$ . Οι χρόνοι ημιζωής των ισοτόπων του ραδονίου είναι μικρότεροι από μία ώρα με εξαίρεση το χρόνο ημιζωής του  $^{210}\text{Rn}$  (2,5 ώρες), του  $^{211}\text{Rn}$  (14,7 ώρες) και του  $^{222}\text{Rn}$  (3,8 ημέρες) (Cothorn, 1987). Τα **ισότοπα του ραδονίου**  $^{219}\text{Rn}$  (ακτινόνιο-σειρά ακτινίου),  $^{220}\text{Rn}$  (θορόνιο-σειρά θορίου) και  $^{222}\text{Rn}$  (ραδόνιο-σειρά ουρανίου) ανήκουν σε φυσικές ραδιενεργές σειρές και είναι προϊόντα διάσπασης του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ). Στη φύση βρίσκεται κυρίως η ισοτοπική μορφή του  $^{222}\text{Rn}$ . Ειδικότερα, το ραδόνιο ( $^{222}\text{Rn}$ ) είναι ένα ευγενές αέριο που σχηματίζεται από το ράδιο ( $^{226}\text{Ra}$ ). Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται λεπτομερέστερα οι φυσικές ιδιότητες του ραδονίου.

Πίνακας 1. 1: Φυσικές ιδιότητες ραδονίου. (UNSCEAR, 1982)

Πυκνότητα σε κανονικές συνθήκες	9.96 Kg/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
<b>Διαλυτότητα σε υγρά υπό πίεση 1 atm και θερμοκρασία 18°C</b>	
Νερό	230 cm <sup>3</sup> /Kg
Αιθυλική αλκοόλη	7,4 cm <sup>3</sup> /Kg
Υγρή παραφίνη	9,2 cm <sup>3</sup> /Kg
Λάδι ελιάς	29 cm <sup>3</sup> /Kg

Ο **όρος πηγή** ραδονίου αναφέρεται σε κάθε εστία παραγωγής, ή σε κάθε αφετηρία διαφυγής ραδονίου. Διαχωρισμός μπορεί να γίνει ανάμεσα στις πηγές που περιέχουν  $^{226}\text{Ra}$  (μητρικό ισότοπο του ραδονίου) και οι οποίες παράγουν διαρκώς ραδόνιο όσο περιέχουν  $^{226}\text{Ra}$ , και σε αυτές που απλά είναι εμπλουτισμένες σε ραδόνιο, ως αποτέλεσμα χημικής διάλυσης του τελευταίου (Νικολόπουλος, 2015). Στην πρώτη κατηγορία πηγών (που περιέχουν  $^{226}\text{Ra}$ ), ανήκουν το έδαφος της γης και τα υλικά που προέρχονται από αυτό. Στην δεύτερη κατηγορία πηγών, ανήκουν ο ατμοσφαιρικός αέρας και το φυσικό αέριο. Ως ενδιάμεση κατηγορία μπορούν να θεωρηθούν τα ύδατα,



τόσο επιφανειακά, όσο και υπόγεια, τα οποία, αφενός μεν παράγουν ραδόνιο, λόγω του  $^{226}\text{Ra}$  που περιέχουν, αφετέρου δεν εμπλουτίζονται με ραδόνιο που διαλύεται σε αυτά από άλλες πηγές, κυρίως των πετρωμάτων και του εδάφους. Τα παραπάνω ισχύουν, επίσης, και για το ισότοπο  $^{224}\text{Ra}$ , το οποίο αποτελεί το μητρικό ισότοπο του ισότοπου  $^{220}\text{Rn}$  (θορόνιο).

Η **ενεργότητα** ή ραδιενέργεια (activity) των πυρήνων του ραδονίου, ορίζεται ως η συχνότητα των πυρηνικών διασπάσεων ανά μονάδα χρόνου. Η μονάδα μέτρησης της ενεργότητας ορίζεται ως η μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο, που ονομάζεται Becquerel (Bq), προς τιμήν του Henri Becquerel ( $1 \text{ Bq} = 1 \text{ διάσπαση/s}$ ).

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

Τα **φυσικά δοσιμετρικά**: α) Απορροφούμενη δόση, β) Ισοδύναμη δόση και γ) Ενεργός δόση, μεγέθη των οποίων οι ορισμοί ακολουθούν, αποσκοπούν στο να διασυνδέσουν το είδος και την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με την πιθανότητα δημιουργίας βλάβης στον προσβαλλόμενο ιστό και γενικότερα, την πιθανότητα βλάβης της υγείας του προσβαλλόμενου ατόμου (*UNSCEAR, 1993, 2000, 2010*).

- **Απορροφούμενη δόση** είναι το δοσιμετρικό μέγεθος που εκφράζει την ενέργεια που εναποτίθεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανά μονάδα μάζας της προσβαλλόμενης ύλης. Μονάδα απορροφούμενης δόσεως είναι το Gray (Gy) που αντιστοιχεί σε απορροφούμενη ενέργεια  $1 \text{ Joule/kg}$  προσβαλλόμενης ύλης. Για την περιοχή των δόσεων που αφορούν στην ακτινοβόληση του ανθρώπου από φυσικές και τις συνήθεις τεχνητές πηγές (ιατρικές διαγνωστικές εφαρμογές, καταναλωτικά αγαθά κ.λπ.), χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσια του Gy [milligray (mGy) και το microgray (μGy)].
- **Ισοδύναμη δόση** είναι το δοσιμετρικό μέγεθος που σχετίζεται με τη βλάβη που μπορεί να προκαλέσει σε έναν ιστό η απορροφούμενη δόση ενός συγκεκριμένου είδους ακτινοβολίας. Μονάδα ισοδύναμης δόσης είναι το Sievert (Sv). Για την περιοχή των δόσεων που αφορούν στην ακτινοβόληση του ανθρώπου από φυσικές και συνήθεις τεχνητές πηγές, χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσια του Sv, όπως το millisievert (**mSv**) και το microsievert (μSv).

Το Sv είναι σχετικά μεγάλη μονάδα δόσης και χρησιμοποιείται στην αποτίμηση των αποτελεσμάτων των δόσεων της ακτινοθεραπείας και αυτών που προκαλούνται σε σοβαρά πυρηνικά ατυχήματα.

- Αν η παραπάνω ισοδύναμη δόση σε ένα όργανο πολλαπλασιαστεί με έναν παράγοντα που χαρακτηρίζει την ευαισθησία του οργάνου, προκύπτει ένα νέο μέγεθος που συμβάλλει στην αποτίμηση του συνολικού κινδύνου, που διατρέχει η υγεία από την ακτινοβόληση του συγκεκριμένου οργάνου. Το μέγεθος αυτό καλείται **ενεργός δόση** και αντιστοιχεί αριθμητικά στην ολόσωμη ισοδύναμη δόση που θα έπρεπε να δεχθεί το άτομο που προσβλήθηκε, ώστε να διατρέξει τον ίδιο κίνδυνο βλάβης της υγείας του με αυτόν που διατρέχει από την τοπική ακτινοβόληση του συγκεκριμένου οργάνου. Η αναφορά στην ενεργό δόση μας επιτρέπει να αντιλαμβανόμαστε και να αποτιμούμε, κατά ενιαίο τρόπο, το συνολικό κίνδυνο που διατρέχει η υγεία του ανθρώπου από δεδομένη ακτινοβόληση, ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα ακτινοπροστασίας. Η ενεργός δόση είναι το δοσιμετρικό μέγεθος που σχετίζεται με τον ενεχόμενο συνολικό κίνδυνο για την υγεία, ανεξάρτητα από το είδος της προσβάλλουσας ακτινοβολίας, τις συνθήκες ακτινοβόλησης και την ακτινοβολούμενη περιοχή του ανθρωπίνου σώματος (Νικολόπουλος, 2015).

## 1.2 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Οι κίνδυνοι που προκαλούνται από ιονίζουσες ακτινοβολίες στην ανθρώπινη υγεία είναι γνωστοί. Το αέριο ραδόνιο, έχει χρόνο ημιζωής 3,8 ημέρες, προέρχεται από πετρώματα και τείνει να συγκεντρώνεται σε κλειστούς χώρους όπως, υπόγεια ορυχεία, σπήλαια ή σπίτια. Η συγκέντρωση ραδονίου στους παραπάνω χώρους, συμβάλλει σημαντικά στη δόση ιονίζουσας ακτινοβολίας που λαμβάνει ο γενικός πληθυσμός.

Όταν το ραδόνιο εισπνέεται, τα πυκνά ιοντικά σωματίδια-α που εκπέμπονται από τις αποθέσεις των βραχύβιων προϊόντων διάσπασης ραδονίου ( $^{214}\text{Po}$  και  $^{218}\text{Po}$ ), αλληλοεπιδρούν με τον βιολογικό ιστό που υπάρχει στους πνεύμονες και αυτό οδηγεί σε βλάβες του ανθρωπίνου DNA. Ο πολλαπλασιασμός των ενδιάμεσων κυττάρων που έχουν υποστεί κάποια βλάβη του DNA, μπορεί να αυξήσουν σημαντικά τη δεξαμενή των διαθέσιμων κυττάρων για την ανάπτυξη του καρκίνου. Δεδομένου ότι ακόμη και ένα μεμονωμένο σωματίδιο-α μπορεί να προκαλέσει σοβαρή γενετική βλάβη σε ένα

κύτταρο, είναι πιθανό να μπορεί να προκληθεί βλάβη στο DNA σε οποιοδήποτε επίπεδο έκθεσης. Ουσιαστικά, δεν υπάρχει αναγνωρισμένο όριο συγκέντρωσης κάτω από το οποίο η έκθεση του ραδονίου δεν παρουσιάζει κίνδυνο. Ακόμη και οι χαμηλές συγκεντρώσεις ραδονίου μπορούν να οδηγήσουν σε μικρή αύξηση κινδύνου για εμφάνιση καρκίνου, με πιο συνήθης μορφή αυτή του καρκίνου των πνευμόνων.

Η κατανόηση των πηγών ραδονίου και των μηχανισμών μεταφοράς ραδονίου, έχει προαχθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Τη δεκαετία του '50, παρατηρήθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου σε οικιακούς χώρους και στο πόσιμο νερό από γεωτρήσεις. Η παρουσία ραδονίου στο νερό, δημιούργησε αρχικά σημαντική ανησυχία σχετικά με τις επιπτώσεις στην υγεία με την κατάποση. Αργότερα, διαπιστώθηκε ότι ο κύριος κίνδυνος για την υγεία, προέρχεται κυρίως από την εισπνοή ραδονίου που απελευθερώνεται από το νερό εντός των σπιτιών. Στα μέσα της δεκαετίας του 70' επίσης, διαπιστώθηκε ότι η παρουσία ραδονίου σε οικοδομικά υλικά αποτελούσε πρόβλημα, λόγω χρήσης στυπτηρίας (Alum shale<sup>1</sup>) με ενισχυμένα επίπεδα ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά, μέχρι το 1978, είχαν εντοπιστεί οικίες όπου οι συγκεντρώσεις ραδονίου δεν προέκυπταν από τη μεταφορά νερού ή τη χρήση κατασκευαστικών υλικών. Η διάχυση αερίων προερχομένων από το έδαφος, αναγνωρίστηκε ως η σημαντικότερη πηγή ραδονίου εσωτερικών χώρων. Εκτός από τις παραπάνω, άλλες πηγές έχουν μικρότερη σημασία.

Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία από το ραδόνιο, έχουν διερευνηθεί εδώ και αρκετές δεκαετίες. Αρχικά, οι έρευνες επικεντρώθηκαν στους υπόγειους ανθρακωρύχους που είχαν εκτεθεί σε υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου στο επαγγελματικό τους περιβάλλον. Στη συνέχεια, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO, World Health Organization) το 1979 έστρεψε αρχικά την προσοχή του, στις επιπτώσεις του ραδονίου στην υγεία σε οικιστικές περιοχές που ήταν εκτεθειμένες σε αυτό, μέσω μιας ευρωπαϊκής ομάδας που μελετούσε την ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών, μαζί με τις μελέτες που έγιναν σε εργάτες ορυχείων, αποδείκνυαν άμεσα ότι το ραδόνιο μπορεί να αποτελέσει σημαντική αιτία καρκίνου των πνευμόνων στον γενικό πληθυσμό.

Το ραδόνιο τελικά, ταξινομήθηκε ως καρκινογόνο το 1988 από την IARC (International Agency for Research on Cancer), την ειδική υπηρεσία έρευνας για τον

---

<sup>1</sup> Μια ποικιλία σχιστόλιθου ή πηλού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενός συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος.

καρκίνο της WHO. Το 1993, διαμορφώθηκε στην πόλη Εϊλάτ τους Ισραήλ ένα διεθνές εργαστήριο της WHO, ειδικό για μελέτες εμφάνισης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Περιλάμβανε επιστήμονες και ειδικούς από την Ευρώπη, τη Βόρεια Αμερική και την Ασία. Αυτό ήταν ένα πρώτο βήμα προς μια ενοποιημένη προσέγγιση για τον έλεγχο της έκθεσης στο ραδόνιο και την παροχή συμβουλών σχετικά με τους κινδύνους για την υγεία.

Το 2005, η WHO διαμόρφωσε ένα διεθνές πρόγραμμα για τον προσδιορισμό μιας αποτελεσματικής στρατηγικής, μείωσης των επιπτώσεων ραδονίου στην υγεία και ευαισθητοποίησης του κοινού και της πολιτικής συνείδησης σχετικά με τις συνέπειες της μακροπρόθεσμης έκθεσης στο ραδόνιο. Οι συμμετέχοντες, που προέρχονταν πάνω από 30 χώρες, συνεργάστηκαν για την κατανόηση παγκοσμίως, ενός ευρέος φάσματος θεμάτων που συνδέονται με το ραδόνιο σε εσωτερικούς χώρους.

Σχετικά με πρόσφατες προσπάθειες για τη σύνδεση του καρκίνου του πνεύμονα με την παρουσία ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, προέκυψαν αποδείξεις για αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου, ακόμη και στα συνηθέστερα επίπεδα ραδονίου σε κτίρια. Ειδικότερα, οι τρέχουσες εκτιμήσεις του ποσοστού των καρκίνων του πνεύμονα, που οφείλονται στην παρουσία ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους σε Ευρώπη, Βόρεια Αμερική και Ασία, κυμαίνονται από 3% έως 14%, ανάλογα με τη μέση συγκέντρωση ραδονίου σε κάθε χώρα και τις μεθόδους υπολογισμού του. Ωστόσο, οι προσπάθειες για τη μείωση του αριθμού των καρκίνων των πνευμόνων που σχετίζονται με την εμφάνιση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, έχουν μέχρι στιγμής επιτύχει μόνο σε πολύ λίγες χώρες.

Το ραδόνιο επίσης, αναγνωρίζεται πλέον ως η δεύτερη σημαντικότερη αιτία καρκίνου στον πνεύμονα, μετά το κάπνισμα στον γενικό πληθυσμό. Λόγω της ισχυρής συνδυασμένης επίδρασης του καπνίσματος και του ραδονίου, οι περισσότερες περιπτώσεις καρκίνου του πνεύμονα που προκαλούνται από το ραδόνιο, εμφανίζονται μεταξύ καπνιστών ή ανθρώπων που έχουν καπνίσει στο παρελθόν, παρά στους μη καπνιστές. Ωστόσο, είναι η πρωταρχική αιτία του καρκίνου των πνευμόνων μεταξύ των ανθρώπων που δεν έχουν καπνίσει ποτέ. Τέλος, άλλες επιπτώσεις στην υγεία από το ραδόνιο δεν έχουν αποδειχθεί με συνέπεια (WHO, 2009).

### 1.3 Εθνικό θεσμικό πλαίσιο

Σε εθνικό επίπεδο, το θεσμικό πλαίσιο για την διαχείριση του στοιχείου ραδονίου και η περαιτέρω αντιμετώπιση των κινδύνων από την έκθεσή του σε αυτό, είναι πρόσφατο. Ειδικότερα, τα κανονιστικά και ρυθμιστικά κείμενα που έχουν δημοσιευτεί σε Φύλλα Εφημερίδας της Κυβερνήσεων και αφορούν στα παρακάτω:

- **Νόμος 4310/2014 (ΦΕΚ 258/Α')** «Έρευνα, Τεχνολογική Ανάπτυξη και Καινοτομία και άλλες διατάξεις».
- **Υπουργική Απόφαση (ΥΑ) υπ' αριθμ. Π/112/1057/2016 (ΦΕΚ 241/Β')** *«Θέσπιση απαιτήσεων προστασίας της υγείας του πληθυσμού από ραδιενεργές ουσίες που περιέχονται στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης, σε συμμόρφωση προς την Οδηγία 2013/51/EYPATOM του Συμβουλίου, της 22ας Οκτωβρίου 2013».*
- **Προεδρικό Διάταγμα (ΠΔ) υπ' αριθμ. 101 (ΦΕΚ 194/Α'/2018)**, το οποίο τροποποίησε το Ν.4310/2014, *«Προσαρμογή της ελληνικής νομοθεσίας στην Οδηγία 2013/59/Ευρατόμ του Συμβουλίου, της 5ης Δεκεμβρίου 2013, για τον καθορισμό βασικών προτύπων ασφάλειας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες και την κατάργηση των Οδηγιών 89/618/Ευρατόμ 90/641/Ευρατόμ, 96/29/Ευρατόμ, 97/43/Ευρατόμ και 2003/122/Ευρατόμ (ΕΕ L13/17.1.2014) - Θέσπιση Κανονισμών Ακτινοπροστασίας».*
- **ΥΑ υπ' αριθμ. 45872 (ΦΕΚ 1003/Β'/2019)** *«Διαδικασίες κανονιστικού ελέγχου πρακτικών ιονίζουσων ακτινοβολιών - αναγνώριση υπηρεσιών και εμπειρογνομόνων».*
- **ΥΑ υπ' αριθμ. 134069 (ΦΕΚ 5000/Β'/2019)** *«Τροποποίηση της Π/112/1057/2016 (Β' 241) απόφασης «Θέσπιση απαιτήσεων προστασίας της υγείας του πληθυσμού από ραδιενεργές ουσίες που περιέχονται στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης, σε συμμόρφωση με την Οδηγία 2013/51/ EYPATOM του Συμβουλίου, της 22ας Οκτωβρίου 2013».*
- **ΥΑ υπ' αριθμ. 43374 (ΦΕΚ 1881/Β'/2020)** *«Εθνικό σχέδιο δράσης για την αντιμετώπιση των μακροπρόθεσμων κινδύνων από την έκθεση στο ραδόνιο».*

Στη συνέχεια θα γίνει αναλυτικότερη παρουσίαση της νομοθετικής προσέγγισης του μελετώμενου ραδονίου, αναλύοντας τα νέα θεσμοθετημένα μέτρα και δράσεις σωστής διαχείρισης του, κυρίως για τις διατάξεις του ΠΔ του 2018 και των ΥΑ 2019 και 2020.

