



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΧΗΜΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**“Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση της κατανομής
του ραδονίου με εφαρμογή στον ελλαδικό χώρο”**

ΚΟΛΟΒΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΛΛΙΘΡΑΚΑΣ ΚΟΝΤΟΣ

ΧΑΝΙΑ 7/2025

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

- Νικόλαος Καλλίθρακας-Κόντος, Καθηγητής Σχολής ΜΗΧΟΠ, Πολυτεχνείο Κρήτης επιβλέπων και μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής
- Εμμανουήλ Μανούτσογλου, Καθηγητής Σχολής ΜΗΧΟΠ, Πολυτεχνείο Κρήτης και μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής
- Αλέξανδρος Κλούβας, Ομότιμος Καθηγητής Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΑΠΘ και μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής
- Ιωάννης Καΐσας, Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΑΠΘ
- Μυροφόρα Πηλακούτα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια στο Τμήμα Βιοϊατρικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής
- Στυλιανός Ξανθός, Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδος
- Νικόλαος Λυδάκης-Σημαντήρης, Καθηγητής Σχολής ΜΗΧΟΠ, Πολυτεχνείο Κρήτης

Αφιερώνω τη διατριβή αυτή
στην οικογένειά μου,
με αγάπη και ευγνωμοσύνη

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Νικόλαο Καλλίθρακα-Κόντο, για την καθοδήγηση, την επιστημονική υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής.

Ευχαριστώ θερμά τα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, Δρ. Αλέξανδρο Κλούβα και Δρ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου, καθώς και όλα τα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, για την καθοδήγηση, τις εύστοχες παρατηρήσεις, τη δημιουργική κριτική και την ουσιαστική συμβολή τους στη βελτίωση του έργου μου..

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους συναδέλφους μου στο Τμήμα Εποπτείας Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος (ΤΕΡΠ) της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας, για τη συνεργασία, την τεχνική βοήθεια και το δημιουργικό περιβάλλον που συνέβαλε καθοριστικά στην ολοκλήρωση της έρευνας. Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κεχαγιά Κωνσταντίνα για την ουσιαστική συμβολή και τη στήριξή της σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Ειδική μνεία και θερμές ευχαριστίες απευθύνω στον προϊστάμενο του ΤΕΡΠ Δρ. Κωνσταντίνο Ποτηριάδη, για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και την αδιάλειπτη στήριξή του. Η εμπειρία του, η προσήλωσή του στην επιστημονική ποιότητα και η συνεχής διαθεσιμότητά του να συζητήσει και να δώσει λύσεις στα προβλήματα που προέκυπταν, υπήρξαν καταλυτικές για την πρόοδο και την επιτυχή ολοκλήρωση της διατριβής. Η συμβολή του δεν περιορίστηκε μόνο στην τεχνική καθοδήγηση, αλλά περιέλαβε και τη συνεχή ενθάρρυνση και στήριξη, που αποτέλεσαν πολύτιμη πηγή έμπνευσης για εμένα.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, για την αμέριστη αγάπη, την υπομονή και τη στήριξή τους σε όλη αυτήν τη διαδρομή. Χωρίς τη δική τους παρουσία και δύναμη, η ολοκλήρωση της διατριβής δεν θα ήταν εφικτή.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	8
ΓΛΩΣΣΑΡΙ	11
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	12
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	13
Κεφάλαιο 1ο: Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος - Ραδόνιο	13
1.1. Φυσικές πηγές ραδιενέργειας περιβάλλοντος	14
1.2. Το ραδόνιο και τα θυγατρικά του	16
1.2.1. Συμπεριφορά του ραδονίου και των θυγατρικών του στον αέρα εσωτερικών χώρων.....	18
1.2.2. Κλάσμα μη προσκολλημένων θυγατρικών του ραδονίου.....	19
1.2.3. Συντελεστής ισορροπίας.....	20
1.3. Μεταφορά ραδονίου	23
Κεφάλαιο 2ο: Έκθεση στο ραδόνιο.....	27
2.1. Επιδημιολογική και δοσιμετρική προσέγγιση	27
2.2. Η έννοια της δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας.....	28
2.3. Δοσιμετρία – εσωτερική δοσιμετρία.....	30
2.3.1. Βιοκινητικό μοντέλο του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος (HRTM).....	32
Εξωθωρακική περιοχή: ET1: Μύτη / Ρινοφάρυγγας	34
ET2: Στοματοφάρυγγας / Λάρυγγας	35
Θωρακική περιοχή: Βρογχική περιοχή (BB): Τραχεία και κύριοι βρόγχοι	35
Βρογχιολική περιοχή (bb): Τελικά βρογχιόλια	35
2.4. Επιπτώσεις της ραδιενέργειας στον άνθρωπο	41
2.4.1. Καθορισμένα αποτελέσματα	43
2.4.2. Στοχαστικά αποτελέσματα.....	44
2.5. Επιπτώσεις στον άνθρωπο της έκθεσης στο ραδόνιο	46
2.6. Συντελεστές μετατροπής συγκέντρωσης ραδονίου σε ενεργό δόση	47
Κεφάλαιο 3ο: Ραδόνιο στους εσωτερικούς χώρους.....	49
3.1. Χωρικές και Χρονικές Μεταβολές της συγκέντρωσης ραδονίου.....	49
3.1.1. Χρονικές μεταβολές.....	49
3.1.2. Χωρικές διακυμάνσεις.....	51
3.2. Κατανομή Ραδονίου και Λογαριθμοκανονική Κατανομή (lognormal)	51
3.3. Ραδόνιο στις κατοικίες.....	54
3.3.1. Στρατηγική Δειγματοληψίας	55
3.3.2 Πρόσθετες πληροφορίες.....	56

3.3.3. Στρατηγική επιλογής συμμετεχόντων.....	56
3.3.4. Επιλογή ανιχνευτών ραδονίου.....	57
3.3.5. Χαρακτηριστικά μέτρησης.....	57
3.4. Ραδόνιο στους χώρους εργασίας.....	58
3.5. Ελληνικό κανονιστικό πλαίσιο.....	60
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	63
Κεφάλαιο 4ο: Μέτρηση ραδονίου.....	63
4.1 Ανιχνευτές μέτρησης ραδονίου στην ατμόσφαιρα.....	63
4.2. Μέτρηση με ανιχνευτή πυρηνικών ιχών στερεάς κατάστασης.....	66
4.2.1. Διαδικασία μέτρησης.....	68
Κεφάλαιο 5ο: Βάση δεδομένων συγκέντρωσης ραδονίου.....	75
5.1. Παθητικές Μετρήσεις.....	76
5.1.1. Κατοικίες.....	76
5.1.2. Χώροι εργασίας.....	82
5.2. Επιτόπιες Μετρήσεις.....	86
5.3. Μετρήσεις Συνεργατών.....	87
5.4. Ιστορικές Μετρήσεις.....	89
5.5. Βαθμονόμηση.....	91
5.6. Σχεσιακό διάγραμμα.....	92
Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα.....	96
6.1. Κατανομή των συγκεντρώσεων ραδονίου στον ελλαδικό χώρο.....	96
6.2. Συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδονίου και της χρονολογίας της κατοικίας.....	101
6.4. Έκθεση εργαζομένων στο ραδόνιο σε τουριστικά σπήλαια.....	105
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	113
Βιβλιογραφία.....	116
Παράρτημα 1.....	121

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται την ανάπτυξη, εφαρμογή και αξιολόγηση μιας ολοκληρωμένης επιστημονικά τεκμηριωμένης μεθοδολογίας για τη μέτρηση, ανάλυση και χωρική αποτύπωση της συγκέντρωσης ραδονίου σε κατοικίες και χώρους εργασίας στον ελληνικό χώρο.

Το ραδόνιο (^{222}Rn), φυσικό ραδιενεργό αέριο που προέρχεται από τη διάσπαση του ^{226}Ra της σειράς του ^{238}U , αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή έκθεσης του ανθρώπου σε φυσική ακτινοβολία και έναν από τους βασικότερους παράγοντες για την εμφάνιση καρκίνου του πνεύμονα, καθιστώντας την αποτίμηση των συγκεντρώσεων του κρίσιμο ζήτημα ακτινοπροστασίας.

Για πρώτη φορά στην Ελλάδα, πραγματοποιήθηκε μεγάλης κλίμακας καταγραφή συγκεντρώσεων ραδονίου σε κατοικίες και εργασιακούς χώρους σε όλες τις περιφέρειες, αξιοποιώντας παθητικούς ανιχνευτές CR-39 με βαθμονόμηση και επαλήθευση μέσω συμμετοχής σε διεθνείς διασυγκρίσεις (BfS). Τα αποτελέσματα ενσωματώθηκαν σε μία καινοτόμο, δυναμική ψηφιακή βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε ειδικά στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Η βάση αυτή, μοναδική σε εθνικό επίπεδο και μία από τις λίγες διεθνώς που συνδυάζει δεδομένα ραδονίου με γεωλογικές, δομικές, ενεργειακές και δημογραφικές παραμέτρους, προσφέρει δυνατότητες πολυδιάστατης στατιστικής και γεωχωρικής ανάλυσης.

Η κατανομή των μετρήσεων επιβεβαιώνει τη λογαριθμοκανονική (lognormal) φύση της συγκέντρωσης του ραδονίου. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται σε περιοχές με αυξημένη περιεκτικότητα του υπεδάφους σε ουράνιο και σε παλαιότερα κτίρια. Σημαντική στατιστική συσχέτιση καταγράφηκε μεταξύ της συγκέντρωσης ραδονίου και της χρονολογίας κατασκευής: κατοικίες που ανεγέρθηκαν πριν το 1970 εμφάνισαν σημαντικά υψηλότερες τιμές, καθώς και οι κατοικίες μετά το 2000 παρουσίασαν εκ νέου αύξηση, λόγω της μειωμένης διαπνοής των σύγχρονων, ενεργειακά αποδοτικών κατασκευών.

Επιπλέον, ειδική μελέτη πραγματοποιήθηκε σε τουριστικά σπήλαια, όπου εντοπίστηκαν υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου που οδηγούν σε ενεργές δόσεις για το προσωπικό που σε ορισμένες περιπτώσεις υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο των 6 mSv/έτος. Η ανάλυση βασίστηκε σε προσαρμοσμένους συντελεστές μετατροπής

σύμφωνα με τις οδηγίες του ICRP (International Commission on Radiological Protection) έκδοση 137.

Η διατριβή καταλήγει στην πρόταση ενός δυναμικού εργαλείου για τη διαχείριση μετρήσεων ραδονίου, που μπορεί να υποστηρίξει τη χάραξη εθνικής πολιτικής για την ακτινοπροστασία και την τεκμηριωμένη εφαρμογή του Εθνικού Σχεδίου Δράσης για το Ραδόνιο. Τα αποτελέσματα προσφέρουν ουσιαστική συμβολή στην καταγραφή της έκθεσης του ελληνικού πληθυσμού σε ραδόνιο και στη διαμόρφωση στρατηγικών περιορισμού της ακτινολογικής επιβάρυνσης.

ABSTRACT

This doctoral thesis presents the development, implementation, and evaluation of a scientifically validated and comprehensive methodology for the measurement, analysis, and spatial mapping of indoor radon (^{222}Rn) concentrations in dwellings and workplaces across Greece.

Radon, a naturally occurring radioactive gas resulting from the decay of ^{226}Ra in the ^{238}U series, constitutes the most significant source of natural radiation exposure for humans and is recognized as a major contributor to lung cancer risk. Therefore, assessing its concentrations is of critical importance for radiation protection.

For the first time in Greece, a large-scale radon survey was conducted in both residential and occupational environments across all administrative regions, using CR-39 passive solid-state nuclear track detectors. These detectors were calibrated and verified through participation in international intercomparison exercises at the Federal Office for Radiation Protection (BfS) in Germany. The collected data were integrated into a novel, dynamic digital radon database specifically developed in the framework of this research. This database, which is unique at the national level and among the few of its kind internationally, combines radon measurements with geological, structural, energy-related, and demographic parameters, enabling multidimensional statistical and spatial analysis.

The data analysis confirmed the log-normal distribution of indoor radon concentrations. The highest values were recorded in areas with elevated uranium content in the underlying geology and in older buildings. A statistically significant correlation was established between radon concentration and year of construction: dwellings built before 1970 exhibited substantially higher levels, while those constructed after 2000 also showed increased concentrations, attributed to reduced air permeability in modern, energy-efficient structures.