#### **N.4310/2014 - ΦΕΚ 258/Α'/2014**

Βάσει του Νόμου 4310/2014 και του κεφαλαίου Ε:

- Συμπληρώνεται το εθνικό νομικό και ρυθμιστικό πλαίσιο για τη διασφάλιση της ραδιολογικής και πυρηνικής ασφάλειας και της προστασίας του πληθυσμού, του περιβάλλοντος και των αγαθών της χώρας από τους κινδύνους που προκύπτουν από ιοντίζουσες και από μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες.
- Διασφαλίζεται αειφορικά η διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων.
- Θεσπίζονται κατάλληλες εθνικές ρυθμίσεις για την επίτευξη υψηλού επιπέδου ασφαλείας της διαχείρισης αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων για την προστασία των εργαζομένων και του πληθυσμού από κινδύνους που προκύπτουν από ιοντίζουσες ακτινοβολίες και εν γένει τη φυσική προστασία του πυρηνικού υλικού και των πυρηνικών εγκαταστάσεων.
- Παρέχεται η απαραίτητη ενημέρωση και η διασφάλιση της συμμετοχής του κοινού όσον αφορά τη διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων, αλλά και η εκπαίδευση και επιμόρφωση σε θέματα ραδιενέργειας, μεταφορών και ασφάλειας καταλοίπων.
- Ορίζεται η ΕΕΑΕ και το κατά περίπτωση αρμόδιο Υπουργείο, ως υπεύθυνοι για την εφαρμογή του νομοθετικού και ρυθμιστικού πλαισίου.
- Εναρμονίζεται η ελληνική νομοθεσία με τις Οδηγίες 2011/70/EYPATOM, του Συμβουλίου της 19ης Ιουλίου 2011 (ΕΕ L 199), (ΕΕ L 296) και 2013/59/EYPATOM του Συμβουλίου της 5ης Δεκεμβρίου 2013 και εξειδικεύονται οι διατάξεις του Ν.1636/1986 (Α' 106) και του Ν.4085/2012 (Α' 194) για την εκπαίδευση και επιμόρφωση σε θέματα ραδιενέργειας, μεταφορών και ασφάλειας καταλοίπων.

## **ΠΔ υπ. αριθμ. 101 - ΦΕΚ 194/Α'/2018**

Σκοπός του Π.Δ. 101/2018 είναι η μεταφορά στην ελληνική νομοθεσία της Οδηγίας 2013/59/Ευρατόμ του Συμβουλίου, της 5ης Δεκεμβρίου 2013. Θεσπίζονται λοιπόν, πρότυπα ασφαλείας των Κανονισμών Ακτινοπροστασίας (ΚΑ) για την προστασία της υγείας των ατόμων, που υποβάλλονται σε επαγγελματική έκθεση, σε ιατρική έκθεση και στην έκθεση του κοινού, απέναντι στους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιονίζουσες ακτινοβολίες (ΕΕ L 13/17.1.2014).

Ειδικότερα, για την περίπτωση έκθεσης σε συγκέντρωση ραδονίου, οι ΚΑ εφαρμόζονται στους **εκτεθειμένους εργαζομένους ή μέλη του κοινού** εντός των κτιρίων, στην εξωτερική έκθεση από οικοδομικά υλικά και στις περιπτώσεις μακροχρόνιας έκθεσης που προκύπτουν από τα επακόλουθα μιας έκτακτης ανάγκης ή μιας ανθρώπινης δραστηριότητας του παρελθόντος. Τα επίπεδα αναφοράς εκφράζονται σε **συγκέντρωση ενεργότητας ραδονίου** στην ατμόσφαιρα και ειδικότερα, γίνεται διάκριση σε εργαζομένους (άρθρο 54) και μέλη κοινού (άρθρο 74), όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

### **Χώροι εργασίας**

Σύμφωνα με το άρθρο 54 του παρόντος Π.Δ., το εθνικό επίπεδο αναφοράς για τη συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους εργασίας καθορίζεται σε  $300 \text{ Bq/m}^{-3}$  (ως ετήσιος μέσος όρος της συγκέντρωσης ενεργότητας στην ατμόσφαιρα). Μέσω **Εθνικών Σχεδίων Δράσης** (Ε.ΣΧΕ.ΔΡΑ.) (παρ.1, άρθ.103), η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ)<sup>2</sup> μεριμνά για τη μέτρηση ραδονίου:

1. Σε χώρους εργασίας οι οποίοι βρίσκονται στο ισόγειο ή στο υπόγειο, σε περιοχές όπου η συγκέντρωση ραδονίου (ετήσιος μέσος όρος) σε σημαντικό αριθμό κτιρίων αναμένεται να υπερβεί το εθνικό επίπεδο αναφοράς των  $300 \text{ Bq/m}^{-3}$ .
2. Σε ειδικούς τύπους χώρων εργασίας, όπως τα σχολεία, οι υπόγειοι χώροι εργασίας και οι χώροι σε περιοχές όπου απαιτείται διενέργεια μετρήσεων, με βάση την αξιολόγηση του κινδύνου, λαμβανομένων υπόψη των ωρών παραμονής, κ.λπ.

---

<sup>2</sup> Έχει συσταθεί με το άρθρο 28 του ν. 1733/1987 (Α' 171), υπάγεται στον Υπουργό Παιδείας και Θρησκευμάτων και εποπτεύεται από αυτόν. Οι σκοποί της ΕΑΕΕ περιγράφονται στο άρθρο 43 του Ν4310 (ΦΕΚ 258/Α').

Στο πλαίσιο επαγγελματικής έκθεσης στο ραδόνιο και όταν η έκθεση αυτή ενδέχεται να υπερβεί μια ενεργό δόση 6 mSv ετησίως, αντιμετωπίζεται ως κατάσταση σχεδιασμένης έκθεσης. Έτσι, η ΕΕΑΕ είναι υπεύθυνη να δώσει κατευθυντήριες οδηγίες σχετικά με τις καταλληλότερες απαιτήσεις που πρέπει να ακολουθηθούν. Αντίθετα, όταν η έκθεση στο ραδόνιο ενδέχεται να είναι μικρότερη ή ίση των 6 mSv ετησίως (ενεργού δόσης), ο οργανισμός είναι υπεύθυνος για την ύπαρξη και τήρηση διαδικασιών για την παρακολούθηση των εκθέσεων των εργαζομένων σε συνεχή βάση. Στην περίπτωση εργαζομένων σε έκτακτη ανάγκη, εφαρμόζεται το άρθρο 53 του παρόντος ΠΔ.

#### Εσωτερικοί χώροι κτιρίων - κατοικίας

Σύμφωνα με το άρθρο 74 του παρόντος Π.Δ., και μέσα σε κτίρια κατοικιών, το εθνικό επίπεδο αναφοράς για τη συγκέντρωση ραδονίου καθορίζεται σε  $300 \text{ Bq/m}^{-3}$ . Η τιμή αυτή αναφέρεται στον ετήσιο μέσο όρο.

Όπως και στην περίπτωση των χώρων εργασίας, μέσω **Εθνικών Σχεδίων Δράσης** (άρθ.103), η ΕΕΑΕ προωθεί δράσεις για τον εντοπισμό κατοικιών με συγκεντρώσεις ραδονίου που υπερβαίνουν (κατά μέσο όρο ετησίως) το επίπεδο αναφοράς και κατά περίπτωση, ενθαρρύνει, με τεχνικά ή άλλα μέσα, τη λήψη μέτρων μείωσης της συγκέντρωσης ραδονίου μέσα σε αυτές. Επίσης, υποχρέωση της ΕΕΑΕ είναι να παρέχει πληροφορίες σε τοπικό και εθνικό επίπεδο για την έκθεση στο ραδόνιο στο εσωτερικό των κτιρίων και τους συνεπαγόμενους κινδύνους για την υγεία.

#### Σχέδιο δράσης για το ραδόνιο

Με το άρθρο 103 του παρόντος Π.Δ., περιγράφεται η θέσπιση Ε.ΣΧΕ.ΔΡΑ. για την αντιμετώπιση μακροπρόθεσμων κινδύνων από την έκθεση στο ραδόνιο μέσα σε κατοικίες, κτίρια στα οποία έχει πρόσβαση το κοινό και χώρους εργασίας, με πηγή εισόδου του ραδονίου, είτε από το έδαφος και τα οικοδομικά υλικά, είτε από το νερό.

Το Σχέδιο αυτό, εκδίδεται μέσω Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ), σύμφωνα και με την περίπτωση θ, παρ. 3, άρθρου 42 του Ν.4310/2014 και ακολουθεί τον κατάλογο στοιχείων του παραρτήματος XVIII του παρόντος Π.Δ. Οι επικαιροποιήσεις, μετά τη δημοσίευσή τους σε ΦΕΚ, καθίστανται **δεσμευτικές** και κοινοποιούνται σε όλους τους εμπλεκόμενους φορείς, προκειμένου να εναρμονίσουν τα συντασσόμενα από αυτούς σχέδια και δράσεις.



Στο πλαίσιο του παρόντος Σχεδίου, προσδιορίζονται οι διαδικασίες για τη λήψη κατάλληλων μέτρων με στόχο την αποφυγή της εισόδου ραδονίου στα νέα κτίρια. Τα μέτρα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν και ειδικές απαιτήσεις στους οικοδομικούς κανονισμούς της χώρας. Ειδικότερη αναφορά σχετικά με τα Ε.ΣΧΕ.ΔΡΑ., τις δράσεις και τα επιμέρους έργα τους, αλλά και την κατηγοριοποίηση των εσωτερικών χώρων κατοικίας και εργασίας, θα γίνει στη συνέχεια.

#### **ΥΑ υπ' αριθμ. 45872 - ΦΕΚ 1003/Β'/2019**

Με την ΥΑ του 2019 και ειδικότερα στο άρθρο 7, εξειδικεύεται ο τρόπος διαχείρισης της συγκέντρωσης ραδονίου σε χώρους εργασίας. Έτσι, για τη διαδικασία γνωστοποίησης εργασίας σε χώρους εργασίας, όπου οι συγκεντρώσεις ραδονίου συνεχίζουν να υπερβαίνουν το εθνικό επίπεδο αναφοράς ( $300 \text{ Bq/m}^{-3}$ ), ο οργανισμός υποβάλλει τα ακόλουθα:

- Περιγραφή, των χώρων εργασίας στους οποίους οι συγκεντρώσεις ραδονίου υπερβαίνουν το εθνικό επίπεδο αναφοράς, τον αριθμό των εργαζομένων στους εν λόγω χώρους και την εκτιμώμενη επαγγελματική έκθεσή τους,
- Περιγραφή των μέτρων που έχουν ήδη ληφθεί για τη μείωση των συγκεντρώσεων του ραδονίου.
- Αναφορά των συγκεντρώσεων του ραδονίου στους χώρους εργασίας της περίπτωσης α πριν και μετά τη λήψη των μέτρων, καθώς και περιγραφή της μεθοδολογίας προσδιορισμού των συγκεντρώσεων.
- Περιγραφή μέτρων που προτίθεται να λάβει ο οργανισμός για την περαιτέρω βελτιστοποίηση της ακτινοπροστασίας των χώρων της περίπτωσης α (π.χ. ενημέρωση, περιορισμός της παρουσίας των εν λόγω εργαζομένων σε χώρους με αυξημένες συγκεντρώσεις, μελλοντικά μέτρα περαιτέρω περιορισμού των συγκεντρώσεων του ραδονίου κ.λπ.).

Στη συνέχεια, σχετικά με τη διαδικασία γνωστοποίησης καταστάσεων υφιστάμενης έκθεσης που προκαλούν ανησυχία από άποψη ακτινοπροστασίας και για τις οποίες μπορεί να αποδοθεί νομική ευθύνη (παρ. 3, άρθ. 100, ΠΔ 101/2018), ο οργανισμός υποβάλλει τα ακόλουθα:

- Περιγραφή των χώρων του οργανισμού, στους οποίους τα επίπεδα της έκθεσης δεν μπορούν να παραβλεφθούν από άποψη ακτινοπροστασίας.

- Περιγραφή των μέτρων που έχουν ήδη ληφθεί για τη μείωση των ως άνω επιπέδων έκθεσης.
- Περιγραφή μέτρων που προτίθεται να λάβει ο οργανισμός για την περαιτέρω μείωση της έκθεσης,
- Περιγραφή των διαδικασιών διαχείρισης των ραδιενεργών υλικών, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών ραδιενεργών υλικών.

#### **ΥΑ υπ. αριθμ. 43374 - ΦΕΚ 1881/Β'/2020**

Μόλις το 2020, εγκρίθηκε το «Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την αντιμετώπιση των μακροπρόθεσμων κινδύνων από την έκθεση στο ραδόνιο (Ε.ΣΧΕ.ΔΡΑ.)» με το ΦΕΚ 1881/Β'/2020 (18.05.2020), κατά το άρθρο 42 παρ. 3, Ν.4310/2014 (Α' 258) και το άρθρο 103 του Π.Δ. 101/2018 (Α' 194), όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως.

Σύμφωνα με το παραπάνω σχέδιο, καθορίζονται οι αρχές για τις περιοχές προτεραιότητας κατοικίας και εργασίας, η διαδικασία εφαρμογής του ΕΣΧΕΔΡΑ και ο τρόπος υλοποίησης των δράσεων και των επιμέρους έργων τους. Ο χρονικός ορίζοντας των δράσεων του Σχεδίου αφορά σε **περίοδο δέκα (10) ετών**. Επίσης, καθορίζονται οι υπεύθυνοι υλοποίησης του Σχεδίου και διάθεσης πόρων. Οι δράσεις και τα επιμέρους έργα κατηγοριοποιούνται ως εξής:

**ΔΡΑΣΗ 1. Προσδιορισμός των επιπέδων συγκέντρωσης ραδονίου** στον εσωτερικό αέρα κατοικιών και χώρων εργασίας.

- 1.1. Εθνική Επισκόπηση Ραδονίου στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών.
- 1.2. Δημιουργία του εθνικού χάρτη ραδονίου και καθορισμός των «περιοχών προτεραιότητας».
- 1.3. Προσδιορισμός της διαδικασίας για την αναγνώριση εργαστηρίου από την ΕΕΑΕ.

**ΔΡΑΣΗ 2. Στρατηγική επικοινωνίας** ενδιαφερόμενων μερών.

- 2.1. Ενημέρωση των οργανισμών και των εργαζομένων στους χώρους εργασίας όπου είναι υποχρεωτικός ο έλεγχος της συγκέντρωσης ραδονίου.
- 2.2. Επικοινωνία με τον πληθυσμό, εντοπισμός και ενημέρωση ειδικών ομάδων που δύνανται να συνεισφέρουν στη διάχυση της πληροφόρησης στο γενικό πληθυσμό.

**ΔΡΑΣΗ 3. Μείωση των συγκεντρώσεων ραδονίου** στους εσωτερικούς χώρους (αποκατάσταση και πρόληψη).

- 3.1. Μείωση των συγκεντρώσεων ραδονίου σε υφιστάμενες κατοικίες και χώρους εργασίας.
- 3.2. Μείωση των συγκεντρώσεων ραδονίου σε μελλοντικές κατασκευές.
- 3.3. Δημιουργία καταλόγου εγκεκριμένων μηχανικών για τη διεξαγωγή έργων μείωσης της συγκέντρωσης ραδονίου.

Κύριος σκοπός του ΕΣΧΕΔΡΑ είναι:

- Ο εντοπισμός κατοικιών - κτιρίων με δημόσια πρόσβαση και χώρων εργασίας στους οποίους οι συγκεντρώσεις ραδονίου υπερβαίνουν το εθνικό επίπεδο αναφοράς (ετήσιος μέσος όρος  $300 \text{ Bq/m}^{-3}$  για εσωτερικούς χώρους).
- Η ενημέρωση και η πληροφόρηση του πληθυσμού και ειδικών ομάδων εργαζομένων,
- Η εφαρμογή μέτρων με σκοπό τον περιορισμό των συγκεντρώσεων αυτών.

Σε **οικιστικές περιοχές**, όπου η συγκέντρωση ραδονίου υπερβαίνει το θεσμοθετημένο επίπεδο αναφοράς ( $300 \text{ Bq/m}^{-3}$ ), συνίσταται η λήψη μέτρων μείωσής του. Από την ΕΕΑΕ ορίζονται οι «**περιοχές προτεραιότητας**» κατοικίας, όπου  $P > 10\%$  ( $P$  = πιθανότητα σε μία ισόγεια κατοικία να βρεθεί συγκέντρωση ραδονίου που υπερβαίνει το επίπεδο αναφοράς). Οι μετρήσεις συγκεντρώσεων ραδονίου στις κατοικίες καταγράφονται σε βάση δεδομένων, όπου συνδέονται με:

- Πληροφορίες σχετικές με το κτίριο (π.χ. έτος κατασκευής, υλικά κατασκευής).
- Τη γεωγραφική θέση του (διεύθυνση κατοικίας-συντεταγμένες).
- Τις συνθήκες διαβίωσης των ενοίκων (π.χ. συχνότητα αερισμού, κάπνισμα) και λοιπά στοιχεία (π.χ. χρήση γεωτρήσεων).

Στη συνέχεια, οι πληροφορίες αυτές συλλέγονται μέσω ερωτηματολογίων, τα οποία συνοδεύουν τους ανιχνευτές ραδονίου κατά την αποστολή τους.

Και στους **επαγγελματικούς χώρους**, στην περίπτωση που η συγκέντρωση ραδονίου ξεπερνά τα  $300 \text{ Bq/m}^{-3}$ , πρέπει να ληφθούν μέτρα για τη μείωση της. Εφόσον η ετήσια ενεργός δόση είναι μικρότερη ή ίση των  $6 \text{ mSv}$ , χρειάζεται η παρακολούθηση της από τον οργανισμό και η ενημέρωση ανά δύο χρόνια της ΕΕΑΕ. Στην περίπτωση που ξεπερνούνται τα  $6 \text{ mSv}$  παρέχονται από την ΕΕΑΕ κατευθυντήριες οδηγίες (σημείο (α), παρ. 2, άρθρο 35, Π.Δ. 101/2018). Οι «**χώροι προτεραιότητας**» χωρίζονται σε:

- Χώροι εργασίας προτεραιότητας (ορυχεία, τουριστικά σπήλαια, ιαματικά λουτρά, βιομηχανικές υποδομές, κ.λπ.).
- Χώροι εργασίας και χώροι σε κτίρια με δημόσια πρόσβαση σε «περιοχές προτεραιότητας» (ισόγειοι και υπόγειοι χώροι εργασίας σε «περιοχές προτεραιότητας»).

Οι μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου σε χώρους εργασίας, όπου είναι **υποχρεωτικός** ο προσδιορισμός της, πραγματοποιούνται αποκλειστικά από αναγνωρισμένα εργαστήρια. Οι κατ' ελάχιστο σχετικές πληροφορίες είναι:

1. Η κατηγορία στην οποία εντάσσεται ο οργανισμός ή ο χώρος εργασίας.
2. Η κάτοψη, η έκταση και ο αριθμός των χώρων εργασίας του κάθε οργανισμού.
3. Ο αριθμός των εργαζομένων και ο χρόνος παραμονής τους σε κάθε χώρο εργασίας.
4. Το είδος της μέτρησης (παθητικό ή ενεργητικό σύστημα μέτρησης), η διάρκειά της, καθώς και ο σκοπός της μέτρησης (αρχική επόπτευση χώρου, μέτρηση για τον έλεγχο της εποχιακής διακύμανσης ή μέτρηση για τον έλεγχο της αποδοτικότητας διορθωτικών μέτρων).
5. Το πλήθος των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, τα σημεία μέτρησης και τα αποτελέσματα.