A dedicated case study was also conducted in tourist caves, where elevated radon levels were identified, leading to effective doses for staff that, in certain cases, exceeded the regulatory occupational limit of 6 mSv/year. The dose assessment was based on

adjusted dose conversion factors in accordance with ICRP(International Commission on Radiological Protection) Publication 137.

The thesis proposes a dynamic tool for the management of radon measurement data, which can effectively support national radiation protection policies and the evidence-based implementation of the National Radon Action Plan. The results make a substantial contribution to documenting population exposure to radon in Greece and shaping strategies to reduce radiological burden, ultimately promoting public health protection.

Από την παρούσα διδακτορική διατριβή προέκυψαν οι παρακάτω επιστημονικές δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά με κριτές.

[1] M. Kolovou, C. Potiriadis, N. Kallithrakas-Kontos, E. Manoutsoglou, and V. Giannopoulos, "Radon measurements and occupational dose assessment in Greek tourist caves," *The European Physical Journal Special Topics*, Mar. 2025, doi: 10.1140/epjs/s11734-025-01537-8.

[2] M. Kolovou, C. Potiriadis, and N. Kallithrakas-Kontos, "A study on the correlation between indoor radon concentrations and the construction year of the dwellings," *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 232, no. 10, pp. 1625–1629, Aug. 2023, doi: 10.1140/epjs/s11734-023-00888-4.

ΓΛΩΣΣΑΡΙ

Αγγλικός όρος	Απόδοση στα Ελληνικά
Absorption	Απορρόφηση
Activity	Ενεργότητα
Alpha recoil	Ανάκρουση κατά την άλφα αποδιέγερση
Activity Median Aerodynamic Diameter	Διάμεση αεροδυναμική διάμετρος της ενεργότητας
Attached radon progeny	Προσκολλημένα θυγατρικά
Clearance	Απομάκρυνση
Deposited radon progeny	Εναποθετημένα θυγατρικά
Deposition	Εναπόθεση
Deterministic effects	Καθορισμένα αποτελέσματα
Distribution	Κατανομή
Dose Conversion Factor	Συντελεστής μετατροπής δόσης
Effective dose	Ενεργός δόση
Emanating fraction	Κλάσμα εκπομπής
Emanation coefficient	Συντελεστής εκπομπής
Equilibrium Equivalent Concentration (EEC)	Ισοδύναμη συγκέντρωση ισορροπίας
Equilibrium equivalent exposure	Ισοδύναμη έκθεση ισορροπίας
Equilibrium factor	Συντελεστής ισορροπίας
Excess Relative Risk	Υπερβάλλον σχετικός κίνδυνος
Excretion	Αποβολή
Human Alimentary Tract Model	Μοντέλο Ανθρώπινου Γαστρεντερικού Συστήματος
Human Respiratory Tract Model	Μοντέλο του αναπνευστικού συστήματος
Integrated techniques	Ολοκληρωμένες μετρήσεις
Linear Energy Transfer	Γραμμική μεταφορά ενέργειας
Linear Non-Threshold model	Γραμμικό μοντέλο χωρίς κατώφλι δόσης
Migration	Μετανάστευση
Occupational exposure	Επαγγελματική έκθεση
Potential Alpha Energy	Δυνητική ενέργεια άλφα
Potential Alpha Energy Concentration	Συγκέντρωση της δυνητικής ενέργειας άλφα
Radon progeny / Radon daughters	Θυγατρικά του ραδονίου
Relative Risk	Σχετική επικινδυνότητα
Retention	Κατακράτηση
Solid State Nuclear Track Detector (SSNTD)	Ανιχνευτής πυρηνικών ιχνών στερεάς κατάστασης
Stack effect	Φαινόμενο της καμινάδας
Stochastic effects	Στοχαστικά αποτελέσματα
Threshold dose	Κατώφλι δόσης
Trace gas	Ιχνοαέριο
Unattached radon progeny	Μη προσκολλημένα θυγατρικά
Uptake	Πρόσληψη

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

AMAD	Activity Median Aerodynamic Diameter
BfS	Federal Office for Radiation Protection Germany (Bundesamt für Strahlenschutz)
IAEA	International Atomic Energy Agency
IARC	International Agency for Research on Cancer
ICRP	International Commission on Radiological Protection
JRC	Joint Research Center
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
WHO	World Health Organization
ΕΕΑΕ	Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας
ΕΣΧΕΔΡΑ	Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την Αντιμετώπιση των Μακροπρόθεσμων Κινδύνων από το Ραδόνιο
ΠΟΥ	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
ΤΕΕ	Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1ο: Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος – Ραδόνιο

Η ραδιενέργεια είναι αναπόσπαστο κομμάτι του περιβάλλοντός μας. Ραδιονουκλίδια με μεγάλο χρόνο ημιζωής βρίσκονται στον φλοιό της Γης, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, νετρόνια και φορτισμένα σωματίδια, που δημιουργούνται από την κοσμική ακτινοβολία, φτάνουν ως την επιφάνεια της Γης. Η ιοντίζουσα ακτινοβολία περιλαμβάνει εκπομπές σωματιδίων από διασπάσεις πυρήνων, όπως σωματίδια άλφα, ηλεκτρόνια (συμπεριλαμβανομένων των σωματιδίων βήτα), πρωτόνια και νετρόνια. Περιλαμβάνει, επίσης, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με τη μορφή ακτίνων Χ και ακτίνων γάμμα. Αυτές οι ακτινοβολίες έχουν επαρκή ενέργεια, ώστε να ιοντίζουν την ύλη και να προκαλούν διάσπαση μοριακών δεσμών. Εκτός από τις φυσικές πηγές, τεχνητά ραδιονουκλίδια, που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η παραγωγή ηλεκτρισμού στα πυρηνικά εργοστάσια και από ιατρικές εφαρμογές, βρίσκονται, επίσης, στο περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό και οι πηγές της ραδιενέργειας περιβάλλοντος διαχωρίζονται σε φυσικές πηγές και ανθρωπογενείς πηγές [3].

Σχεδόν 340 νουκλίδια έχουν βρεθεί στη φύση από τα οποία τα 70 είναι ραδιενεργά. Όλα τα στοιχεία με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από 80 διαθέτουν ραδιενεργά ισότοπα και όλα τα ισότοπα των στοιχείων με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από 83 είναι ραδιενεργά [4]. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται μερικά από τα πιο συνήθη ραδιονουκλίδια.

Η ραδιενέργεια περιβάλλοντος αποτελεί αντικείμενο εντατικής έρευνας από τον 20ό αιώνα, με έμφαση τόσο στις φυσικές όσο και στις ανθρωπογενείς πηγές. Η ιστορική εξέλιξη του πεδίου συνδέεται στενά με την ανάπτυξη της πυρηνικής τεχνολογίας, τις δοκιμές πυρηνικών όπλων και τα ατυχήματα, ενώ η μέτρηση και παρακολούθηση της ραδιενέργειας έχει βελτιωθεί σημαντικά με την πρόοδο των τεχνικών και των υπολογιστικών εργαλείων. Οι πρώτες μετρήσεις ραδιενέργειας στο περιβάλλον ξεκίνησαν πριν το 1945, αλλά η σημασία τους αυξήθηκε δραματικά μετά τις πρώτες πυρηνικές δοκιμές [5]. Οι ατμοσφαιρικές δοκιμές πυρηνικών όπλων προκάλεσαν τη μεγαλύτερη ανθρωπογενή ρύπανση, με σημαντική αύξηση της έκθεσης του ανθρώπου στη ραδιενέργεια μέχρι τη δεκαετία του 1960 [6].

Πίνακας 1. Συνήθη περιβαλλοντικά ραδιονουκλίδια [3]

Κοσμογενή				
³ H (12)	¹⁴ C (5730)	⁷ Be (0.145)	¹⁰ Be (1.6 × 10 ⁶)	⁸¹ Kr (210,000)
²⁶ Al (740,000)	³² P (0.039)	³² Si (450)	³⁹ Ar (270)	
Πρωτογενή				
⁴⁰ K (1.3 × 10 ⁹)	⁸⁷ Rb (4.7 × 10 ¹⁰)	¹⁸⁷ Re (5 × 10 ¹⁰)		
Ραδιενεργός σειρά του Θορίου-232 (4n) (περιλαμβάνονται μόνο τα ραδιονουκλίδια με χρόνο ημιζωής > 1 ημέρα): ²³² Th (1.4 × 10 ¹⁰) → ²²⁸ Ra (5.8) → ²⁰⁸ Th (1.9) → ²²⁴ Ra (0.01) → ²⁰⁸ Pb (stable)				
Ραδιενεργός σειρά του Ουρανίου-238 (4n + 2) (περιλαμβάνονται μόνο τα ραδιονουκλίδια με χρόνο ημιζωής > 1 ημέρα): ²³⁸ U (4.5 × 10 ⁹) → ²³⁴ Th (0.07) → ²³⁴ U (244,500) → ²³⁰ Th (77,000) → ²²⁶ Ra (1,600) → ²²² Rn (0.01) → ²¹⁰ Pb (22.3) → ²¹⁰ Bi (0.014) → ²¹⁰ Po (0.38) → ²⁰⁶ Pb (stable)				
Ραδιενεργός σειρά του Ουρανίου-235 (4n + 3) (περιλαμβάνονται μόνο τα ραδιονουκλίδια με χρόνο ημιζωής > 1 ημέρα): ²³⁵ U (7 × 10 ⁸) → ²³¹ Th (0.0029) → ²³¹ Pa (32,800) → ²²⁷ Ac (21.8) → ²²⁷ Th (0.051) → ²²³ Ra (0.031) → ²⁰⁷ Pb (stable)				
Ανθρωπογενή				
⁴¹ Ca (140,000)	⁵⁹ Ni (75,000)	⁶⁰ Co (5.3)	⁶³ Ni(96)	⁷⁵ Se (0.33)
⁷⁹ Se (65,000)	⁸⁵ Kr (11)	⁸⁶ Rb(0.05)	⁹⁰ Sr (29)	⁹⁰ Y(0.0073)
⁹³ Zr (1.5 × 10 ⁶)	⁹³ Mo (3,500)	^{93m} Nb (14)	⁹⁴ Nb (20,300)	⁹⁴ Nb (20,300)
⁹⁵ Zr (0,18)	⁹⁹ Mo (0,0075)	⁹⁹ Tc (213,000)	^{99m} Tc (0.0007)	¹⁰⁶ Ru (1)
¹⁰⁷ Pd (6.5 × 10 ⁶)	^{113m} Cd (14)	^{125m} Te (0.16)	¹²⁵ Sb (2.8)	¹²⁶ Sb (0.034)
¹²⁶ Sn (100,000)	¹²⁵ I(0.16)	¹²⁹ I (1.6 × 10 ⁷)	¹³¹ I (0.022)	¹³³ Xe (0.014)
				¹⁸² Hf (9 × 10 ⁶)
¹³⁴ Cs (2.1)	¹³⁵ Cs (2.3 × 10 ⁶)	¹³⁷ Cs (30)	¹⁴⁴ Ce (0.78)	¹⁰⁶ Po ²³⁶ U (2.3 × 10 ⁷)
¹⁸² Ta (0.32)	²⁰⁵ Pb (1.4 × 10 ⁷)	²⁰⁸ Bi(37,000)	²³² U (72)	¹⁰⁷ Po
²³⁸ Pu (88)	²³⁹ Pu (24,000)	²⁴⁰ Pu (6,500)	²⁴² Pu (376,300)	
Ραδιενεργός σειρά του Νεπτούνιου (4n + 1) (περιλαμβάνονται μόνο τα μακρόβια ραδιονουκλίδια): ²⁴¹ Pu (14) → ²⁴¹ Am (430) → ²³⁷ Np (2.1 × 10 ⁶) → ²³³ Pa (0.074) → ²³³ U (1.6 × 10 ⁵) → ²²⁹ Th (7,340) → ²²⁵ Ra (0.04) → ²²⁵ Ac (0.027) → ²¹⁹ Bi (stable)				

Ο χρόνος ημιζωής εντός των παρενθέσεων είναι σε χρόνια.