## Κεφάλαιο 2: Χαρακτηριστικά σπηλαίων και Τουριστική αξιοποίηση

### 2.1. Περιγραφή των σπηλαίων

Τα σπήλαια έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στην ιστορία του πλανήτη και του πολιτισμού μας με διαφορετικούς τρόπους. Η πρώτη χρήση των σπηλαίων ήταν ως πρωτόγονη κατοικία για ανθρώπους και ζώα και ως μέρη που έπαιρναν μέρος διάφορα μυστήρια και μύθοι. Σήμερα η επιστημονική μελέτη των σπηλαίων έχει προσθέσει μια πληθώρα πληροφοριών σε κλάδους όπως, οι φυσικές (γεωλογία, παλαιοντολογία, κλιματολογία, φυσική, χημεία, βιολογία και κοσμολογία), ιατρικές και κοινωνικές επιστήμες (αρχαιολογία, θεολογία και ανθρώπινη πολιτιστική ιστορία), αλλά και η μηχανική. Ενδιαφέρον έχει και η φύση των σπηλαίων, λόγω έλλειψης φωτός, γεωγραφικής απομόνωσης, θρεπτικών ουσιών, αλλά και από την παρουσία μιας σειράς ακραίων οξειδοαναγωγών συνθηκών. Τα τελευταία χρόνια έχει ανακαλυφθεί μια ποικιλία διαφορετικών τύπων σπηλαίων, αλλά και σπάνιοι ζωντανοί οργανισμοί σε αυτά. Ως εκ τούτου, οι επιστήμες που μελετούν τα σπήλαια, παίζουν σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της στάσης μας στην ιστορία του πλανήτη. Αποτελούν επίσης ένα θεμέλιο για τη διερεύνηση νέων ιδεών ζωής και την εξέλιξη των ακραίων σκοτεινών οικοσυστημάτων ζωής στη Γη και σε άλλα μέρη του Σύμπαντος.

#### 2.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά

Πολλοί διαφορετικοί ορισμοί έχουν χρησιμοποιηθεί για να περιγράψουν μια σπηλιά ή ένα σπήλαιο. Η πιο γενική περιγραφή ενός σπηλαίου, ανεξάρτητα από την γεωλογική ιστορία και την τοποθεσία του, είναι να οριστεί ως **φυσική κοιλότητα σε ένα βραχώδες περιβάλλον, όπου τουλάχιστον κάποιο μέρος του είναι σε απόλυτο σκοτάδι** (Gunn, 2004). Η επιστήμη της εξερεύνησης των σπηλαίων και διαφόρων καρστικών στοιχείων χαρακτηρίζεται ως “σπηλαιολογία” (speleology). Η σπηλαιολογία είναι μια ευρεία διεπιστημονική επιστήμη, ένα πλήθος παραμέτρων και επιστημονικών κλάδων, που πρέπει να εξεταστούν για την ενδελεχή διερεύνηση της ανάπτυξης σπηλαίων και των διαφόρων επιπτώσεών τους στο περιβάλλον τους, παγκόσμια και διαχρονικά. Τα σπήλαια αναπτύσσονται σε διαλυτά πετρώματα και αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα του καρστ (ανθρακικά πετρώματα, όπως

ασβεστόλιθος και δολομίτης) και ψευδοκάρστ (μη ανθρακικά πετρώματα), που καλύπτουν περίπου το 15-20% της μη παγωμένης επιφάνειας της γης (Ford and Williams, 2007). Αν και τα σπήλαια είναι διάσπαρτα στη Γη, δεν συνδέονται με μεγάλες φυσιογραφικές περιοχές, με περιορισμένα είδη πετρωμάτων. Τα σπήλαια παρουσιάζονται σε ευρύ φάσμα σχημάτων και μεγεθών, από μικρό-ρωγμές έως σπήλαια με μεγάλο βάθος, ύψος και μήκος. Μόνο μερικά από αυτά είναι προσβάσιμα στους ανθρώπους. Στην πραγματικότητα, πολλές είσοδοι σπηλαίων αποτελούνται μόνο από μικροσκοπικές ρωγμές. Παρά τα πολυάριθμα σπήλαια σε όλο το κόσμο, εκτιμάται ότι ακόμη και σε καλά εξερευνημένες περιοχές, όπως η Ευρώπη και η Βόρεια Αμερική, μέχρι σήμερα μόνο το 50% των σπηλαίων έχει προσπελαστεί παγκοσμίως και μόνο το 10% των σπηλαίων έχουν ανακαλυφθεί.

### **2.1.2. Ταξινόμηση και σχηματισμός**

Τα σπήλαια ταξινομούνται με διάφορα κριτήρια όπως (Northup and Lavoie, 2001; Gunn, 2004; Engel, 2011): τον τύπο του πετρώματος, την εγγύτητα στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, τη μορφολογία και οργάνωση του σπηλαίου (μέγεθος, μήκος, βάθος, ροή υγρών κλπ.) και την σπηλαιιογενετική ιστορία (προέλευση και ανάπτυξη). Μέχρι σήμερα, τουλάχιστον 250 διαφορετικά ορυκτά έχουν περιγραφεί από θέσεις Καρστ και Ψευδοκάρστ (Hill and Forti, 1997). Ωστόσο, τα συνηθέστερα είδη πετρωμάτων είναι ανθρακικά (π.χ. ασβεστόλιθος, που καλύπτει περίπου το 15% της επιφάνειας της Γης) και βασαλτικά (π.χ. σωλήνες λάβας). Κάποια λιγότερο κοινά πετρώματα περιλαμβάνουν άλλα ηφαιστειακά κοιτάσματα, γύψο, γρανίτη, χαλαζίτη, ψαμμίτη, αλάτι, πάγο.

Ανεξάρτητα από την σπηλαιιογενετική τους ιστορία, όλα τα σπήλαια αλλάζουν συνεχώς διαχρονικά, είτε με φυσικές διεργασίες καρστικοποίησης, είτε λόγω των συνεχών εξερευνήσεων.

Ανάλογα με την εγγύτητα στον υδροφόρο ορίζοντα, διακρίνονται δύο διαφορετικοί τύποι σχηματισμού: 1) τα επιγενή σπήλαια (epigenic caves), τα συνηθέστερα περιγραφόμενα, τα οποία συνδέονται με σχηματισμούς λόγω επιφανειακών διεργασιών ή βρίσκονται κοντά στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις υδρολογικές συνθήκες της περιοχής και 2) τα υπογενή σπήλαια (hypogenic caves), τα οποία σχετίζονται με τη δράση των ανερχόμενων υγρών (νερό ή αέριο), στον υδροφόρο ορίζοντα ή κάτω από αυτόν (Engel,

2011). Τα συνηθέστερα υπογενή σπήλαια είναι θειούχα και σχηματίζονται από ένα συνδυασμό θεικού οξέος. Ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος και τις γεωχημικές και γεωφυσικές συνθήκες (συμπεριλαμβανομένων των κλιματικών συνθηκών), προκύπτουν τουλάχιστον έξι διαφορετικές σπηλαιογενετικές διεργασίες.

1. Διαλυτοποίηση του περιβάλλοντος πετρώματος και της καθίζησης των ορυκτών, τα οποία ενδέχεται να ξεκινήσουν το σχηματισμό των σπηλαίων.
2. Η διαλυτοποίηση του περιβάλλοντος πετρώματος από τη σπηλαιογένεση, με παρουσία θεικού οξέος, η οποία μπορεί να διαλύσει ασβεστολιθικά πετρώματα και να δημιουργήσει μεγάλα σπήλαια, που συχνά σχετίζονται με ενεργό μικροβιολογικό αποικισμό εάν εξακολουθούν να υπάρχουν αντιδραστικά διαλύματα.
3. Ηφαιστειακή διεργασία που οδηγεί σε ροές λάβας, οι οποίες και δημιουργούν σπήλαια με σωλήνες λάβας, τα οποία μπορεί πρώτα να οδηγήσουν σε αποστειρωμένες επιφάνειες μετά από μια ηφαιστειακή έκρηξη και στη συνέχεια να σταθεροποιηθεί.
4. Φυσική αλλοίωση μέσω του νερού, η οποία οδηγεί σε σχηματισμό θαλάσσιων σπηλαίων λόγω του συνεχούς χτυπήματος των κυμάτων και του σκαψίματος των βραχωδών ακτών.
5. Σπήλαια κατά μήκος της ακτής σχηματίζονται με τη συνεχή διαλυτοποίηση του περιβάλλοντος πετρώματος σε διεπαφή του γλυκού με το αλατούχο νερού.
6. Τα σπήλαια πάγου σχηματίζονται από ρυάκια που διαβρώνουν σήραγγες κάτω και μέσα στον πάγο.

### **2.1.3. Εσωτερικό περιβάλλον**

Διάφοροι παράμετροι συμβάλλουν στη διαμόρφωση των εσωτερικών χώρων των σπηλαίων, όπως σχισμές, ρήγματα, πόροι, διαλυτικά διογκωμένοι αγωγοί και περάσματα τα οποία σχηματίζουν ένα πορώδες και διαπερατό συνεχές που μπορεί να αποικιστεί από οργανισμούς.

Μια είσοδος που συνδέεται με την επιφάνεια μπορεί να έχει τρεις κυρίαρχες ζώνες με βάση τη διείσδυση του φωτός: 1. Η ζώνη εισόδου, η οποία εκτίθεται σε πλήρη ηλιοφάνεια και δέχεται τον ημερήσιο κύκλο φωτός, 2. Τη ζώνη του λυκόφωτος και 3 . τη σκοτεινή ζώνη, όπου δεν υπάρχουν πηγές φωτός.



Εικόνα 2. 1: Οι τρεις ζώνες (είσοδος, λυκόφως, σκοτάδι) ενός σπηλαίου (Lee, 2012).

Στις ζώνες της εισόδου και του λυκόφωτος οι συνθήκες επιτρέπουν την ζωή σε μια μεγάλη ποικιλία οργανισμών, όπως έντομα και σπονδυλωτά.

Σε αντίθεση με τις επιφανειακές ζώνες, οι συνθήκες στα βαθύτερα τμήματα των σπηλαίων είναι πιο σταθερές (σταθερή θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους). Παρόλα αυτά, ακόμα και οι σταθερές συνθήκες μπορούν να θεωρηθούν ακραίες, διότι επικρατεί ένα συνεχές σκοτάδι το οποίο καθιστά αδύνατο τη φωτοσύνθεση.

Ως εκ τούτου, τα βαθιά τμήματα των σπηλαίων θεωρούνται υπερβολικά φτωχά σε θρεπτικά συστατικά.

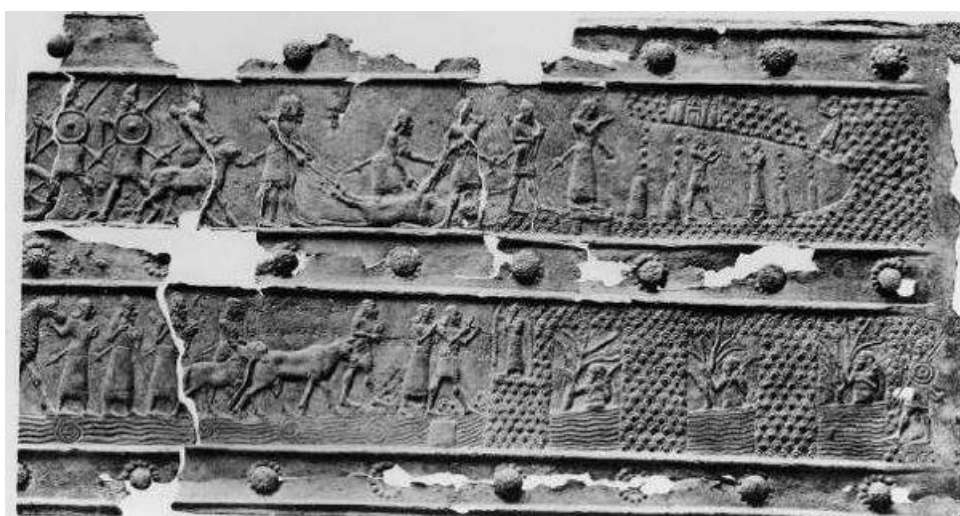
Μερικά σπήλαια με απευθείας υδρολογικές συνδέσεις από την επιφάνεια, μπορεί να υπόκεινται σε καταστροφικά γεγονότα όπως πλημμύρες. Τα σπήλαια στις ερήμους μπορεί να υποστούν μεγάλες περιόδους ξηρασίας. Επίσης, τα συστήματα λάβας μπορεί να έχουν ανανεωμένη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Στα υπογενή σπήλαια μπορεί επίσης να υπάρχουν επικίνδυνες συνθήκες, όπως, τοξικές συγκεντρώσεις ανόργανων ενώσεων όπως θείο, βαρέα μέταλλα, θανατηφόρα αέρια ή ραδιενέργεια.

## 2.2.Τουριστική αξιοποίηση σπηλαίων

### 2.2.1. Ιστορική αναδρομή και χρήση των σπηλαίων

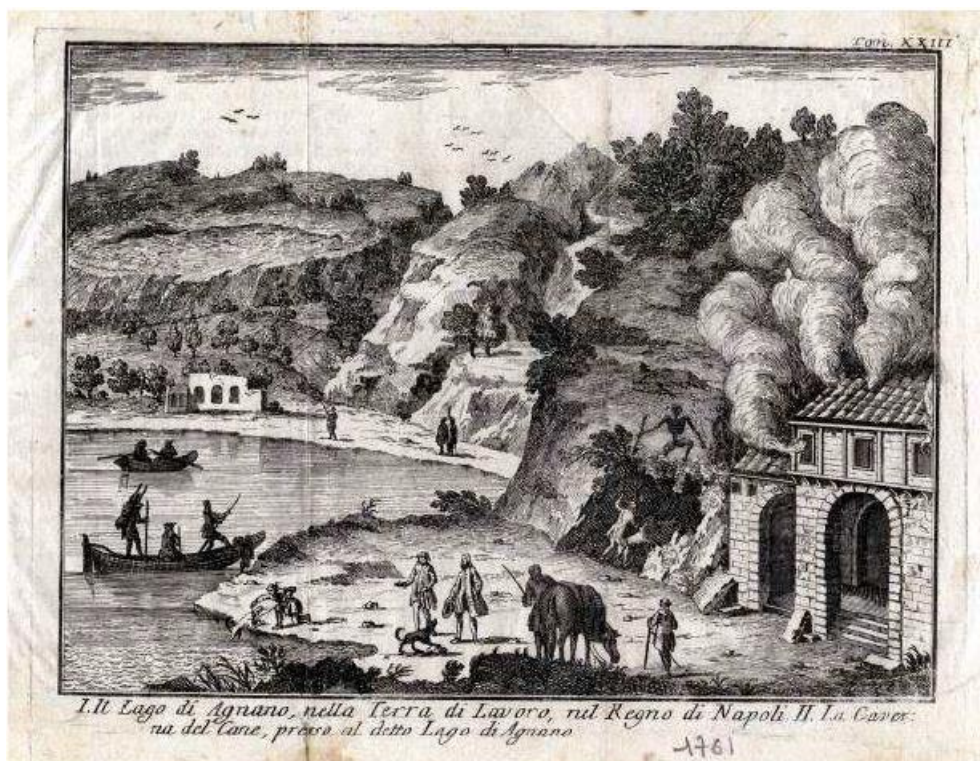


Τα σπήλαια πάντοτε έλκυαν το ενδιαφέρον. Κατά τα προϊστορικά χρόνια, ο άνθρωπος τα χρησιμοποιούσε κυρίως για πρακτικούς λόγους, δηλαδή για καταφύγιο ή χώρο ταφής και άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες δεν μπορούν να θεωρηθούν τουριστικές. Η πρώτη καταγεγραμμένη τουριστική επίσκεψη ενός σπηλαίου έλαβε χώρα στη Μεσοποταμία όπου, ο Shalmaneser Βασιλιάς της Ασσυρίας το 853 ή 852 π.Χ. επισκέφτηκε ένα φυσικό σπήλαιο στο οποίο ένας προγενέστερος βασιλιάς της Ασσυρίας είχε χαραγμένο το πορτρέτο του στην είσοδο του σπηλαίου. Το γεγονός αυτό απεικονίζεται σε μια μπρούτζινη πλακέτα στην πύλη του βασιλικού παλατιού στο Balawat, που εκτίθεται τώρα στο Βρετανικό Μουσείο (Είκ. 2.2).



*Εικόνα 2. 2: Η μπρούτζινη πλακέτα της πύλης του βασιλικού παλατιού στο Balawat, που εκτίθεται τώρα στο Βρετανικό Μουσείο στο οποίο παρουσιάζεται η επίσκεψη σε ένα σπήλαιο (Cigna, 2013).*

Αργότερα, πριν από 2000 χρόνια περίπου, ο Πλίνιος ένας Ρωμαίος συγγραφέας, περιέγραψε το σπήλαιο Dog's Cave κοντά στη Νάπολη της Ιταλίας, το οποίο επισκέφθηκαν αρκετά άτομα λόγω της απελευθέρωσης διοξειδίου του άνθρακα σε σημείο κοντά στο πάτωμα, το οποίο σκότωνε μικρά ζώα (γεγονός από το οποίο προέκυψε και το όνομά του) (Είκ.2.2). Την ίδια περίοδο, αρκετά σπήλαια με υψηλές θερμοκρασίες μετατράπηκαν σε θερμά λουτρά, όπως το σπήλαιο Sciacca στη Σικελία. Επίσης, σε πολλές χώρες τα σπήλαια τα επισκέπτονταν για θρησκευτικούς σκοπούς. Αργότερα μέχρι τον Μεσαίωνα τα σπήλαια συσχετίστηκαν με τον διάβολο ή την κόλαση και οι άνθρωποι απέφευγαν να τα επισκέπτονται.



Εικόνα 2. 3: Το σπήλαιο “Dog Cave” σε χάλκινη εγχάραξη του 17<sup>ου</sup> Αιώνα (Cigna, 2013).

Παρόλα αυτά, εάν ένα τουριστικό σπήλαιο έχει οριστεί ως ένα σπήλαιο στο οποίο πρέπει να πληρώσει κάποιος για να εισέλθει σε αυτό, τότε το παλαιότερο τουριστικό σπήλαιο είναι το Vilenica στη Σλοβενία. Στις αρχές του 17<sup>ου</sup> αιώνα, ο Κόμης του Petac άρχισε να προσκαλεί τους ανθρώπου της Τεργέστης και μερικούς ευγενείς φίλους του, να επισκεφθούν το σπήλαιο σε ορισμένες γιορτές. Πιθανώς ήδη από το 1633 ο Κόμης χρέωνε την είσοδο του επισκέπτη στο σπήλαιο. Μέρος των χρημάτων δωρίστηκε στην τοπική εκκλησία του Lokey, όπου συμφωνήθηκε να αξιοποιηθούν στην άυξηση της ασφάλειας των ανθρώπων εντός του σπήλαιου.