1.1. Φυσικές πηγές ραδιενέργειας περιβάλλοντος

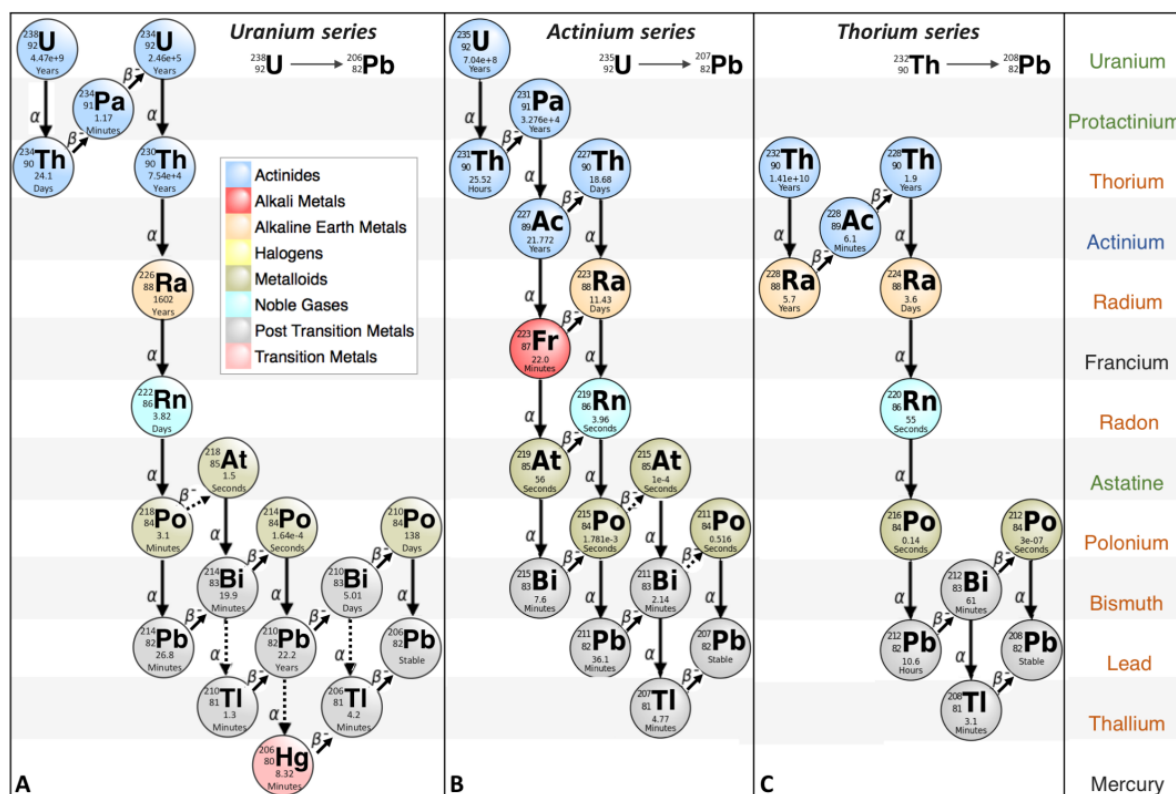
Οι φυσικές πηγές ραδιενέργειας κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- **Κοσμική ακτινοβολία:** Οι κοσμικές ακτίνες είναι σωματίδια υψηλής ενέργειας που προέρχονται από το διάστημα και τον ήλιο. Όταν τα σωματίδια αυτά αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα της Γης, παράγουν δευτερογενή σωματίδια, όπως νετρόνια και μίονια, τα οποία συμβάλλουν στη φυσική ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης. Το επίπεδο της κοσμικής ακτινοβολίας αυξάνεται με το υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος.
- **Κοσμογενή ραδιονουκλίδια:** Η κοσμική ακτινοβολία κατά την αλληλεπίδρασή της με τους πυρήνες των στοιχείων της ατμόσφαιρας δημιουργεί πλήθος ραδιονουκλιδίων όπως τα ^3H , ^7Be , ^{14}C και ^{22}Na τα οποία διαχέονται στην ατμόσφαιρα.

- Πρωτογενή ραδιονουκλίδια: Τα πρωτογενή ραδιονουκλίδια υπάρχουν από σχηματισμού της Γης, πριν από περίπου 5 δισεκατομμύρια χρόνια. Οι χρόνοι ημιζωής τους καθώς και των θυγατρικών τους είναι αρκετά μεγάλοι, ώστε να έχουν επιβιώσει από τη δημιουργία τους μέχρι σήμερα. Κατά τη διάρκεια της νουκλεοσύνθεσης των ραδιενεργών και των σταθερών ισοτόπων που βρίσκονται στη Γη παράχθηκαν πολύ περισσότερα ραδιονουκλίδια απ' όσα υπάρχουν σήμερα. Τα ραδιονουκλίδια που υπάρχουν σήμερα είναι εκείνα που έχουν χρόνους ημιζωής τουλάχιστον συγκρίσιμους με την ηλικία της Γης. Τα ραδιονουκλίδια με χρόνους ημιζωής μικρότερους από περίπου 10^8 χρόνια έχουν καταστεί μη ανιχνεύσιμα στις περίπου 30 ή και περισσότερες περιόδους ημιζωής από τη δημιουργία τους, ενώ τα ραδιονουκλίδια με χρόνους ημιζωής μεγαλύτερους από 10^{10} χρόνια έχουν διασπαστεί πολύ λίγο μέχρι σήμερα.

Τα πρωτογενή εμφανιζόμενα ραδιονουκλίδια μπορούν να χωριστούν σε αυτά που εμφανίζονται μεμονωμένα, όπως τα ^{40}K , ^{87}Rb , ^{123}Te , ^{138}La και ^{142}Ce , και σε εκείνα που αποτελούν στοιχεία των τριών σειρών διάσπασης. Οι τρεις σειρές διάσπασης είναι η σειρά του ουρανίου, η οποία ξεκινά από το ^{238}U , η σειρά του θορίου, η οποία ξεκινά από το ^{232}Th , και η σειρά του ακτινίου, η οποία ξεκινά από το ^{235}U (Σχήμα 1).

Οι τρεις σειρές διάσπασης αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας υποβάθρου στην οποία εκτίθενται οι άνθρωποι. Μια τέταρτη σειρά διάσπασης, η σειρά του νεπτουνίου, Np που προήλθε από το στοιχείο ^{241}Pu , είναι γνωστό ότι υπήρξε κάποτε, αλλά το ^{241}Pu έχει χρόνο ημιζωής μόνο 14 χρόνια και υπήρξε μόνο για λίγο μετά τον σχηματισμό του. Τα θυγατρικά αυτής της σειράς έχουν, επίσης, σχετικά σύντομους χρόνους ημιζωής. Το μόνο επιζών μέλος της σειράς του νεπτουνίου είναι το σχετικά σταθερό νουκλίδιο ^{209}Bi , το οποίο έχει εκτιμώμενο χρόνο ημιζωής περίπου 2×10^{18} χρόνια. [4]



Σχήμα 1. Σειρά διάσπασης των (A) ουράνιο-238 (^{238}U), (B) ουράνιο-235 (^{235}U) και (C) θόριο-232 (^{232}Th). [7]

1.2. Το ραδόνιο και τα θυγατρικά του

Το ραδόνιο είναι ένα μοναδικό φυσικό στοιχείο επειδή είναι αέριο, ευγενές και ραδιενεργό σε όλα τα ισότοπά του. Τα αέρια έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, πρώτον, επειδή είναι ευκίνητα και μπορούν να μεταφερθούν σε σημαντικές αποστάσεις μέσα στον στερεό φλοιό της Γη και στην ατμόσφαιρα και δεύτερον, επειδή η εισπνοή τους μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για την υγεία. Το γεγονός ότι το ραδόνιο είναι ευγενές αέριο διασφαλίζει ότι δεν δεσμεύεται μέσω χημικής αντίδρασης από το μέσο που διαπερνά. Ως αποτέλεσμα, το ελεύθερο ραδόνιο συνήθως μειώνεται μόνο μέσω διάσπασης, καθώς απομακρύνεται από την πηγή του. Βεβαίως, όπως τα υπόλοιπα ελαφρότερα ευγενή αέρια, δεν είναι πλήρως αδρανές. Το ραδόνιο μπορεί να σχηματίσει φθορίδιο, το οποίο, κατ' αναλογία με τη συμπεριφορά του ξένου, μπορεί να είναι RnF_4 . Τέλος, το γεγονός ότι είναι ραδιενεργό επιτρέπει την ανίχνευσή του με εξαιρετική ευαισθησία [8].

Τα κύρια ισότοπα του ραδονίου είναι το ^{222}Rn (συνήθως και εφεξής αναφερόμενο ως ραδόνιο, το οποίο ανήκει στη ραδιενεργή σειρά διάσπασης που ξεκινά από το ^{238}U και

καταλήγει στο σταθερό ^{206}Pb), το ^{220}Rn (συνήθως και εφεξής αναφερόμενο ως θορόνιο, το οποίο ανήκει στη ραδιενεργή σειρά διάσπασης που ξεκινά από το ^{232}Th και καταλήγει στο σταθερό ^{208}Pb) και το ^{219}Rn (συνήθως και εφεξής αναφερόμενο ως ακτινόνιο, το οποίο ανήκει στη ραδιενεργή σειρά διάσπασης που ξεκινά από το ^{235}U και καταλήγει στο σταθερό ^{207}Pb). Ο χρόνος ημιζωής για τα τρία φυσικά ραδιοϊσότοπα του ραδονίου είναι 3.82 d για το ^{222}Rn , 55.6 s για το ^{220}Rn και 3.96 s για το ^{219}Rn . [9]

Το ενδιαφέρον για τα τρία ραδιοϊσότοπα του ραδονίου αυξάνεται με τον χρόνο ημιζωής τους και τη σχετική αφθονία τους. Το ^{219}Rn είναι το πιο βραχύβιο και παράγεται συνήθως σε πολύ μικρότερες ποσότητες από το ^{222}Rn , δεδομένου ότι ο λόγος των μαζών $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ στη φύση είναι 0.00719. Επομένως, το ^{219}Rn δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από άποψη ακτινοπροστασίας. Το ^{220}Rn , επίσης, είναι βραχύβιο και κατά συνέπεια κινείται σε πολύ μικρότερη απόσταση από την πηγή του. Στον αέρα, για μια σταθερά διάχυσης, D , $0.1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, οι μέσες αποστάσεις διάχυσης (δηλαδή η απόσταση που διαχέεται κατά τη διάρκεια μιας ημιζωής) είναι 2.2 μέτρα για το ^{222}Rn και 0.029 μέτρα για το ^{220}Rn . Ωστόσο, εξαιρετικά υψηλές αναλογίες Th/U μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική αύξηση του ^{220}Rn σε σχέση με το ^{222}Rn . Ένα διάσημο παράδειγμα είναι στην Πολιτεία της Κεράλα στην Ινδία, όπου οι άμμοι μονάζιτη (ThPO_4) μπορούν να παράγουν σημαντική έκλυση ^{220}Rn . [8]

Τα προϊόντα διάσπασης του ^{222}Rn μπορούν να διαχωριστούν σε δύο ομάδες ανάλογα με τους χρόνους ημιζωής: στα βραχύβια ισότοπα, από το ^{218}Po έως το ^{214}Po , των οποίων οι χρόνοι ημιζωής είναι της τάξης των λεπτών, και στα μακρόβια από το ^{210}Pb έως το σταθερό ^{206}Pb , με χρόνους ημιζωής της τάξης ημερών ή ετών. Λόγω του μεγάλου χρόνου ημιζωής τους, οι επιπτώσεις που έχουν στον άνθρωπο είναι κατά πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερες από εκείνες των βραχύβιων. Συνεπώς, για την εκτίμηση της δόσης στον πνεύμονα λαμβάνεται υπόψη αποκλειστικά η εισπνοή των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου. Οι χρόνοι ημιζωής και οι ενέργειες του ραδονίου και των βραχύβιων θυγατρικών του παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 [10].