Στην πραγματικότητα, κατά τη διάρκεια του 18<sup>ου</sup> αιώνα μόλις, ο τουρισμός των σπηλαίων έγινε δημοφιλής στην Ευρώπη. Αρκετά σπήλαια απέκτησαν παγκόσμια φήμη με αποτέλεσμα να τα επισκέπτονται εκατοντάδες άτομα ετησίως, αναπτύσσοντας μια τουριστική οργάνωση γύρω από αυτά. Τα περισσότερα από τα πρώιμα σπήλαια εξακολουθούν να είναι σημαντικά και σήμερα και δέχονται κάποιες εκατοντάδες χιλιάδες επισκέπτες ετησίως. Ένα από αυτά τα σπήλαια είναι το σπήλαιο της Αντιπάρου στις Κυκλάδες της Ελλάδας το οποίο ήταν ένα μεγάλο αξιοθέατο αυτό συμπεραίνεται από τις πολλές εκτυπώσεις που αναπαράγουν το σπήλαιο (είκ.3). Στο τέλος του 18<sup>ου</sup> αιώνα, ο τουρισμός των σπηλαίων αρχίζει να αναπτύσσεται και εκτός Ευρώπης. Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα υπήρχαν πλέον εκατοντάδες σπήλαια, με τα

περισσότερα να βρίσκονται στην Ευρώπη, τα οποία κάθε χρόνο τα επισκέπτονταν ένας συνεχώς αυξανόμενος αριθμός τουριστών. Όμως, η πραγματική έκρηξη του τουρισμού ξεκίνησε μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, όταν η δυνατότητα ταξιδιού έγινε φθηνότερη και ευκολότερη, ακόμη και στη μεσαία τάξη, με τον μαζικό τουρισμό να γίνεται πραγματικότητα.



*Εικόνα 2. 4: Η κύρια αίθουσα του σπηλαίου της Αντιπάρου σε εγχάραξη του 18ου αιώνα (Cigna, 2013)*

Στο τέλος του 20<sup>ου</sup> αιώνα, η σημασία των τουριστικών σπηλαίων αναπτύχθηκε ραγδαία κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου εκατοντάδες νέα σπήλαια ανακαλύπτονται και μετατρέπονται σε τουριστικά αξιοθέατα. Ως αποτέλεσμα, σήμερα σχεδόν σε κάθε χώρα, υπάρχει τουλάχιστον ένα τουριστικό σπήλαιο. Επί αιώνες τα σπήλαια ήταν τα μόνα γεωλογικά στοιχεία, για τα οποία υπήρχε τεράστιο τουριστικό ενδιαφέρον. Ωστόσο τις τελευταίες δεκαετίες, η διερεύνηση ενός τουριστικού αξιοθέατου, έλαβε σταδιακά μεγαλύτερη προσοχή προκειμένου να ερευνηθούν όλες οι πιθανές πτυχές της εξεταζόμενης περιοχής. Αυτή η αλλαγή, οφείλεται επίσης σε οικονομικούς λόγους, οδηγώντας έτσι σε καλύτερη ενσωμάτωση των διαφόρων τουριστικών στόχων μεταξύ τους.

Είναι μάλλον αδύνατο να καθοριστεί επακριβώς ο συνολικός οικονομικός προϋπολογισμός του συνόλου των τουριστικών σπηλαίων, λόγω της έλλειψης διαθέσιμων και αξιόπιστων δεδομένων των επισκεπτών τους και των ακόμη λιγότερων δεδομένων των επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται στα τουριστικά σπήλαια

(μεταφορά, διαμονή, εστίαση κ.λπ.). Με κάποιους παλαιούς πρόχειρους υπολογισμούς, αξιολογήθηκε ότι υπάρχουν περίπου 500 μεγάλα σπήλαια με πάνω από 50.000 επισκέπτες/έτος, ενώ πάνω από 250 εκατομμύρια επισκέπτες πληρώνουν ετησίως κατά μέσο όρο ένα εισιτήριο των 5 δολαρίων (U.S. \$) για να τα επισκεφθούν, φτάνοντας ένα συνολικό ποσό των 1.25 δισεκατομμυρίων δολαρίων ετησίως. Αλλά πολύ υψηλότερα είναι τα έσοδα από τον συνυπολογισμό όλων των δραστηριοτήτων που σχετίζονται αυστηρά με τα τουριστικά σπήλαια (μεταφορά, διαμονή, εστίαση κ.λπ.), εάν ληφθεί υπόψη ότι περίπου 100 εκατομμύρια άνθρωποι λαμβάνουν, άμεσα ή έμμεσα, το εισόδημά τους από την εργασία τους σε αυτά.

Σήμερα, δύο ακόμα δραστηριότητες αξιοποίησης των σπηλαίων από τον άνθρωπο, δημιουργούν τεράστιες τουριστικές ροές. Η πρώτη σχετίζεται με τη θρησκεία και η δεύτερη με την υγειονομική περίθαλψη. Ακόμη και σήμερα, οι τρεις μεγαλύτερες μονοθεϊστικές θρησκείες (Ιουδαϊσμός, Χριστιανισμός, Μουσουλμανισμός), συνδέονται με τα σπήλαια. Ως αποτέλεσμα, αυτά τα «ιερά» σπήλαια, τα επισκέπτονται εκατομμύρια προσκυνητές κάθε χρόνο, με τα συνολικά έσοδα του θρησκευτικού τουρισμού στα σπήλαια να αντιστοιχεί στο 15 - 20% των συνολικών τουριστικών εσόδων των επισκέψιμων σπηλαίων. Η δεύτερη σημαντική οικονομική δραστηριότητα, είναι αυτή που σχετίζεται με την ανθρώπινη υγεία. Τα σπήλαια με θερμές πηγές, χρησιμοποιήθηκαν από την αρχαιότητα, όμως από τον 20<sup>ο</sup> αιώνα και μετά, άρχισαν να γίνονται σημαντικοί οικονομικοί πόροι. Κατά το δεύτερο μισό του προηγούμενου αιώνα, τα ψυχρά σπήλαια άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως για σπηλαιοθεραπεία, κυρίως στις χώρες της Ανατολικής Ευρώπης (Sandri, 1997), θεραπεία η οποία χρησιμοποιείται σε διάφορες ασθένειες (αλλεργιογόνο άσθμα, αρθритικά κ.λπ.). Συμπερασματικά, οι δύο ιδιαίτεροι τύποι τουρισμού σε σπήλαια συμβάλλουν έως και 50-60% των συνολικών εσόδων των επισκέψιμων σπηλαίων του κόσμου.

Πίνακας 2. 1: Διαφορετικές παγκόσμιες χρήσεις των σπηλαίων

Χρήση των τουριστικών σπηλαίων	Επισκέπτες (%)	Οικονομία (%)
Τουρισμός	77-83	40-50
Θρησκευτικοί λόγοι	15-20	15-20
Λόγοι Υγείας	2-3	35-40
Σύνολο	100	100

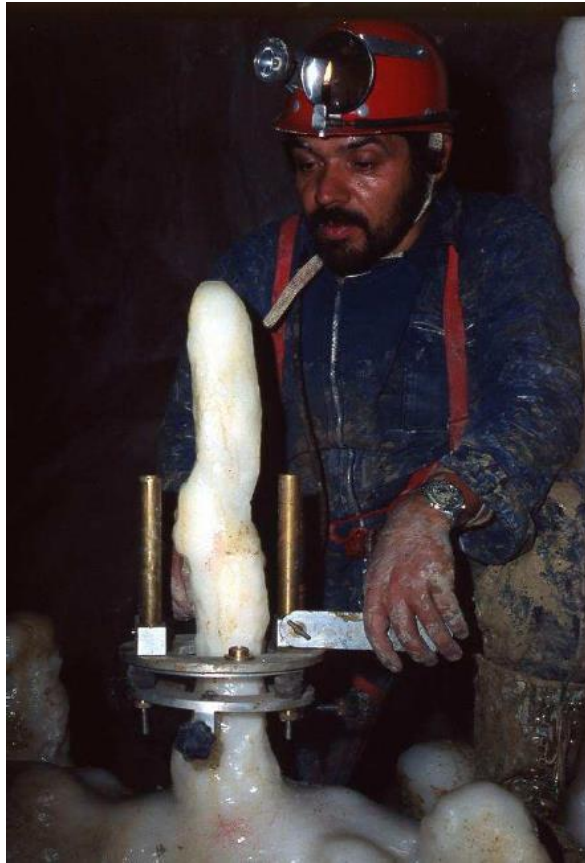
### 2.2.2. Επιστημονική σημασία



Στο τέλος της δεύτερης χιλιετίας, ήταν ήδη σαφές ότι τα σπήλαια είναι ίσως το καλύτερο μέρος στο κόσμο για την πραγματοποίηση ερευνών σε πολλούς διαφορετικούς τομείς (Forti, 2002,2009). Αυτό οφείλεται στα χαμηλά και πολύ χαμηλά ενεργειακά πεδία των σπηλαίων, με λιγοστούς «θορύβους» από το εξωτερικό περιβάλλον, επιτρέποντας έτσι εξαιρετικά ακριβή πειράματα που είναι αδύνατον να πραγματοποιηθούν σε εξωτερικούς χώρους. Επιπλέον, το περιβάλλον των σπηλαίων λειτουργεί ως τέλεια παγίδα συσσώρευσης για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι περισσότερες από τις γνώσεις που έχουμε για τους προγόνους μας, δεν θα ήταν διαθέσιμες χωρίς τα σπήλαια (είκ. 2.4). Οι φυσικές και χημικές αποθέσεις είναι ικανές να καταγράφουν σχεδόν οποιοδήποτε συμβάν στις περιοχές των σπηλαίων κατά την ανάπτυξή τους, επιτρέποντας έτσι ακριβείς παλαιό-κλιματική-περιβαλλοντική-σεισμική ανακατασκευή. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά διαμορφώνουν τα σπήλαια σε ένα τέλειο πειραματικό εργαστήριο σε τομείς όπως η φυσική, η βιολογία, η γεωλογία, η μηχανική, η ιατρική κ.λπ.



*Εικόνα 2. 5: Ο άνδρας του Altamira είναι ο καλύτερος συντηρημένος παλαιός σκελετός στην Ευρώπη, ο οποίος χρονολογείται πριν από 100.000 χρόνια (Cigna, 2013).*



*Εικόνα 2. 6: Η κάθετη παραμόρφωση στον άξονα του σταλαγμίτη μπορεί να καταγράψει ισχυρούς σεισμούς του παρελθόντος (Cigna, 2013).*

Ακόμη και αν θεωρητικά όλες οι φυσικές κοιλότητες είναι κατάλληλες για έρευνα, στην πράξη μόνο λίγα από αυτά μπορούν να μετατραπούν σε εργαστήρια. Στην πραγματικότητα οι επιστήμονες απαιτούν από ένα σπήλαιο να ανταποκρίνεται σε μερικά κοινά χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Να είναι σε όσο το δυνατόν πιο αναξιοποίητη κατάσταση.
- Να είναι εύκολα προσβάσιμο.
- Να είναι ασφαλές.
- Να υπάρχει παροχή ενέργειας.

### **2.2.3. Τρόποι σχεδιασμού, εφαρμογής και διαχείρισης**

Τα θεμελιώδη κριτήρια που πρέπει να θεσπιστούν για των σωστό σχεδιασμό ενός τουριστικού σπηλαίου είναι, η προστασία του περιβάλλοντος των σπηλαίων, η ασφάλεια των επισκεπτών και το ορθό κέρδος από τη διαχείριση τους. Τα κριτήρια αυτά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, αλλιώς η ανάπτυξη θα έχει αρνητικές επιπτώσεις. Όπως δήλωσε η Summers (2012), η χειρότερη μοίρα στην οποία μπορεί να καταλήξει

ένα σπήλαιο είναι να αναπτυχθεί τουριστικά, να αποτύχει ως επιχειρηματική οντότητα και να κλείσει. Το σπήλαιο γίνεται πολύ ευάλωτο από την κακή χρήση. Για το λόγο αυτό, τα τουριστικά σπήλαια δεν πρέπει να είναι επικερδής βραχυπρόθεσμα, αλλά μακροπρόθεσμα. Αυτό σημαίνει ότι είναι απαραίτητο να υπάρχει η γνώση και ευαισθητοποίηση των φυσικών αναγκών του σπηλαίου, ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση και προστασία του περιβάλλοντος του. Εκατοντάδες άγρια σπήλαια μετατρέπονται κάθε χρόνο σε τουριστικά, το οποίο μερικές φορές καταλήγει στη σπατάλη χρημάτων και στην καταστροφή της άγριας φύσης τους. Για να αποφευχθεί αυτό, πριν από τη μετατροπή ενός σπηλαίου, πρέπει να απαντηθούν θετικά τα ακόλουθα ερωτήματα:

1. Υπάρχει πραγματική επιθυμία για τουρισμό στο σπήλαιο;
2. Το σπήλαιο και το περιβάλλον Καρστ μπορεί να φιλοξενήσουν τον υποτιθέμενο τουρισμό χωρίς μεγάλα προβλήματα;

Στην πραγματικότητα, αν έστω και ένα από αυτά ερωτήματα έχουν αρνητική απάντηση, είναι σχεδόν βέβαιο ότι το τουριστικό πλάνο θα αποτύχει και σε μικρό χρονικό διάστημα το σπήλαιο θα κλείσει, με απώλεια χρημάτων και αλλοίωση της παρθένας κατάστασης του. Ως εκ τούτου, η ορθή εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την τουριστική ανάπτυξη και διαχείριση ενός σπηλαίου, πρέπει να υποδιαιρείται σε τρία στάδια ειδικών μελετών και αναλύσεων.

1. Πριν το ξεκίνημα
2. Κατά τη διάρκεια της μετατροπής
3. Κατά τη διάρκεια της διαχείρισης

#### Πριν το ξεκίνημα

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, πρέπει να περιγράφονται όλα τα θετικά πιθανά σημεία ενδιαφέροντος για τους τουρίστες (γραφικά σημεία, γεωλογικά και αρχαιολογικά στοιχεία, κ.λπ.). Ταυτόχρονα όλα τα αρνητικά σημεία (κίνδυνοι ολίσθησης ή κατάρρευσης, πλημμύρες κ.λπ.), πρέπει να καθορίζονται σαφώς και να εξετάζονται. Οι έρευνες πρέπει να επεκτείνονται επίσης εκτός του σπηλαίου, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την περιοχή, αλλά να αναλύουν και τις ήδη υπάρχουσες τουριστικές ροές και τη δυνατότητα μεταφοράς με γρήγορο και εύκολο τρόπο των τουριστών προς το σπήλαιο. Σε κάθε περίπτωση, ο σημαντικότερος παράγοντας υπόδειξης ενός σπηλαίου ως οικονομικά βιώσιμο είναι η μεταφορική ικανότητα των

επισκεπτών, που καθορίζει τον μέγιστο αριθμό τουριστών που ενδέχεται να εισέλθουν στο σπήλαιο σε δεδομένο χρονικό διάστημα.

#### Κατά τη διάρκεια της μετατροπής

Εάν το πρώτο βήμα παρείχε θετικά αποτελέσματα για την τουριστική υλοποίηση του σπηλαίου, τότε η τουριστική μελέτη πρέπει να καθοριστεί λεπτομερώς με βάση τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν κατά το προηγούμενο στάδιο. Προφανώς, η δομή των τουριστικών διαδρομών πρέπει να συνάδει με την ικανότητα μεταφοράς των επισκεπτών και πρέπει να είναι σχεδιασμένη για την ασφαλή προσέγγιση, όσο το δυνατόν πιο κοντά στα ήδη καθορισμένα γραφικά σημεία, αποφεύγοντας την καταστροφή τους. Επιπλέον, η χωροθέτηση των εξωτερικών εγκαταστάσεων πρέπει να σχεδιάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η κατασκευή τους πάνω στο σπήλαιο ή σε περιοχές κοντά σε αυτό. Συγκεκριμένα, πρέπει να αποφεύγεται οποιαδήποτε παρέμβαση, όπως για παράδειγμα ένα μεγάλο σκέπαστρο χώρου στάθμευσης, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ύδρευσης του σπηλαίου, με αρνητική επίδραση σε αυτό και στην ανάπτυξη των σχηματισμών του. Μετέπειτα, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις τεχνικές και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή του άγριου σπηλαίου σε τουριστικό, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το κόστος, διατηρώντας παράλληλα την άγρια φύση του.

#### Κατά τη διάρκεια της διαχείρισης

Η «υγιή» φροντίδα ενός σπηλαίου κατά τη διάρκεια της τουριστικής αξιοποίησης του, είναι το πιο σημαντικό από τα τρία βήματα, αλλά και το πιο παραμελημένο βήμα από τους υπευθύνους. Αυτό συμβαίνει επειδή εσφαλμένα πιστεύεται ότι, ένα καλοσχεδιασμένο σπήλαιο δεν θα αντιμετωπίσει προβλήματα, με αποτέλεσμα να μην θέλουν να “σπαταλούν χρήματα” σε δραστηριότητες που θεωρούν ότι δεν συνδέονται με την άμεση διαχείριση σπηλαίου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο τουρισμός μπορεί να επηρεάσει αρνητικά το περιβάλλον των σπηλαίων, τόσο βραχυπρόθεσμα, όσο και μακροπρόθεσμα. Για αυτό είναι πραγματικά αναγκαίο να ελέγχονται συνεχώς τουλάχιστον οι πιο ευαίσθητες παραμέτρους του σπηλαίου, ώστε εάν εμφανιστούν τα πρώτα αρνητικά αποτελέσματα και να διορθωθούν άμεσα από τους υπεύθυνους, αποφεύγοντας τη πιθανότητα σοβαρής βλάβης του.

Οι κατευθυντήριες γραμμές διαχείρισης της Διεθνής Ένωση Σπηλαιολογίας (U.I.S) (International Union of Speleology) για τα τουριστικά σπήλαια, περιέχουν πολύ



χρήσιμες συστάσεις και έναν κατάλογο των ελαχίστων απαιτήσεων, για την καλή ανάπτυξη και διαχείριση ενός τουριστικού σπηλαίου. Ωστόσο, αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές δεν είναι πάντα ενημερωμένες με την πρόοδο της τεχνολογίας.

## Κεφάλαιο 3: Ανιχνευτές συγκέντρωσης ραδονίου

### 3.1. Εισαγωγικά στοιχεία ανιχνευτών

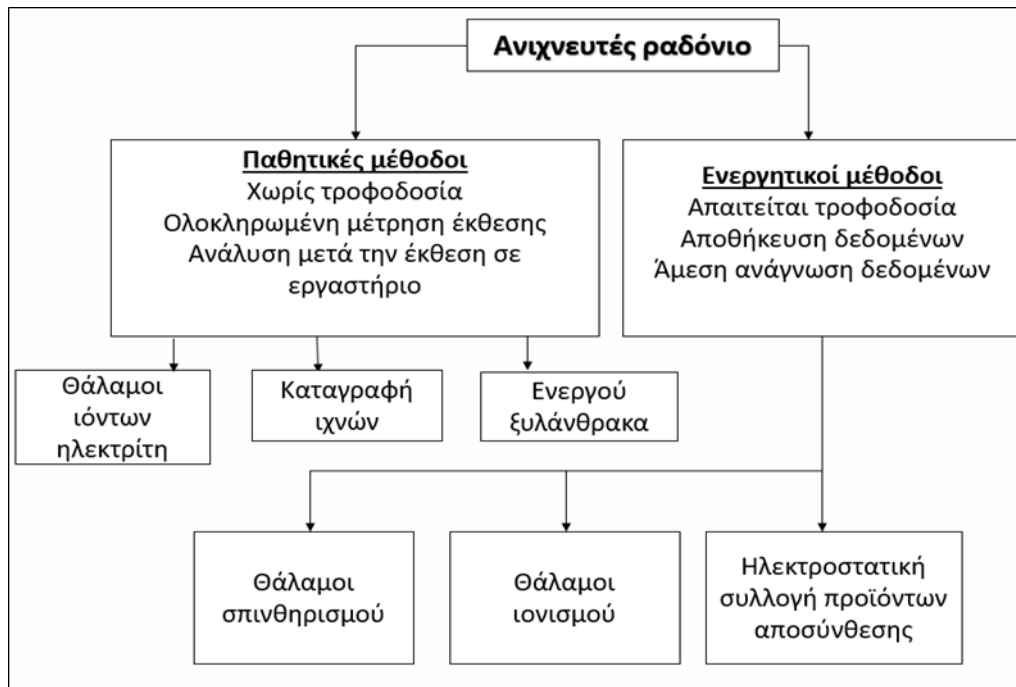
Μέχρι σήμερα πολλές τεχνικές και μέσα, είναι διαθέσιμα για τη μέτρηση του ραδονίου και των προϊόντων διάσπασης, με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε διάφορες καταστάσεις. Για πολλούς λόγους, είναι θεμιτό να είναι γνωστές οι μακροπρόθεσμες μέσες εκθέσεις, ενώ για διαγνωστικούς σκοπούς μπορεί να είναι κατάλληλη μια συνεχής μέτρηση. Η τεχνική που χρησιμοποιείται βασίζεται στη σκοπιμότητα και το κόστος της μέτρησης, καθώς και την ακρίβεια και την εφαρμογή της τεχνικής.

Οι τεχνικές μέτρησης, διακρίνονται ως προς τον χρόνο απόκρισής τους. Η διάρκεια μιας μέτρησης μπορεί να ποικίλει σε ευρύ φάσμα:

- **Grab sample** (στιγμιαία δειγματοληψία) – δευτερόλεπτα ή λεπτά.
- **Short term average** (βραχυπρόθεσμος μέσος όρος) – ημέρες.
- **Long term average** (μακροπρόθεσμος μέσος όρος) – εβδομάδες ή μήνες.
- **Continuous** (συνεχής) – ολοκλήρωση σε διάστημα λεπτών ή ωρών που επαναλαμβάνεται επ' αόριστον

Οι τεχνικές μέτρησης διακρίνονται επίσης ανάλογα με το είδος του ανιχνευτή που χρησιμοποιείται. Η διάκριση γίνεται μεταξύ των ενεργητικών ανιχνευτών (active techniques) και των παθητικών ανιχνευτών (passive techniques). Για τη λειτουργία των ενεργητικών ανιχνευτών, απαιτείται ηλεκτρική ισχύς και παρουσία τεχνικού προσωπικού, το οποίο συνεπάγεται υψηλό κόστος οργάνων και προσωπικού. Αντιθέτως, στους παθητικούς ανιχνευτές, τα παραπάνω δεν είναι απαραίτητα, ενώ το κόστος των μετρήσεων είναι πολύ μικρότερο. (Νικολόπουλος Δ. et al, 2015)

*Διάγραμμα 3. 1: Ανιχνευτές ραδονίου*



Οι τεχνικές μέτρησης ραδονίου με ενεργητικούς ανιχνευτές, μετράνε τη συγκέντρωση ραδονίου σε πραγματικό χρόνο. Οι ανιχνευτές αποτελούνται από έναν κατάλληλο θάλαμο εντός του οποίου εισέρχεται το ραδόνιο. Οι κυριότεροι τύποι θαλάμων που χρησιμοποιούνται σε ενεργητικούς ανιχνευτές είναι: (α) θάλαμοι σπινθηρισμών, (β) θάλαμοι ιοντισμού και (γ) θάλαμοι ημιαγωγών τοιχωμάτων.

### 3.2. Παθητικοί ανιχνευτές

Οι παθητικοί ανιχνευτές χωρίζονται στους παρακάτω τρεις (3) τύπους.

#### Ανιχνευτές ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα

Ο ενεργός ξυλάνθρακας έχει συγγένεια με πολλά αέρια συμπεριλαμβανομένου του ραδονίου. Το ραδόνιο που απορροφάται στον ενεργοποιημένο ξυλάνθρακα, διασπάται και τα προϊόντα διάσπασης διατηρούνται, επιτρέποντας του να μετρηθεί με φασματομετρία – γ εκπομπών μόλυβδου - 214 και βισμούθιου - 214 (George, 1984). Μια εναλλακτική λύση στη φασματομετρία – γ είναι η μέτρηση με υγρό σπινθηρισμού, όπου αναμειγνύεται ο ενεργοποιημένος ξυλάνθρακας που έχει εκτεθεί σε ραδόνιο. Οι ανιχνευτές συνήθως περιλαμβάνουν ένα στρώμα κοκκοποιημένου ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα, που συγκρατείται σε μεταλλικό δοχείο, με μεταλλικό πλέγμα και αποσπώμενο καπάκι. Κατά την μέτρηση, το καπάκι αφαιρείται, εκθέτοντας τον

ενεργοποιημένο ξυλάνθρακα. Η ανίχνευση με ενεργοποιημένο ξυλάνθρακα δεν είναι στην πραγματικότητα ολοκληρωτική μέθοδος, καθώς το ραδόνιο κατά την έκθεσή του, αποσυντίθεται και απορροφάται εν μέρει από τον ενεργοποιημένο ξυλάνθρακα. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε περιόδους δύο (2) έως και επτά (7) ημερών, καθώς ο χρόνος ημιζωής του ραδονίου είναι 3,82 ημέρες, άρα οι μετρήσεις μεγαλύτερης περιόδου θα ήταν άσκοπες. Οι ανιχνευτές ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα κάνουν ακριβείς μετρήσεις των συγκεντρώσεων ραδονίου. Παρόλα αυτά, σε μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου σε κτίρια για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους από μερικές ημέρες, το αποτέλεσμα δεν θα είναι πραγματικά αντιπροσωπευτικό του μακροπρόθεσμου μέσου όρου.

### **Θάλαμοι ιόντων διηλεκτρικού (electret)**

Ένα διηλεκτρικό (electret), είναι υλικό το οποίο όταν φορτιστεί, κρατάει το φορτίο και το ηλεκτρικό δυναμικό του για περίοδο ενός έτους ή παραπάνω (Nazaroff & Nero, 1988). Σε αυτή την τεχνική (Kotrappa et al., 1992), ένα τεφλόν διηλεκτρικού τοποθετείται στον πυθμένα ενός αγωγίμου πλαστικού θαλάμου ιόντων διηλεκτρικού (Electret Ion Chamber - EIC). Το ραδόνιο διαχέεται εντός του θαλάμου, στην συνέχεια το διηλεκτρικό χάνει φορτίο λόγω του ιονισμού του αέρα που παράγεται από το ραδόνιο, με αποτέλεσμα να αποσυνθέτει προϊόντα διάσπασης στον θάλαμο. Αυτός ο ανιχνευτής ενεργεί ως ολοκληρωτής πραγματικού χρόνου, αλλά έχει περιορισμένο δυναμικό εύρος. Σε πιο ακριβείς μετρήσεις, γίνεται διόρθωση του υψομέτρου για να αντισταθμιστεί η διακύμανση της ατμοσφαιρικής πίεσης. Κατά τη χρήση της συσκευής χρειάζεται προσοχή καθώς, η σκόνη στην φορτισμένη επιφάνεια του διηλεκτρικού και η πτώση του θαλάμου σε σκληρή επιφάνεια, μπορούν να οδηγήσουν σε υπερεκτίμηση της έκθεσης στο ραδόνιο.

### **Ανιχνευτές καταγραφής ιχνών**

Οι ανιχνευτές καταγραφής των ιχνών σωματιδίων-α από το ραδόνιο και τα προϊόντα διάσπασης του, βασίζονται στη χρήση πλαστικού υλικού. Τα πολυμερή αυτά υλικά, έχουν την ιδιότητα να διατηρούν μόνιμη την πρωταρχική καταστροφή που προκαλεί το κύτπημα ενός πυρηνικού σωματιδίου στην επιφάνειά τους. Στη συνέχεια, τα ίχνη που δημιουργούνται μπορούν να αποκαλυφθούν με χημική ή ηλεκτροχημική διάβρωση του πλαστικού σε διάλυμα NaOH ή KOH, μερικές φορές συμπληρωμένο με αιθανόλη.

Στις μετρήσεις ραδονίου, τρία είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται γενικά: το LR-115 (μια λεπτή ταινία έγχρωμης νιτρικής κυτταρίνης), το πολυανθρακικό και το CR-39 (ανθρακική πολύ αλλυλ-διγλυκόλη). Τα υλικά αυτά καλούνται Ανιχνευτές Πυρηνικών Ιχνών (Solid State Nuclear Track Detectors - SSNTDs). Οι ανιχνευτές πολυανθρακικών απαιτούν ηλεκτροχημική διάβρωση, στην οποία εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση στον ανιχνευτή κατά τη διάρκεια της καταγραφής των ιχνών. Μελέτη διαφορετικών εργαστηρίων (διεθνούς σύγκρισης), σχετικά με την απόδοση των παθητικών ανιχνευτών ραδονίου (Miles & Sinnaeve, 1986) έδειξε ότι, όλα τα LR-115, τα πολυανθρακικά και τα CR-39 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κάνουν ακριβείς μετρήσεις. Οι αποκλίσεις στην ακρίβεια των μετρήσεων, μεταξύ των εργαστηρίων, προκλήθηκαν κυρίως από διαφορές στους ποιοτικούς ελέγχους, παρά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 3. 1: Ανιχνευτές CR-39 (Parravicini, 2012).

Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο τύποι ανιχνευτών καταγραφής ιχνών. Ο πρώτος, γνωστός ως κλειστός ανιχνευτής, αποτελείται από τον ανιχνευτή ιχνών, που βρίσκεται εντός θαλάμου και επιτρέπει στο ραδόνιο - 222 να διαχέεται σε αυτόν. Ο δεύτερος, γνωστός ως ανοιχτός ανιχνευτής, αποτελείται από υλικό ανίχνευσης ίχνους που εκτίθεται γυμνό στο περιβάλλον. Οι κλειστοί ανιχνευτές αποκλείουν προϊόντα διάσπασης ραδονίου που υπάρχουν στο περιβάλλον, καταγράφοντας μόνο τα σωματίδια-α, τα οποία δημιουργούνται από το ραδόνιο που εισέρχεται στο θάλαμο και τα προϊόντα διάσπασης που σχηματίζονται από αυτό. Αυτή η μορφή ανιχνευτή παρέχει

επομένως ένα αποτέλεσμα που σχετίζεται με την πραγματική μέση συγκέντρωση ραδονίου κατά τη διάρκεια της έκθεσης.

Αντιθέτως, οι ανοιχτοί ανιχνευτές καταγράφουν α-σωματίδια που προέρχονται, τόσο από το ραδόνιο - 222, όσο και από το ραδόνιο - 220 και τα προϊόντα διάσπασης του στο περιβάλλον.

Οι ανιχνευτές καταγραφής ιχνών χρησιμοποιούνται γενικά για περιόδους από ένα μήνα έως ένα έτος. Σχετικά με την απόκτηση αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων από ένα κτίριο, η διάρκεια έκθεσής των ανιχνευτών πρέπει να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη. Ωστόσο, οι πρακτικές εκτιμήσεις συχνά περιορίζουν τη διάρκεια της έκθεσης. Για αυτό ορισμένα υλικά ανίχνευσης χάνουν την ευαισθησία τους κατά τη μεγάλη διάρκεια έκθεσής τους στον αέρα. Οι ανιχνευτές καταγραφής ιχνών παράγονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία σε πολλά εργαστήρια (Howarth & Miles, 2003)

### 3.3. Ανιχνευτές CR – 39 και LR – 115

Ο **ανιχνευτής CR - 39** (ally-diglycol carbonate/ανθρακική αλλυλ-διγλυκόλη, C12 - H18-O7) είναι το πιο δημοφιλές μέλος της οικογένειας SSNTD και είναι διαθέσιμο σε εμπορική κλίμακα. Μπορεί να ανιχνεύσει όλες τις ενέργειες α-σωματιδίων από μηδέν έως και περισσότερο από 7,7MeV, χωρίς υποβάθμιση. Ο **ανιχνευτής LR - 115**, μια ευαίσθητη νιτρική κυτταρίνη (C6-H8O8-N2), είναι επίσης δημοφιλής στις μετρήσεις ραδονίου. Αποτελείται από ένα στρώμα νιτρικής κυτταρίνης πάχους 12μm πάνω σε έναν υποστηρικτή πολυεστέρα πάχους 100μm. Μπορεί να ανιχνεύσει όλες τις ενέργειες α-σωματιδίων που κυμαίνονται από 1,6MeV έως 4,1MeV. Το χρώμα του καταγραφέα των α-σωματιδίων είναι σκούρο γκρι με ένα λευκό φόντο στον ανιχνευτή CR - 39, ενώ είναι λευκό με κόκκινο φόντο στον ανιχνευτή LR - 115 (Nabil & Abdel, 2013).

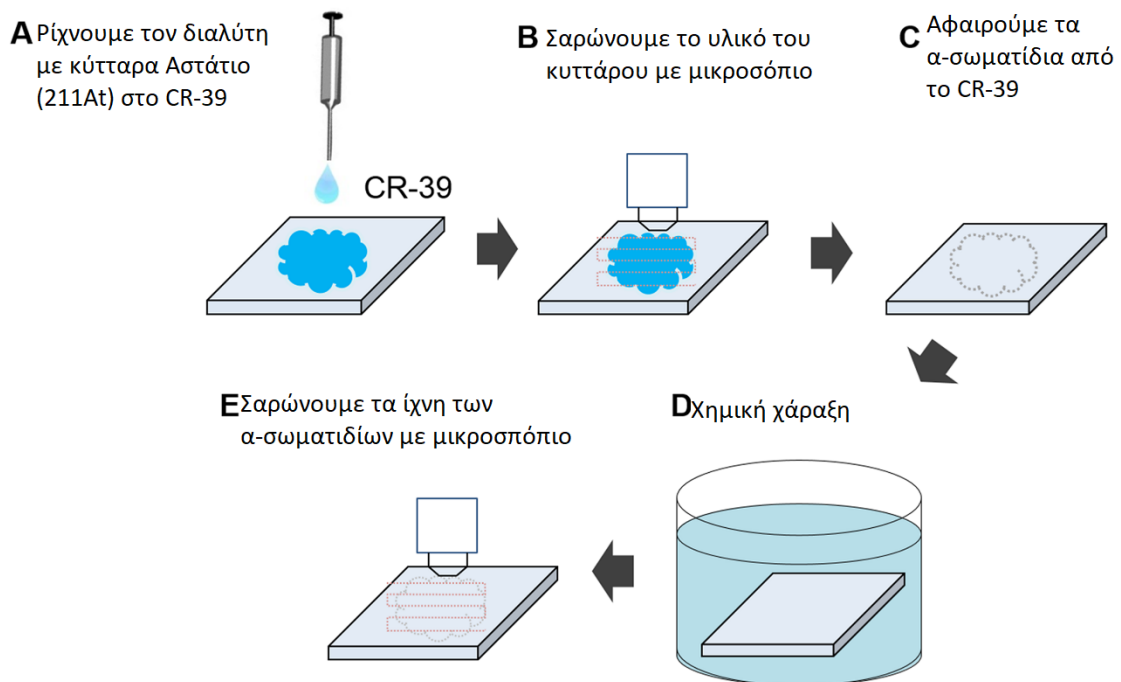


Εικόνα 3. 2: α)Ανιχνευτή ραδονίου Kodalpa, β) ταινία LR-115 και γ) Τχνη α-σωματιδίων πάνω στον LR-115 (Parajuli, 2015).

### **Σύγκριση ανιχνευτών CR-39 και LR-115.**

Ο Dwaikat και οι συνεργάτες του (Dwaikat et al., 2007), μελέτησαν την ευαισθησία δύο ανιχνευτών ραδονίου, του CR-39 και του Kodalpa (LR-115) κατά την διάρκεια μετρήσεων συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Η ευαισθησία, ο σκοπός της μελέτης, το κόστος κ.λπ., αφορούν σε βασικούς παράγοντες για την επιλογή του καταλληλότερου ανιχνευτή.

Ο CR - 39 είναι ανιχνευτής πυρηνικών ιχνών στερεάς κατάστασης (SSNTD's). Η ανθεκτικότητα, η απλότητα και η συγκεκριμένη φύση της απόκρισης τους, οδήγησαν στην εφαρμογή τους ευρέως στη μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου και σε μεγάλη ποικιλία πεδίων. Η τεχνική της καταγραφής ιχνών (track etch) εφαρμόζεται ευρέως στην Ευρώπη για τη μέτρηση του συνολικού επιπέδου του ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Η ευαισθησία του CR - 39 στην ακτινοβολία του ραδονίου εξαρτάται από τη μέθοδο χρήσης (ανοιχτό ή κλειστό), την περίοδο μέτρησης, τη διαδικασία ιχνηλάτησης, τον τύπο φίλτρου, τη βαθμονόμηση κ.λπ. Παρά το γεγονός ότι ο ανιχνευτής CR - 39 μπορεί να ανταποκριθεί στην ακτινοβολία ραδονίου για βραχυπρόθεσμη μέτρηση, θεωρείται ολοκληρωμένος ανιχνευτής, με άλλα λόγια δίνει πιο ακριβείς αποτελέσματα για μακροπρόθεσμη μέτρηση.



Εικόνα 3. 3 Πειραματική διαδικασία CR-39 (Kodaira, 2017).

Ο LR-115 αποτελεί ένα μικρό μαύρο κουτί διαστάσεων 4x7,5x0,5cm. Το ευαίσθητο στο ραδόνιο τμήμα του, που είναι και το πραγματικό δοσίμετρο, είναι μια μικρή ταινία που βρίσκεται στο εσωτερικό τμήμα του καπακιού του δοσιμέτρου. Αφορά σε πυρηνική ταινία τύπου LR - 115, παράγεται από την KODAK και αποτελείται από υπόστρωμα πολυεστέρα πάχους 100mm, επικαλυμμένο με στρώμα πάχους 12mm νιτρικής κυτταρίνης κόκκινου χρώματος. Ο LR - 115 έχει χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις ραδονίου από πολλά εργαστήρια σε όλο τον κόσμο.

Κάποια από τα χαρακτηριστικά του είναι: η ευαισθησία του μόνο στα α-σωματίδια, η ικανότητά του να χρησιμοποιείται σε βραχυπρόθεσμες μετρήσεις [από 10 - 30 ημέρες έκθεσης, μέχρι και τρεις (3) μήνες και ένα (1) έτος], η ανθεκτικότητά του σε περιβαλλοντικές αλλαγές, όπως η υγρασία, το νερό και η θερμοκρασία έως 60 °C.