Πίνακας 2. Χρόνοι ημιζωής και κύριες ενέργειες (MeV) του ραδονίου και των βραχύβιων θυγατρικών του

Ραδιονουκλίδιο	Χρόνος ημιζωής	Κύριες ενέργειες (MeV)		
		άλφα	βήτα	Γάμμα
²²² Rn	3.823 ημέρες	5.59 (100%)	—	—
²¹⁸ Po	3.07 λεπτά	6.11 (100%)	—	0.053 (15%)
²¹⁴ Pb	26.9 λεπτά	—	0.67 (47%) 0.73 (41%) 1.02 (9%)	0.295 (27%) 0.351 (46%)
²¹⁴ Bi	19.8 λεπτά	—	1.540 (17%) 1.894 (7%) 3.270 (20%)	1.120 (15%) 1.764 (15%)
²¹⁴ Po	162 μs	7.83 (100%)	—	—

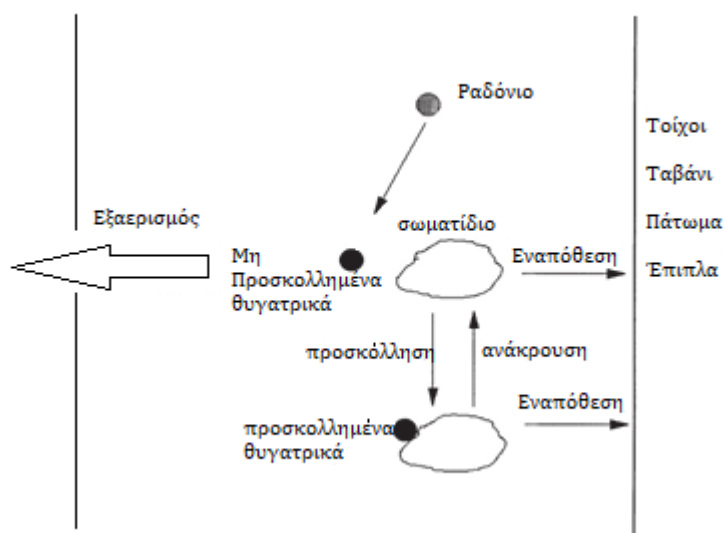
1.2.1. Συμπεριφορά του ραδονίου και των θυγατρικών του στον αέρα εσωτερικών χώρων

Τα θυγατρικά του ραδονίου σε έναν εσωτερικό χώρο ενδέχεται να απαντώνται σε τρεις διακριτές φυσικές μορφές, οι οποίες καθορίζονται από την αλληλεπίδρασή τους με τα αιωρούμενα σωματίδια και τις επιφάνειες του περιβάλλοντος. Οι μορφές αυτές είναι:

- Μη προσκολλημένα θυγατρικά (unattached radon progeny): τα θυγατρικά που προκύπτουν αμέσως μετά από την α-διάσπαση του ραδονίου είναι κυρίως θετικά φορτισμένα. Άμεσα σχηματίζουν φορτισμένα ή ουδέτερα συσσωματώματα (Cluster) με μόρια υδρατμών και ιχνοαέρια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Το μέγεθός τους κυμαίνεται συνήθως από 0.5 έως 5 nm. Παρά τη μικρή τους μάζα, παίζουν καθοριστικό ρόλο στη δοσιμετρία λόγω της υψηλής πιθανότητας εναπόθεσής τους στους βρόγχους.
- Προσκολλημένα θυγατρικά (attached radon progeny): Αποτελούν προϊόν της προσκόλλησης των μη προσκολλημένων θυγατρικών σε αερολύματα ή άλλα αιωρούμενα σωματίδια του αέρα. Η κατανομή μεγέθους τους εξαρτάται από την κατανομή μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων, τα ιχνοαέρια και τον συντελεστή προσκόλλησης.
- Εναποθετημένα θυγατρικά (deposited radon progeny): Αφορούν θυγατρικά, είτε προσκολλημένα είτε μη, τα οποία έχουν εναποτεθεί σε επιφάνειες του εσωτερικού χώρου. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των επιφανειών πάνω στις οποίες εναποτίθενται, τα θυγατρικά προϊόντα του ραδονίου που παράγονται από επακόλουθες διασπάσεις άλφα στην επιφάνεια, ενδέχεται να

προκαλέσουν φαινόμενο ανάκρουσης κατά την άλφα αποδιέγερση (alpha recoil) οδηγώντας σε ενσωμάτωση (εμφύτευση) των θυγατρικών αυτών εντός της επιφάνειας. Η παρουσία τέτοιων εμφυτευμένων ραδιενεργών θυγατρικών προϊόντων μέσα στο γυαλί αποτελεί τη βάση για έναν τύπο αναδρομικής μεθόδου μέτρησης ραδονίου [10].

Οι διαφορετικοί φυσικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των προϊόντων αποσύνθεσης του ραδονίου σε έναν χώρο απεικονίζονται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2. Σχηματική απεικόνιση της συμπεριφοράς των θυγατρικών του ραδονίου σε κλειστό περιβάλλον [11].

1.2.2. Κλάσμα μη προσκολλημένων θυγατρικών του ραδονίου

Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο τα μη προσκολλημένα θυγατρικά του ραδονίου δημιουργούν σύμπλοκα με τους υδρατμούς και τα ιχναέρια (π.χ. H_2SO_4) σε συσσωματώματα που φτάνουν το $1,2\text{nm}$ [12]. Η περαιτέρω αύξηση του μεγέθους αυτών των σωματιδίων μπορεί να φτάσει περίπου τα 2 nm με τη συμμετοχή ενώσεων, όπως η αμμωνία, οι οργανικές αμίνες και οξειδωμένα οργανικά μόρια, τα οποία προέρχονται από τη βιογενή δραστηριότητα υδρογονανθράκων, και συμβάλλουν στη σταθεροποίηση των υπό ανάπτυξη συσσωματωμάτων. Τα εν λόγω συσσωματώματα δύνανται να αναπτυχθούν περαιτέρω σε μέγεθος έως και 5 nm [13]. Τα μη προσκολλημένα θυγατρικά (unattached progeny) παρουσιάζουν υψηλή κινητικότητα λόγω της μικρής τους διαμέτρου, διαχέονται ταχέως στον αέρα, προσκολλώνται εύκολα σε άλλα αερολύματα ή επιφάνειες, και όταν εισπνευσθούν, αποτίθενται με