Για να μελετηθεί, ο τρόπος με τον οποίο και οι δύο τύποι ανιχνευτών ανταποκρίνονται στην ακτινοβολία ραδονίου, παρουσιάζεται ένας νέος όρος, ο χρόνος αποδοτικότητας του ανιχνευτή (Detector time efficiency - DTE). Ο DTE ορίζεται ως, ο λόγος μεταξύ του αριθμού των σωματιδίων που έχουν καταγραφεί από τον ανιχνευτές και του χρόνου έκθεσης. Ένας άλλος ορισμός, είναι η αναλογία μεταξύ της συγκέντρωσης του ραδονίου και του χρόνου έκθεσης του ανιχνευτή.

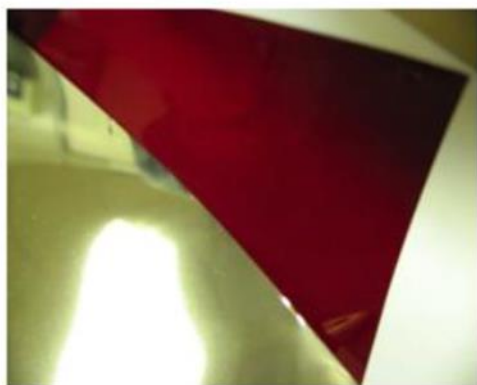
$$(1) \text{DTE} = C/t$$

$$(2) \text{Detector efficiency (\%)} = \text{DTE} \times 1/(\text{source activity}) \times 100\%$$

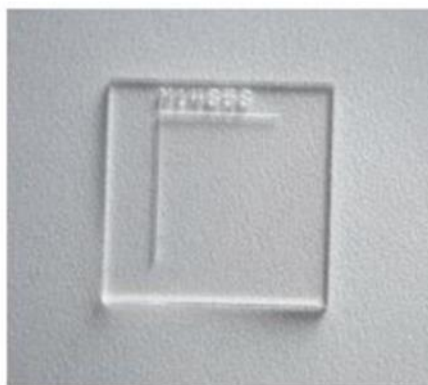


Όπου DTE είναι ο χρόνος αποδοτικότητας του ανιχνευτή (σε Bq/m<sup>3</sup> μονάδα χρόνου), το C είναι η συγκέντρωση ραδονίου (σε Bq/m<sup>3</sup>) και το t είναι ο χρόνος έκθεσης.

Το πείραμα του Dwaikat, διεξήχθη στα ίδια κτήρια ταυτόχρονα με ισάριθμους ανιχνευτές και των δύο τύπων. Συμπεραίνεται ότι, ο DTE του LR-115 είναι μεγαλύτερος από του CR-39. Ο LR-115 συγκριτικά με τον CR-39 είναι πιο ευαίσθητος και πιο αποτελεσματικός στην ακτινοβολία του ραδονίου, πιο εύκολος στη χρήση, πιο ακριβός, η διαδικασία ιχνηλάτησης γίνεται από ένα ειδικό και επικυρωμένο εργαστήριο, ενώ δεν χρειάζεται βαθμονόμηση. Αντίθετα, ο ανιχνευτής CR-39 είναι λιγότερο ευαίσθητος και αποδοτικός στην ακτινοβολία του ραδονίου, χρειάζεται προετοιμασία πριν από την χρήση, είναι φθηνότερος, η διαδικασία ιχνηλάτησης μπορεί να γίνει από οποιοδήποτε εργαστήριο και να βαθμονομηθεί. Η ευαισθησία του CR-39 μπορεί να αυξηθεί με την ενίσχυση του χρόνου έκθεσης του.



LR115



CR-39

*Εικόνα 3. 4: Φίλτρα LR-115 και CR-39 (Parravicini, 2012).*

## **Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια**

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

Παρόλο που οι υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου σχετίζονται με πετρώματα με που περιέχουν υψηλό ποσοστό ουρανίου, ένα μεγάλο ποσοστό ραδονίου επίσης εκλύεται από δευτερογενή ορυκτά τα οποία συναντώνται σε ρηγματωμένα πετρώματα. Οι ρηγματώσεις αυτές, τείνουν να επιτρέπουν το ραδόνιο να διαφεύγει ταχύτερα προς την επιφάνεια. (Gillmore et al., 2000) Τα σπήλαια μπορούν να διαιρεθούν σε περιοχές ανάλογα με τη ραδιενεργότητα στα πετρώματα και το έδαφος.

### **4.1 Μεθοδολογική προσέγγιση**

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

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

Από τα επιστημονικά άρθρα που βρέθηκαν, επεξεργάστηκαν και μελετήθηκαν τα 61 σχετιζόμενα με 381 σπήλαια από 25 χώρες, τα οποία περιείχαν το σύνολο ή ένα σχετικά μεγάλο μέρος των πληροφοριών που αναζητήθηκαν. Τα στοιχεία καταχωρήθηκαν σε αρχεία Excel. Παράδειγμα των αρχείων δίνεται στο παράρτημα I.

A/A	Συγγραφείς-είς	Τίτλος εργασίας	Τίτλος περιοδικού-χρονολογία έκδοσης	Χώρα	Αριθμός σπηλαίων
1	Perez-Lopez R., S. Martin-Velazquez, S. Sanchez-Moral, M. Patyniak, J. Lopez-Gutierrez, S. Cuezva, J. Lario, P.G. Silva, M.A. Rodriguez-Pascua, J.L. Giner-Robles	New insights on speleoseismology: The geothermal gradient and heat flow values in caves for the study of active faults.	Quaternary International 451, 165-175, 2017	Spain	1
2	SAJO-BOHUS L., E.D. GREAVES, J. PALFALVI, F. URBANI, G. MERLO	Radon concentration measurements in Venezuelan caves using SSNTDS.	Radiation Measurements, Vol. 28, Nos I-6, pp. 725-728, 1997	Venezuela	5
3	Nevinsky I., T.Tsvetkova	SSNTDs in the automatic detector of radon	Radiation Measurements 39, 115 – 119, 2005	Russia	1
4	Rafat M. Amin, M. Mansy, M.F. Eissa, H. M. Eissa, F. M. Shahin	Assessment of natural radioactivity and radon exhalation rate in Sannur cave, eastern desert of Egypt	Journal of Radiological Protection 28, 213-222, 2008	Egypt	1
5	Borau J., A.Gonzalez, G. Espinosa, J.I.Golzarri	Measurements of radon levels inside Mexican caves	Nucl. Tracks Radiat. Meas., Vol. 22, Noe 1-4, pp. 287-288, 1993	Mexico	3

Εικόνα 4. 1: Δεδομένα που καταγράφηκαν στο αρχείο του Excel 1.

Όνομα σπηλαίου	Μήκος σπηλαίου	Τουριστικά αξιοποιημένο	Πετρώματα σπηλαίου	Τύπος Μετρήσεων-1	Όργανο	Μέθοδος μέτρησης-1	Συγκεντρώσεις ραδονίου(Bq/m3)		
							Χαμηλότερη	Υψηλότερη	Μέση
Benis fault	/	/	Άνω κρητιδικός ασβεστόλιθος	1 μήνας σε 2 σημεία (150μ και 250μ)	LR-115	Παθητική	7.849	8610	–
Ricardo Zuloaga	500							4.000	
El Indio	120		ασβεστόλιθος				0	3.000	
El Mirador				από 1 έως 6 μήνες	CR-39/LR-115	Παθητική	300	2000	
Hoyo de la Cumbre								4.000	
San Sebastian									
El Guacharo	7.000	2.000					8	13.000	
Azishskaya cave	690	220		1 μήνα	LR-115	Παθητική			1.300
Sanur cave	275μ	ναι		91 ημέρες	CR-39(28)	Παθητική	195	223	
Gruta de Aguacachil							1.020	1.330	1.160
Cueva de las Pozas Azules	1649μ		αβεστόλιθος	3 μήνες/ σε 4 σημεία	CR-39	Παθητική	1.050	1.290	1.145
San Jeronimo							1.330	1.800	1.530

Εικόνα 4. 2: Δεδομένα που καταγράφηκαν στο αρχείο του Excel 2.

## 4.2 Στόχοι των μελετών μέτρησης συγκεντρώσεως ραδονίου.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, συγκεντρώθηκαν και αναλύθηκαν δεδομένα όπως προέκυψαν από επιλεγμένες επιστημονικές μελέτες. Οι βασικοί λόγοι που οδήγησαν στην αναγκαιότητα να πραγματοποιηθούν οι μελέτες αυτές, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### 4.2.1. Η επικινδυνότητα του ραδονίου ως προς την ανθρώπινη υγεία

Ο προσδιορισμός της επικινδυνότητας του ραδονίου εντός των σπηλαίων για τους ανθρώπους που εισέρχονται σε αυτά (επισκέπτες, ξεναγοί, σπηλαιολόγοι κτλ.), είναι ένας από τους κυριότερους σκοπούς των μελετών. Αυτό επιτυγχάνεται με τον εύρεση τις συγκέντρωσης του ραδονίου και τον προσδιορισμό της ενεργής δόσης. Η ενεργή

δόση μπορεί να διαφέρει από εποχή σε εποχή, αλλά και από περιοχή σε περιοχή εντός των σπηλαίων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μελέτη που δημοσίευσε ο Gillmore (2008), με μετρήσεις που πραγματοποίησε για τη συγκέντρωση ραδονίου στο σπήλαιο Alisadr στην επαρχία Hamedan, του Ιράν. Το σπήλαιο φτάνει σε μήκος 11χλμ. και βρίσκεται σε εναλλασσόμενη ζώνη σχιστόλιθου και ασβεστόλιθου με ψαμμίτη, με εκτιμώμενη Ιουρασική προέλευση.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με παθητικούς ανιχνευτές τύπου CR-39, κατά τη διάρκεια της χειμερινής και της ανοιξιάτικης περιόδου (3 μήνες έκαστος). Οι ανιχνευτές τοποθετήθηκαν σε δώδεκα (12) σημεία, με σκοπό να εκτιμηθεί ο κίνδυνος ακτινοβολίας για τουρίστες και ξεναγούς.

Η μέση συγκέντρωση του ραδονίου κατά τη χειμερινή περίοδο ήταν  $1.504,6\text{Bq/m}^3$  και η υψηλότερη τιμή  $2.2680,4\text{ Bq/m}^3$  κατά την άνοιξη. Η μέση απορροφούμενη δόση για τους επισκέπτες/ξεναγούς, εκτιμάται στα  $0,02\text{mSv}$  ανά επίσκεψη και  $4,32\text{mSv}$  ανά σεζόν αντίστοιχα. Η μέση ετήσια απορροφούμενη δόση για το προσωπικό είναι περισσότερο ανησυχητική και φτάνει τα  $16,50\text{mSv}$ . Όλες οι παραπάνω συγκεντρώσεις ραδονίου, υπερβαίνουν το επίπεδο δράσης των  $400\text{Bq/m}^3$  που προτείνεται για χώρους εργασίας στο Ηνωμένο Βασίλειο. Τα υψηλά αυτά επίπεδα ραδονίου, μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές επιδράσεις στην υγεία των ξεναγών, που εργάζονται μέσα στο σπήλαιο για περισσότερο από δέκα (10) ώρες την ημέρα.

Μια διαφορετική προσέγγιση ως προς την έκθεση στο ραδόνιο, έγινε από την Allegrucci G. και τους συνεργάτες της (Allegrucci et al., 2015). Διερευνήσαν δειγματοληπτικά τη συγκέντρωση του ραδονίου σε σπήλαια και τις πιθανές επιδράσεις του, σε γρύλους (*Dolichopoda cave crickets*). Καμία από τις επιτόπιες έρευνες στη παρούσα μελέτη δεν αφορούσε απειλούμενα ή προστατευόμενα είδη.

Γενικότερα, είναι γνωστό ότι η συγκέντρωση ραδονίου ποικίλλει, σε ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα. Τα φυσικά σπήλαια ηφαιστειακής προέλευσης, χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης ραδονίου, λόγω της παρουσίας ουρανίου.

Οι μετρήσεις, πραγματοποιήθηκαν με ανιχνευτές τύπου LR115, οι οποίοι τοποθετήθηκαν στο κέντρο των σπηλαίων, εκτός από το σπήλαιο Pastena.

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της φυσικής ραδιενέργειας για καθένα από τα δέκα (10) μελετημένα σπήλαια. Τα υψηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας παρατηρήθηκαν στα σπήλαια με κωδικό MTR1 και PTV, με

τιμές 25.997Bq/m<sup>3</sup> και 13.200Bq/m<sup>3</sup> αντίστοιχα. Οι τιμές των συγκεντρώσεων ραδονίου σε όλα τα υπόλοιπα σπήλαια (εκτός από το CLP και το PSC), κυμάνθηκαν μεταξύ 982Bq/m<sup>3</sup> και 2.700Bq/m<sup>3</sup>, τα οποία είναι πολύ υψηλότερα από τη χαμηλότερη προτεινόμενη τιμή που έχει καθοριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Μόνο τα σπήλαια με κωδικό CLP και PSC κυμαίνονταν εντός των ορίων συγκέντρωσης ραδονίου.

Πίνακας 4. 1: Τα δείγματα του πληθυσμού *Dolichopoda* (Allegrucci G., 2015)

Species	Code	Locality	Average hourly concentration Bq/m <sup>3</sup> ± SE	Sample size / Reference	GenBank Accession numbers
<i>D. laetitia</i>					
	MTR1	Sulfur mine, Canale Monterano, Roma, Latium. Latitude: 42°6'47"; Longitude: 12°27'47"	25997 ± 520	7 individuals, 17 clones / Present paper	KM598457- KM598475
	MTR2	Cellar, Canale Monterano, Roma, Latium. Latitude: 42°6'47"; Longitude: 12°27'4"	2677 ± 134	12 individuals, 95 clones / Present paper	KM598476- KM598570
	PSC	Poscola cave, Priabona, Vicenza, Veneto. Latitude: 45°39'02"; Longitude: 11°21'42"	200	4 individuals, 4 clones / (23, 29)	GU322289-GU322292
<i>D. geniculata</i>					
	PRA	Praie Cave, Lettomanoppello, Pescara, Abruzzo. Latitude: 42°14'22"; Longitude: 14°3'18"	982	5 individuals, 5 clones / (23, 28)	GU322284-GU322286
	PTV	Pertuso di Trevi Cave, Filettino, Frosinone, Latium. Latitude: 41°87.11'81.03"; Longitude: 13°28.22'84.43"	13200	10 individuals, 32 clones / (28)	KP399737-KP399768
	TUS	Tuscolo Cave, Roman Aqueduct, Frascati, Latium. Latitude: 41°47'57.37"; Longitude: 12°41'47.25"	1906 ± 76	7 individuals, 11 clones / (23 and Present paper)	GU322316-GU322319KM598585-KM598591
	ACP	Fiume Coperto Cave, Semoneta, Latina, Latium. Latitude: 41°51.74'49.56"; Longitude: 12°99.38'41.14"	1305 ± 91	3 individuals, 7 clones / Present paper	KM598447- KM598453
	AUS	Ausi Cave, Prossedi, Latina, Latium. Latitude: 41°50.99'20.72"; Longitude: 13°27.41'24.99"	1047±379	5 individuals, 5 clones / (23, 28)	GU322149- GU322153
	CLP	Regina Margherita Cave, Collepardo, Frosinone, Latium. Latitude: 41°75.91'53.45", Longitude: 13°36.71'19.97"	221 ± 35	6 individuals, 8 clones / (23 and Present paper)	GU322194-GU322199KM598454-KM598456
	PAS	Pastena Cave, Pastena, Frosinone, Latium. Latitude: 41°49.76'23.9"; Longitude: 13°49.10'18.89"13.4910188941,4976239	2385 ± 119	10 individuals, 19 clones / (23 and Present paper)	GU322261-GU322265KM598571-KM598584

Radon radioactivity measurements (Bq/m<sup>3</sup>) and GenBank Accession numbers are also reported.

doi:10.1371/journal.pone.0122456.t001

Η πιθανή βιολογική απόκριση στην περιβαλλοντική ραδιενέργεια, διερευνήθηκε λαμβάνοντας υπόψη μια συγκεκριμένη κατηγορία πυρηνικού DNA, το satDNA, αλλά και δύο γενετικά στενά συγγενικά είδη. Ωστόσο, παρουσιάστηκαν σημαντικοί συσχετισμοί μεταξύ ορισμένων εκτιμήσεων πολυμορφισμού και συγκεντρώσεις ραδονίου στα σπήλαια, ανεξάρτητα από το βαθμό μεταβλητότητας που εκφράζει το καθένα. Από περαιτέρω αναλύσεις προέκυψε ότι, ο πολυμορφισμός συσχετίζεται σημαντικά με το ραδόνιο, καθώς παρουσιάστηκε μια στατιστικά σημαντική αλλοίωση του DNA, ειδικά στα εγκεφαλικά κύτταρα. Συμπερασματικά από την μελέτη των δεδομένων προέκυψε ότι, η αυξημένη ετερογένεια στα επίπεδα satDNA των δειγμάτων, μπορεί να εξηγηθεί ως αποτέλεσμα της πίεσης μετάλλαξης που προκαλείται από την αυξημένη συγκέντρωση ραδονίου στα σπήλαια.

#### 4.2.2. Επίδραση παραμέτρων στην συγκέντρωση ραδονίου εντός των σπηλαίων

Ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς του ραδονίου εντός των σπηλαίων, αφορά σε ακόμα ένα παράγοντα μελέτης, όπως προέκυψε από τις μελέτες που αναλύθηκαν. Η συγκέντρωση του ραδονίου δεν είναι σταθερή εντός των σπηλαίων, καθώς επηρεάζεται από παράγοντες κλιματολογικών συνθηκών, αλλά και παράμετρους του φυσικού περιβάλλοντος.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μελέτη του Lenart και των συνεργατών του (1989), οι οποίοι χαρτογράφησαν τη συγκέντρωση ραδονίου σε 5 διαφορετικά σπήλαια της Ουγγαρίας. Οι μετρήσεις ραδονίου στον αέρα, στο έδαφος, σε ροές και στάσιμα νερά, πραγματοποιήθηκαν με παθητικούς ανιχνευτές τύπου LR-115 και MAND/alpha, οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε 37 διαφορετικά σημεία. Σημαντική είναι η χρήση μοτίβων της δραστηριότητας ραδονίου, για την ανίχνευση ρευμάτων του αέρα εντός του σπηλαίου, την κύρια κατεύθυνση στις διαδικασίες μεταφοράς ραδονίου, τη σύγκριση της συγκέντρωσης ραδονίου σε διαφορετικές ουσίες και τη μελέτη των εποχιακών και μακροπρόθεσμων διακυμάνσεων του ραδονίου.

Οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων ραδονίου που μετρήθηκαν, διατυπώνονται στον παρακάτω πίνακα 4.2

Πίνακας 4. 2: Μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου σπηλαίων της Ουγγαρίας (Lenart, 1989).

Σπήλαια	Μέση συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m <sup>3</sup> )
<i>Istvanlapa</i>	700
<i>Miskolctapolcavitavas</i>	500
<i>Letras-Vizes</i>	2.200
<i>Szepessy</i>	800

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, βρέθηκαν σαφείς εξαναγκασμένες εποχιακές διακυμάνσεις από τον εξαερισμό, που επηρεάστηκαν επίσης από την παρουσία νερού. Ειδικότερα, στο σπήλαιο Letras-Vizes αποδείχθηκε ότι, η ίδια η εισροή νερού ήταν η πιο σημαντική πηγή ραδονίου.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι μία από τις κύριες πηγές εκπονοής του ραδονίου είναι το περιβάλλον πέτρωμα. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου στον αέρα σχηματίζονται σύμφωνα με κινήσεις ρευστού, οι οποίες ήταν επίσης ανιχνεύσιμες στην πλειονότητα

των μελετών. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ότι το χειμώνα, όταν εισέρχεται αέρας από την κεντρική είσοδο, μειώνεται η συγκέντρωση του ραδονίου, ενώ το καλοκαίρι που εισέρχεται αέρας μέσα από μικρότερες ρωγμές, αυξάνεται η συγκέντρωση του ραδονίου.

Οι Oufni & Misdaq (2001), πραγματοποίησαν μετρήσεις επιπέδων ραδονίου σε διαφορετικά σημεία ενός τεταρτοταγούς σπηλαίου, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή Errachidia (High - Atlas), στο Μαρόκο. Για τις μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί ανιχνευτές πυρηνικής τροχιάς στερεάς κατάστασης (SSNTD), ο CR-39 και ο LR-115, που τοποθετήθηκαν εντός του σπηλαίου κατά τη διάρκεια ενός (1) μήνα. Επίσης, για τον προσδιορισμό της δραστηριότητας ραδονίου και του περιεχομένου ουρανίου, χρησιμοποιήθηκαν δείγματα σταλαγμίτη και σταλακτίτη που συλλέχθηκαν από το σπήλαιο.

*Πίνακας 4. 3: Δεδομένα που ελήφθησαν για τη δραστηριότητα του ραδονίου σε διαφορετικές θέσεις εντός του σπηλαίου (Oufni, 2001).*

Θέση	$A_c(^{222}\text{Rn}) \text{ (Bq/m}^3\text{)}$
<i>L1</i>	$73.754 \pm 1.945$
<i>L2</i>	$102.554 \pm 2.927$
<i>L3</i>	$167.495 \pm 4.851$
<i>L4</i>	$278.790 \pm 8.266$
<i>L5</i>	$362.420 \pm 9.978$

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, συμπεραίνεται ότι, η συγκέντρωση ραδονίου αυξάνεται όσο βαθύτερο είναι το σημείο μέτρησης. Τα αποτελέσματα αυτά επηρεάζονται και από τον αερισμό του σπηλαίου, καθώς σε αυτά με μεγάλες εισόδους παρουσιάζεται έντονος αερισμός και τα επίπεδα ραδονίου είναι της τάξης των  $100\text{Bq/m}^3$ . Αντίθετα, σε μεγαλύτερο βάθος, ο αερισμός μειώνεται και η συγκέντρωση ραδονίου αυξάνεται. Αντιστοίχως, τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν και τα σημεία στα οποία ο άνθρωπος εκτίθεται σε υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου.

#### 4.2.3. Σύγκριση και ανάπτυξη μεθόδων

Σε αυτή την κατηγορία συγκαταλέγονται μελέτες, οι οποίες ως κύριο στόχο έχουν τη σύγκριση πειραματικών δεδομένων μεταξύ διάφορων τύπων ανιχνευτών ραδονίου. Σκοπός αυτής της σύγκρισης είναι η κατανόηση της αποτελεσματικότητας της κάθε

μεθόδου ανάλογα με το περιβάλλον και τις συνθήκες, καθώς και η περαιτέρω βελτιστοποίησή τους.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της σύγκρισης είναι η μελέτη που δημοσίευσε ο Kavasi N. και οι συνεργάτες του (Kavasi et al., 2013), οι οποίοι πραγματοποίησαν μετρήσεις της συγκέντρωσής του ραδονίου σε διάφορους υπόγειους χώρους εργασίας. Ένας από αυτούς είναι το σπήλαιο Tapolca της Ουγγαρίας, το οποίο είναι τουριστικά αξιοποιημένο. Το σπήλαιο φτάνει σε μήκος τα 5χλμ., από τα οποία τα 3χλμ. είναι προσβάσιμα μόνο με βάρκα, ενώ χαρακτηρίζεται από ασβεστολιθικά πετρώματα.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ανιχνευτές τύπου CR-39, 2 διαφορετικών φίλτρων: 1) φίλτρο κυτταρίνης (CF) και 2) φίλτρο σφουγγαριών (SF). Τοποθετήθηκαν στο σπήλαιο κατά τη διάρκεια ενός (1) έτους. Το ετήσιο ποσοστό της συγκέντρωσης ραδονίου στο σπήλαιο είναι  $6.239\text{Bq/m}^3$  για μετρήσεις που έγιναν με φίλτρα κυτταρίνης και  $8.512\text{Bq/m}^3$  για μετρήσεις με φίλτρα σφουγγαριών.

Από τα δεδομένα της έρευνας, διαπιστώθηκε μια συστηματική διαφορά μεταξύ των δεδομένων ραδονίου που μετρήθηκαν από το φίλτρο κυτταρίνης, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως και τη βελτιωμένη έκδοση του, το φίλτρο σφουγγαριών. Ο ακριβής λόγος γι' αυτό το φαινόμενο δεν έχει αποσαφηνιστεί ακόμα, αλλά παράμετροι όπως η υψηλή υγρασία, η υψηλή συγκέντρωση αερολυμάτων και η ισχυρή ταχύτητα του αέρα, ενδέχεται να έχουν κάποια επίδραση στην απόκριση ανίχνευσης. Παρά τις παραπάνω υψηλές τιμές, η περιεκτικότητα ραδονίου στον αέρα του σπηλαίου είναι πολύ χαμηλή για να επηρεάσει τους επισκέπτες.

#### **4.2.4. Διάφορες συσχετίσεις**

Ο σκοπός αυτών των εργασιών, είναι η συσχέτιση του ραδονίου με φυσικά φαινόμενα όπως σεισμοί, ρήγματα και υπόγειες μολύνσεις. Στις 27 Μαΐου 2008, ένας ισχυρός σεισμός μεγέθους 5.3 ρίχτερ, χτύπησε την επαρχία Ζανγιάν (Ιράν). Η συγκέντρωση ραδονίου μετρήθηκε και καταγράφηκε τη στιγμή του σεισμού στις 10:48 τοπική ώρα εντός του σπηλαίου Katalakhor, που βρίσκεται στα προάστια της πόλης Ζανγιάν. Μετά από αυτό το συμβάν, προγραμματίστηκε το ίδιο έτος (2008) μέτρηση και ανάλυση της συγκέντρωσης ραδονίου, αλλά και 10 χρόνια μετά τον σεισμό (2018), με χρήση παθητικών ανιχνευτών. Οι πραγματικές χρονικές παρατηρήσεις δείχνουν τη



στιγμή που συνέβη ο σεισμός, μια αύξηση της συγκέντρωσης ραδονίου, έως και πέντε φορές μεγαλύτερη, σε σχέση με την κανονική του κατάσταση.

*Πίνακας 4. 4: Μετρήσεις ραδονίου στο σπήλαιο Katalekhor κατά την διάρκεια του σεισμού καθώς και ένα και δέκα χρόνια αργότερα. (Taheri, 2020).*

Σταθμός	Ενεργή μέτρηση Μάιο 27, 2008 (Σεισμός)	Παθητική μέτρηση (Bq/m3)	
		Μάιο	
		2009	2018
1	2950	1244	1259
2	5760	2222	2298
3	9123	3091	3154
4	14,125	4953	5009
5	19,856	5487	5510
6	27,769	7400	7492
7	31,635	8302	8398
8	33,867	8342	8392
9	36,529	8600	8671
10	38,264	8531	8612
11	39,92	8653	8721
12	39,543	7991	8006
13	17,658	5450	5452
14	12,686	3255	3225
15	7261	2666	2692

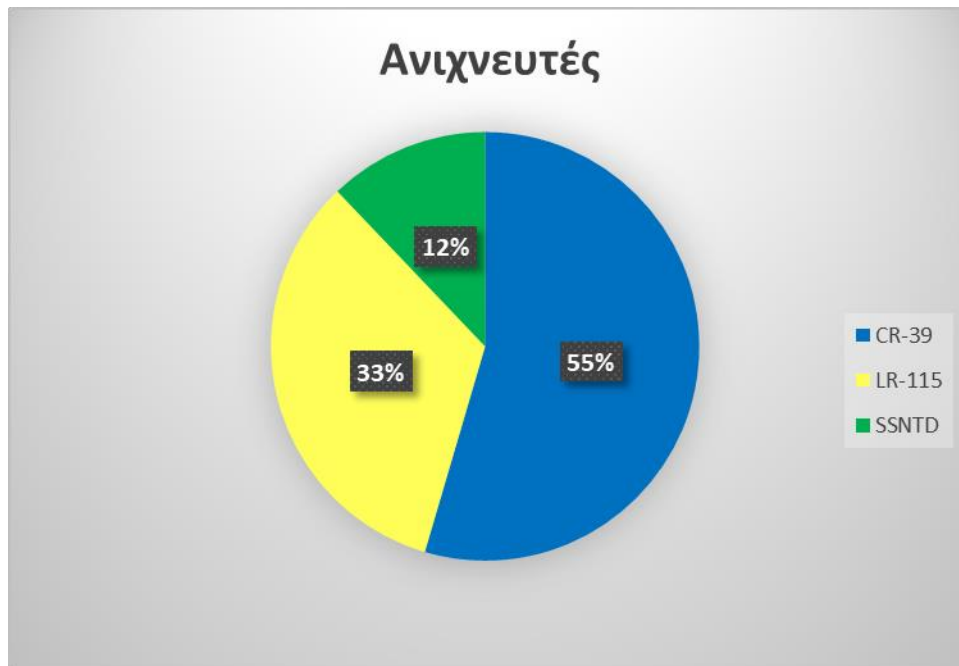
### 4.3 Αποτελέσματα

Συγκρίνοντας 61 διαφορετικές μελέτες για την καταγραφή του ραδονίου σε 383 σπήλαια με ανιχνευτές τύπου SSNT που αναφέρθηκαν παραπάνω. Όπως προκύπτει οι ανιχνευτές τύπου CR-39 είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη ανιχνευτές παγκοσμίως αγγίζοντας το ποσοστό των 55%. Με διαφορά ακολουθούν οι ανιχνευτές τύπου LR-115 με ποσοστό 33% και τέλος έχουμε ένα ποσοστό των 12% οι οποίοι είναι διάφοροι άλλοι ανιχνευτές SSNT.(Πίν.4.5)(Διαγ.4.1.)

*Πίνακας 4. 5: Ανιχνευτές ραδονίου σε 61 διαφορετικές μελέτες διεθνώς.*

Τύπος ανιχνευτή	Αριθμός	Ποσοστό(%)
CR-39	36	55
LR-115	22	33
SSNTD	8	12

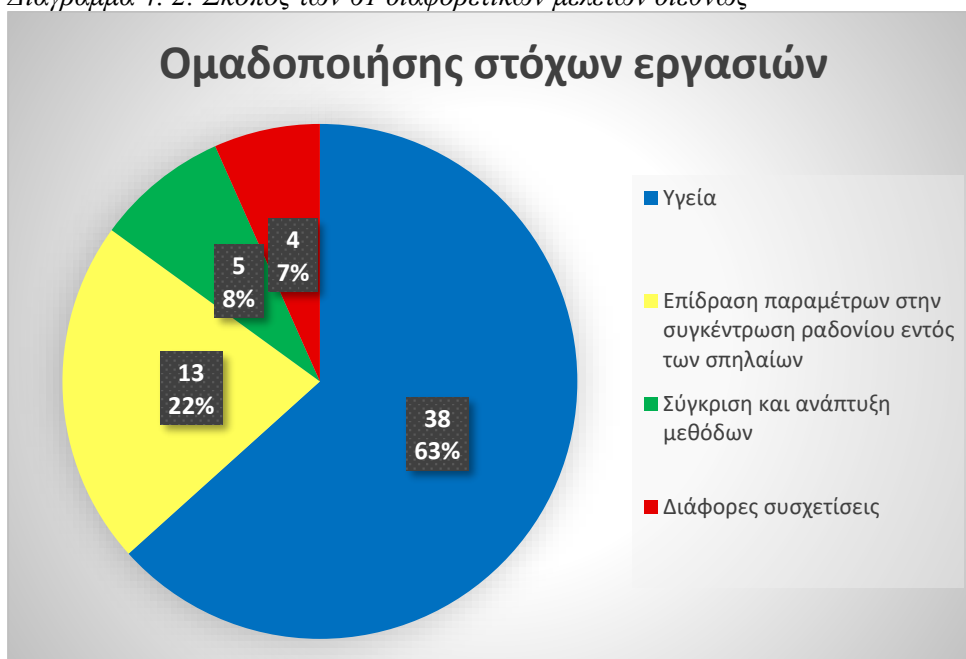
*Διάγραμμα 4. 1: Ανιχνευτές ραδονίου σε 61 διαφορετικές μελέτες διεθνώς*



Πίνακας 4. 6: Σκοπός των 61 διαφορετικών μελετών διεθνώς

Σκοπός	Αριθμός
Υγεία	38
Επίδραση παραμέτρων στην συγκέντρωση ραδονίου εντός των σπηλαίων	13
Σύγκριση και ανάπτυξη μεθόδων	5
Διάφορες συσχετίσεις	4

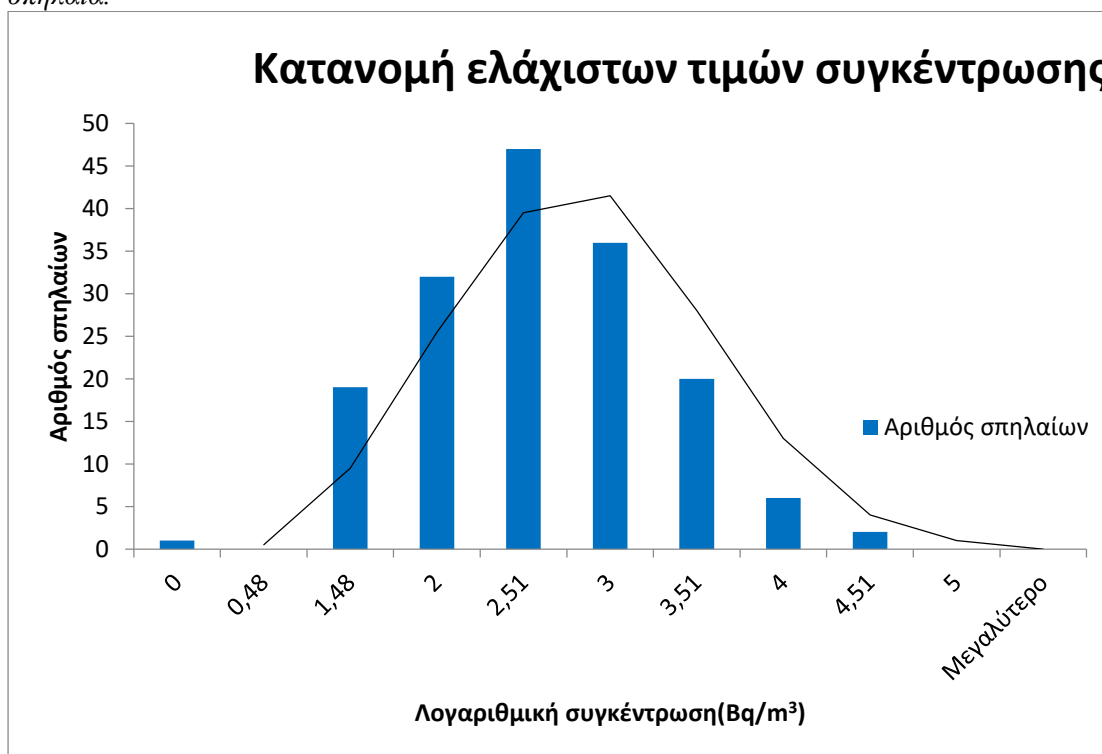
Διάγραμμα 4. 2: Σκοπός των 61 διαφορετικών μελετών διεθνώς



Πίνακας 4. 7: Πίνακας ελαχίστων τιμών των σπηλαίων.

Bq/m <sup>3</sup>	Λογαριθμική συγκέντρωση	Αριθμός σπηλαίων
0-1	0	1
1-3	0,48	0
3-30	1,48	19
30-100	2	32
100-320	2,51	47
320-1000	3	36
1000-3000	3,51	20
3000-10000	4	6
10000-100000	4,51	2
100000>	5	0
	Μεγαλύτερο	0

Διάγραμμα 4. 3: Διάγραμμα κατανομής ελαχίστων τιμών της συγκέντρωσης ραδονίου στα σπηλαία.

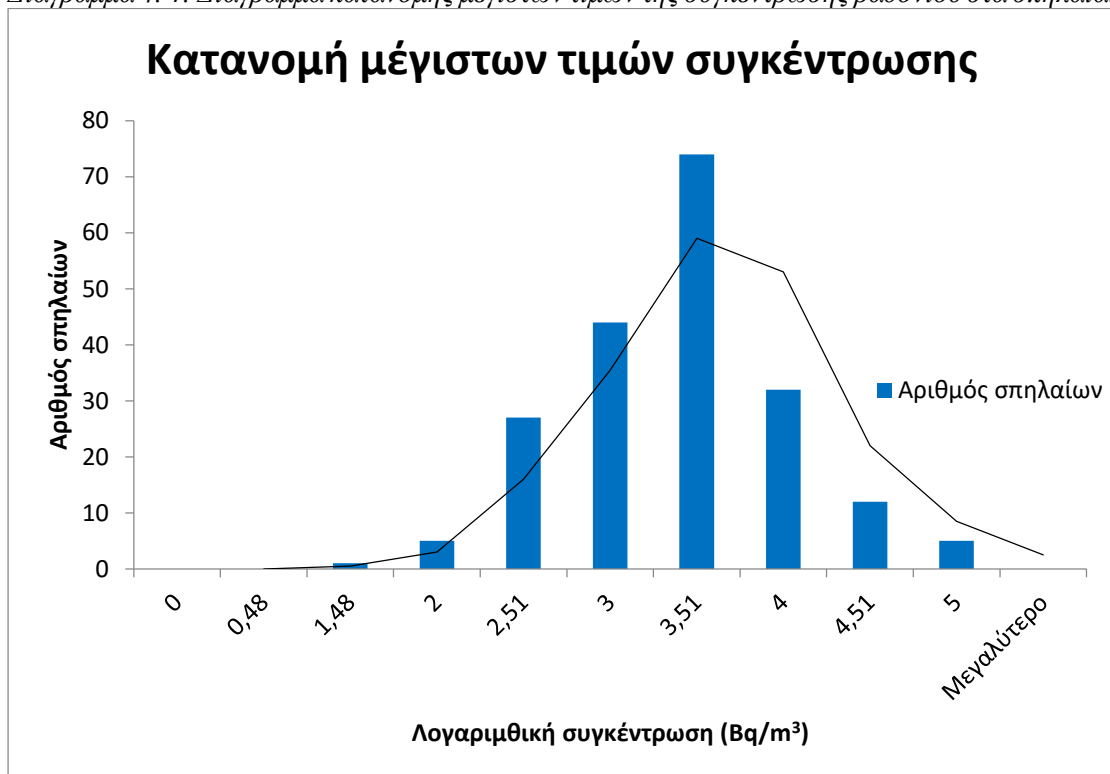


Πίνακας 4. 8: Πίνακας μέγιστων τιμών των σπηλαίων.

Bq/m <sup>3</sup>	Λογαριθμική συγκέντρωση	Αριθμός σπηλαίων
0-1	0	0

1-3	0,48	0
3-30	1,48	1
30-100	2	5
100-320	2,51	27
320-1000	3	44
1000-3000	3,51	74
3000-10000	4	32
10000-100000	4,51	12
100000>	5	5
	Μεγαλύτερο	0

Διάγραμμα 4. 4: Διάγραμμα κατανομής μέγιστων τιμών της συγκέντρωσης ραδονίου στα σπηλαία.



## Κεφάλαιο 5: Συζήτηση και συμπεράσματα

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές μέθοδοι για την ανίχνευση της συγκέντρωσης ραδονίου. Μεταξύ αυτών οι ανιχνευτές (SSNTD) επιλέγονται κυρίως λόγω της υψηλής απόδοσης τους στην ανίχνευση των σωματιδίων άλφα. Με την πάροδο των δεκαετιών έχει συσσωρευτεί μια μεγάλη εμπειρία ως προς τον τρόπο ανίχνευσης, καταμέτρησης, διόρθωσης και τελικά επεξεργασίας των μετρήσεων που σχετίζονται με την ιοντίζουσα ακτινοβολία.

Πέραν των ανωτέρω οι μετρητές SSNTD, έχουν ως πλεονεκτήματα το χαμηλό κόστος, τις ακριβείς μετρήσεις και τη μη χρήση προτύπων για τη βαθμονόμησή της.

Η μέτρηση του ραδονίου με ανιχνευτές που χρειάζονται ηλεκτρικό ρεύμα για τη λειτουργία τους, μπορεί να είναι δύσκολη και δαπανηρή. Λόγω των χαμηλών επιπέδων εκπομπής ραδονίου από ένα υλικό, οι μακροπρόθεσμες μετρήσεις είναι απαραίτητες και πολύ λίγες μπορούν να γίνουν σε λογικό χρόνο.

Για τους ανωτέρω λόγους η παθητική μεθοδολογία χρήσης ανιχνευτών πυρηνικής ανίχνευσης στερεάς κατάστασης (SSNTD) είναι κατά πάσα πιθανότητα οι λόγοι που έχουν καταστήσει αυτήν την μεθοδολογία την πιο διαδεδομένη όσον αφορά μακροχρόνιες μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου και την έχουν καταστήσει επίσης ένα πολύ καλό «εργαλείο» αξιολόγηση των δόσεων ακτινοβολίας που προσλαμβάνουν οι άνθρωποι.

### Ανιχνευτές πυρηνικής ανίχνευσης στερεάς κατάστασης (SSNTD)

- Χαμηλό κόστος
- Ακριβείς μετρήσεις
- Μη χρήση προτύπων για τη βαθμονόμησή
- Μη χρήση ηλεκτρικού ρεύματος
- Εμπειρία δεκαετιών



## Βιβλιογραφία

### Ελληνική

Νικολόπουλος Δ., Κόττου Σ. και Γιαννακόπουλος Π. (2015). *Ακτινοβολίες περιβάλλοντος και άνθρωπος.*, Σ.Ε.Α.Β.

Τομέ Δ., (2018). Συγκριτική Αξιολόγηση και Αξιοποίηση Μεθοδολογιών Μέτρησης Συγκέντρωσης Ραδονίου σε Σπήλαια

### Διεθνής

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

Alberigi S., Pecequilo B. R. S., Lobo H. A. S. and Campos M. P. (2011). Assessment of effective doses from radon levels for tour guides at several galleries of Santana cave, southern Brazil, with CR-39 detectors: Preliminary results, Radiation Protection Dosimetry, pp. 1–4.

Allegrucci G., Sbordoni V. and Cesaroni D., (2015). Is Radon emission in caves causing deletions in satellite DNA sequences of cave-dwelling crickets, Journal pone

Al-Mustafa H, Al-Jarallah M.I., Rehman F. and Abu-Jara dF. (2005). Radon concentration measurements in the desert caves of Saudi Arabia, Radiation Measurements, Vol. 40, pp. 707-710.

Alvarez-Gallego M., Garcia-Anton E., Fernandez-Cortes A.,Cuezva S. and Sanchez-Moral S., (2015). High radon levels in subterranean environments: monitoring and technical criteria to ensure human safety (case of Castañar cave, Spain), Journal of Environmental Radioactivity, Vol.145, pp. 19-29.

Amin R.M., Mansy M., Eissa M.F., Eissa H.M. and Shatin F. M. (2008). Assessment of natural radioactivity and radon exhalation rate in Sannur cave, eastern desert of Egypt, Journal of Radiological Protection, Vol. 28, pp. 213-222.

Bahtijari M., Vaupotic J., Gregoric A., Stegnar P. and Kobal I. (2008). Exposure to radon in the Gadime Cave, Kosovo, Journal of Environmental Radioactivity,

Vol. 99, pp. 343-348.

Borau J., Gonzalez A., Espinosa G. and Golzarri J.I. (1993). Measurements of radon levels inside Mexican caves, *Nucl. Tracks Radiat. Meas*, Vol. 22, No. 1-4, pp. 287-288.

Bruzzone D., Bussallino M., Castello G., Maggiolo S. and Rossi D. (2006). Measurement of the concentration of radon gas in the Toirano's caves (Liguria), *Annali di Chimica*, Vol. 96

Burghel B. D., Cucos A., Papp B., Dicu T., Pressyanov D., Dimitrov D., Dimitrova I. and Constantin S. (2017). Comparative study of radon and thoron measurements in four Romanian show caves, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 177, No. 1-2, pp. 181-185.

Cigna A.A., Forti P. (2013). Caves: The most important geotouristic feature in the world, *Tourism and Karst Areas*, Campinas: SBE, Vol. 6.

Cigna A.A., (2005). Radon in Caves, *International Journal of Speleology*, *International Journal of Speleology*, Vol. 34, No. 1-2, pp. 1-8

Dewang S., Akmal A. S. and Abdullah Sarbaini B. (2017). Measurement of radiation distribution for radon (Rn) and thoron (Th) concentrations in Heritage Gua Batu and Gua Mimp of Maros regency, south Sulawesi, *AIP Conference Proceedings*, Vol.1801.

Dr. Hakl J. (2007). Application of radon-222, as a natural tracer in environmental studies. Debrecen: Lajos Kossuth University.

Duffy J.T., Madden J.S., Mackin G.M. and McGarty A.T. (1996). A Reconnaissance survey of radon in show caves in Ireland, *Environment International*, Vol. 22.1, pp.415-423.

Dumitru O. A., Onac B. P., Fornós J. J., Cosma C., Ginés A., Ginés J. and Merino A. (2015). Radon survey in caves from Mallorca Island, Spain, *Science of the Total Environment*, Vol.526, pp.196-203.



- Dumitru O.A., Onac B.P. and Cosma C. (2016). Radon levels in caves from San Salvador, the Bahamas, *Carbonates Evaporites*, Vol. 31, pp. 153-161.
- Dwaikat N., Safarini G., El-hasan M. and Iida T. (2007). CR-39 detector compared with Kodalpha film type (LR115) in terms of radon concentration, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, No. A, Vol. 574, pp. 289-291.
- Espinosa G., Golzarri J. I., Vega-Orihuela E. and Morales-Malacara J. B. (2013). Indoor radon concentration levels in Mexican caves, using nuclear track methodology, and the relationship with living habits of the bats, *Journal Radioanal Nucl Chem*, Vol. 296, pp. 43-48.
- Espinosa G., Golzarri J.I. , Gammage R.B. and Sajo-Bohus L. (2008). Seasonal variation measurements of radon levels in caves using SSNTD method, *Radiation Measurements*, Vol. 43, pp. 364-368.
- Espinosa G., J. I. Golzarri, Gammage R.B., Sajo-Bohus L., Viccon-Pale J. and Signoret-Poillon M. (2008). Seasonal variation measurements of radon levels in caves using SSNTD method, *Radiation Measurements*, Vol. 43, pp. 364-368.
- Geczy G., Hunyadi I. and Hakl J. (1993). Long term radion studies and transport processes in the Budapest thermal karst region, *Bulletin de la Société géographique de Liège*, Vol. 29, pp. 45-48.
- Gillmore G.K., Phillips P.S., Denman A.R. and Gilbertson D.D. (2002). Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 62, pp. 165-179.
- Gomaa M.A., Hafez A.F. and Hussein A.S. (2006). Quality Assurance for Environmental Radon Measurements by LR115 Nuclear Track Detectors, VIII Radiation Physics & Protection Conference, Beni Sueif - Fayoum, Egypt, pp. 13-15.
- Haner B., Yilmaz A., Kürkcüoglu M. E. and Karadem A. (2010). Radon level measurments in Mencilis (Bulak) cave, *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Vol. 14.3, pp. 218-224.

- Hyland R. and Gunn J. (1994). International comparison of cave radon concentrations identifying the potential alpha radiation risks to British cave users, *Health Phys.* Vol. 67, No. 2, pp. 176-179.
- Jabarivasal N. and Gillmore G. (2008). The study of radon levels and absorbed dose in the staff and visitors of Alisadr Cave, *Int. J. Low Radiation* Vol. 5, No. 2
- Kávási N., Vigh T., Németh C., Ishikawa T., Omori Y., Janik M. and Yonehara H., (2014). Invited Article: In situ comparison of passive radon-thoron discriminative monitors at subsurface workplaces in Hungary, *Review Scientific Instruments*, Vol. 85.
- Kodaira S., Li H.K., Konishi T., Kitamura H., Kurano M. and Hasegawa S. (2017). Validating  $\alpha$ -particle emission from  $^{211}\text{At}$  labeled antibodies in single cells for cancer radioimmunotherapy using CR-39 plastic nuclear track detectors, *PLOS ONE*, pp. 1-13.
- Lee N.M., Meisinger D.B., Aubrecht R., Kovacik L., Saiz-Jimenez C., Baskar S., Baskar R., Liebl W., Porter M.L. and Engel A.S. (2012). Caves and Karst Environments.» Bell, Eleanor M. *Life at Extremes: Environments, Organisms and Strategies for Survival*. Dunbeg: CAB International, pp. 320-343.
- Lenart L., Somogi G., Hakl J., Hunyadi I., Lenart L., Somogi G., Hakl J. and Hunyadi I. (1989). Hungarian Academy of Sciences. Debrecen: Hungarian Academy of Sciences.
- Lyons R.G., Solomon S.B., Langroo R. and Peggie J.R. (1998). Radon in new zealand tourist caves, *Vol.30, No. 49*, pp. 243-251.
- Martin Sanchez A., Perez J. T., Ruano Sanchez A. B. and Naranjo Correa F. L. (2015) Measuring radon concentrations and estimating dose in tourist caves, *Radiation Protection Dosimetry*, No. 1–3, Vol. 167, pp.279-283.
- Martono M., Wahyudi, Bualkar A. and Syamsir D. (2016). Penentuan konsentrasi radon( $^{222}\text{Rn}$ ) dan thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) menggunakan detektor jejak nuklir CR-39 Di Gua Londa dan Ke'te'Kesu, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu

Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin, Vol. 9, No. 2, pp. 250-256.

Miles J. (2001). Methods of radon measurment and devices, National Radiological Protection Board, Chilton, Didcot, Oxfordshire, OX11 0RQ, UK

Misaq M.A. and Ouguidi J. (2008). Radon, thoron and their decay products in natural caves with nuclear track detectors, Radiation Protection Dosimetry Vol. 130, No. 1, pp. 110-114.

Nabil M. H. and Abdel Fattah H. (2013). Studying the Physical Parameters of a Solid State Nuclear Track Detector, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 63, No. 9, pp. 1713-1719.

Neda T., Szakacs A., Cosma C. and Mocsy I. (2008). Radon concentration measurements in mofettes from Harghita and Covasna Counties, Romania, Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 99, pp. 1819-1824.

Nevinsky I. and Tsvetkova T. (2005). SSNTDs in the automatic detector of radon.» Radiation Measurements, Vol. 39, pp. 115-119.

Oufni L. and Misdaq M.A. (2001). Radon emanation in a limestone cave using CR-39 and.» Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 250, No. 2, pp. 309-313.

Özen S. A., Cevik U. and Taskin H. (2018). Comparison of active and passive radon survey in cave atmosphere, and estimation of the radon exposed dose equivalents and gamma absorbed dose rates, Isotopes in Environmental and Health Studies

Paar D., Buzjak N., Baksic D. and Radolic V. (2013). Physical research in Croatia's deepest cave system: Lukina Jama-Trojama, MT.Velebit. ICS Proceedings Vol. 2.

Papachristodoulou C. A., Ioannides K. G., Stamoulis K. C., Patiris D. L. and Pavlides S. B. (2004). Radon activity levels and effective doses in the perama cave, Greece, Health Phys., Vol. 86, No. 6, pp. 619-624.

- Papastefanou C., Manolopoulou M., Stoulos S., Ioannidou A. and Gerasopoulos E. (2005). Elevated radon concentrations in a Pleistocenic cave operating as a show cave, International Congress Series, Vol. 1276, pp. 204-205.
- Parajuli P., Thapa D. and Shah B.R. (2015). Study of Radon Exhalation Rate in Soil Samples of Kathmandu Valley Using Passive Detector LR115, International Journal of Chemical and Physical Sciences, Vol. 4, No. 4, pp. 30-39.
- Perez-L opez R., Martín-Velazquez S., Sanchez-Moral S., Patyniak M., Lopez-Gutierrez J., Cuezva S., Lario J., Silva P.G., Rodríguez-Pascua M.A. and Giner-Robles J.L. (2017). New insights on speleoseismology: The geothermal gradient and heat flow values in caves for the study of active faults, Quaternary International, Vol. 451, pp. 165-175.
- Poncela L.Q., Navarro P.F., Fernandez C.S., Arozamena J.G. and Perez M.B. (2004) Radon exposure in uranium mining industry VS. exposure in tourist caves, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 111, No. 1, pp. 41-44.
- Przylibski A.T. (1999). Radon concentration changes in the air of two caves in Poland, Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 45, pp. 81-94.
- Radolic V., Miklavcic I., Poje M., Denis S. and Branko V. (2012). Radon levels in Manita Pec cave (Croatian NP Paklenica) and assessment of effective dose received by visitors and tourist guides, IRPA Vol. 10, No. 56, pp. 1-10.
- Radolic V., Miklavcic I., Poje M., Denis S. and Branko V. (2009). Radon concentraton in Durovica cave (Cilipo Croatia), Radon in Environment, pp.10-14
- Rovenska K. and Thinova L. (2010). Seasonal variation of radon in the Bozkov cave, NUKLEONIKA Vol.55, No. 4, pp.483-489.
- Sainz C., Quindos L. S., Fuente I., Nicolas J. and Quindos L. (2007). Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: The case of tourist caves, Journal of Hazardous Materials, Vol. 145, pp. 368-371.
- Sajo-Bohus L., Greaves E.D., Palfalvi J., Urbani F. and Merlo G. (1997). Radon concentration measurments in venezuelan caves using SSNTDS, Radiation

Measurements, Vol. 28, No.1-6, pp. 725-728.

Sajo-Bohus L., Palfalvi J., Urbani F., Castro D., Greaves E.D. and Liendo J.A. (1999). Environmental gamma and radon dosimetry in Venezuela, Radiation Measurements, Vol. 31, pp. 283-286.

Sánchez A. M., Pérez J. T., Sánchez A.B. R. and Naranjo Correa F.L. (2012). Radon in workplaces in Extremadura (Spain), Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 107, pp. 86-91.

Sani J.M., Nuramirah A., Nazree A. and Saat A. (2018). The Assessment of indoor radon-222 concentration and emanation rate at Gua Penny, Pahang, Malaysian Journal of Analytical Sciences, Vol. 22, No. 3, pp. 483-490.

Smith M.E., Dumitru O.A., Burgehele B.D., Cucos A. and Onac B.P. (2019). Radon concentration in three Florida caves: Florida, Jennings, Carbonates and Evaporites, Vol. 34, pp. 433-439.

Solomon S.B., Langroo R., Lyons R.G. and James J.M. (1996). Radon exposure to tour guides in Australian show caves, Environment International, Vol. 22, No. 1, pp. 409-413.

Somogy G., Hunyadi I. and Hakl J. (1989). Historical review of one decade radon measurements in Hungarian caves performed by solid state nuclear track detection technique. Hungarian Academy of sciences. Debrecen: Hungarian Academy of sciences,

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

Sperrin M., Gillmore G. and Denman T. (2001). Radon concentration variations in a Mendip cave cluster, Environmental Management and Health, Vol. 12, No. 5, pp. 476-482.

Stefanov P., Turek K., Svetlik I. and Briestensky M. (2016). Radon and fault displacements in Bacho Kiro cave (Bulgaria) related to closely situated

earthquakes, Proceeding papers, Fifth international scientific conference "Geographical sciences and education". Shumen, Bulgaria, pp. 49-57.

Taheri M., Baradaran S. and Jafarizadeh M. (2020). Increased radon concentration in Katalekhore tourist cave during an earthquake compared with 10 years of follow-up data, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 326, pp. 911-918.

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

Teixeira M.M.G.R., Faisca M.C. and Crispim J.A. (1991). Preliminary data of radon concentration in some Portuguese show caves.» Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment. Salzburg Austria: UNIVERSITY OF SALZBURG,. Abstract No. 42.

Thinova L., Fronka A. and Rovenska K. (2015). The overview of the radon and environmental characteristics measurements in the Czech show caves, *Radiation Protection Dosimetry*, No. 4, Vol. 164, pp. 502-509.

Thinova L., Rovenska K. and Otahal P. (2010). Environmental and radon measurements in the underground workplaces in the Czech Republic, *NUKLEONIKA*, Vol. 55, No. 4, pp. 491-493.

Turek K., Stefanov P., Svetlik I., Orcikova H. and Simek P. (2015). Radon and CO<sub>2</sub> concentration screening in, *International Journal of Geoheritage*, Vol. 3, No. 2, pp. 14-23.

Vicanova M., Durcik M. and Nikodemova D. (1997). Radon air concentrations in Karst caves and estimates of personal doses at employees.» Regional Symposium Radiation Protection in Neighbouring Countries of Central Europe. Prague: IRPA.

World Health Organization, (2009). WHO HANDBOOK ON INDOOR RADON-A PUBLIC HEALTH PERSPECTIVE. World Health Organization,

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

### **Διαδικτυακές πηγές**

- [1] Ελληνικά ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα. n.d. <<https://www.repository.kallipos.gr/>>.
- [2] ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. n.d. <<https://www.eeae.gr/>>.
- [3] ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΥΓΙΕΙΝΗΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ. n.d. <[www.elinyae.gr](http://www.elinyae.gr)>.
- [4] Parravicini A. «Slidetodoc.com.» 22 11 2012. <<https://slidetodoc.com/training-course-on-radiation-dosimetry-instrumentation-3-passive/>>.