εξαιρετικά υψηλή αποτελεσματικότητα (προσεγγίζοντας το 100%) στο αναπνευστικό σύστημα. Περίπου το 60% αποτίθεται στην εξωθωρακική περιοχή του αναπνευστικού συστήματος (extrathoracic region), ενώ το υπόλοιπο ~40% διεισδύει βαθύτερα και αποτίθεται στο βρογχικό δένδρο. Περαιτέρω, πειραματικές μελέτες έχουν αναδείξει την κρίσιμη επίδραση της συγκέντρωσης των αερολυμάτων στην κατανομή των θυγατρικών του ραδονίου. Συγκεκριμένα, το κλάσμα των μη προσκολλημένων θυγατρικών μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων (αερολυμάτων), καθώς αυτά αποτελούν επιφάνειες προσκόλλησης για τα θυγατρικά ιόντα. Ο αερισμός επηρεάζει κυρίως τη συνολική συγκέντρωση ραδονίου και αερολυμάτων και επιδρά στο κλάσμα προσκόλλησης μέσω της μεταβολής της συγκέντρωσης των αερολυμάτων, γεγονός που έχει άμεση επίπτωση στην εκτιμώμενη δόση ακτινοβολίας [14].

1.2.3. Συντελεστής ισορροπίας

Ο συντελεστής ισορροπίας ραδονίου (συμβολίζεται ως F ή F_{eq}) είναι μια παράμετρος που εκφράζει τη σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης του αερίου ραδονίου και της συγκέντρωσης των θυγατρικών του στον αέρα. Ο συντελεστής αυτός είναι σημαντικός για τον υπολογισμό της δόσης ακτινοβολίας που λαμβάνει ο ανθρώπινος πνεύμονας, καθώς η δόση εξαρτάται κυρίως από τα θυγατρικά του ραδονίου και όχι από το ίδιο το αέριο.

Τα θυγατρικά του ραδονίου σπάνια βρίσκονται σε ισορροπία μεταξύ τους. Προκειμένου να μπορέσει να υπολογιστεί η συγκέντρωση των θυγατρικών στον αέρα και να εκτιμηθεί η δόση μέσω της εισπνοής στον άνθρωπο ορίστηκε το μέγεθος δυνητική ενέργεια άλφα Potential Alpha Energy (PAE) δεδομένου ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της δόσης από τα θυγατρικά οφείλεται στην εκπομπή σωματιδίων άλφα στους πνεύμονες [15]. Η δυνητική ενέργεια άλφα (E_p) ενός θυγατρικού ραδιονουκλιδίου του ^{222}Rn αντιστοιχεί στη συνολική ενέργεια σωματιδίων άλφα που εκπέμπεται κατά τη διαδοχική ραδιενεργό του αποδιέγερση, ξεκινώντας από το αρχικό του στάδιο και μέχρι –αλλά όχι περιλαμβάνοντας– τη δημιουργία του μακρόβιου ραδιονουκλιδίου ^{210}Pb . Η ενέργεια που ενδέχεται να προκύψει από τις μεταγενέστερες διασπάσεις του ^{210}Pb και των θυγατρικών του δεν λαμβάνεται υπόψη, λόγω του μεγάλου χρόνου ημιζωής τους.

$$\text{Potential alpha energy per unit activity (J/Bq)} = \frac{\varepsilon_p}{\text{activity per atom}} = \frac{\varepsilon_p}{\lambda} = \frac{\varepsilon_p t}{\ln 2}$$

όπου

- λ : η σταθερά αποδιέγερσης (με μονάδες s^{-1})
- t : ο χρόνος ημιζωής του ραδιονουκλιδίου (s)

Αυτή η εξίσωση δείχνει πώς μετατρέπεται η δυνητική ενέργεια άλφα ανά άτομο (ε_p) σε δυνητική ενέργεια άλφα ανά μονάδα ενεργότητας (σε J/Bq).

Ο παρακάτω πίνακας 3 παρουσιάζει την προέλευση της δυνητικής ενέργειας άλφα των θυγατρικών του ^{222}Rn , εκφρασμένη είτε ανά άτομο είτε ανά ενεργότητα. Η δυνητική ενέργεια άλφα ενός δεδομένου ραδιονουκλιδίου ορίζεται ως η ενέργεια α που εκπέμπεται κατά τη διάσπαση αυτού του ραδιονουκλιδίου, συν την ενέργεια άλφα που εκπέμπεται από τη διάσπαση οποιουδήποτε επόμενου ραδιονουκλιδίου εκπέμπει σωματίδια άλφα στην αλυσίδα διάσπασης [15].

Πίνακας 3. Δυνητική ενέργεια άλφα των θυγατρικών του ραδονίου, εκφρασμένη ανά άτομο και ανά ενεργότητα [15]

Radionuclide	Half-life	Alpha energy (J)	Yield (%)	Potential alpha energy	
				Per atom, ε_p (J)	Per unit activity, ε_p/λ (J/Bq)
^{218}Po	3.10 min	0.961×10^{-12}	100	2.19×10^{-12}	0.588×10^{-9}
^{214}Pb	26.8 min	Nil (beta emitter)	—	1.23×10^{-12}	2.85×10^{-9}
^{214}Bi	19.9 min	Nil (beta emitter)	—	1.23×10^{-12}	2.12×10^{-9}
^{214}Po	164.3 μs	1.23×10^{-12}	100	1.23×10^{-12}	3×10^{-16}

Για οποιοδήποτε μείγμα θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα, η συμβολή κάθε ραδιονουκλιδίου στη συγκέντρωση της δυνητικής ενέργειας άλφα (Potential Alpha Energy Concentration - PAEC) υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη δυνητική ενέργεια άλφα ανά μονάδα ενεργότητας (ε_p/λ), που δίνεται στον προηγούμενο πίνακα 3, με τη συγκέντρωσή του, c . Η συνολική PAEC προκύπτει ως το άθροισμα όλων αυτών των επιμέρους συμβολών.

$$PAEC = \sum_i C_i(\varepsilon_{p,i}/\lambda_i)$$

Από τον προηγούμενο πίνακα 3 μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα (απλώς προσθέτοντας τις τιμές της δεξιάς στήλης) ότι αν όλα τα θυγατρικά βρίσκονταν σε

ισορροπία με το μητρικό ραδόνιο-222 σε συγκέντρωση 1 Bq/m^3 , η δυνητική ενέργεια α ανά μονάδα όγκου (PAEC) του μείγματος θα ήταν $5,56 \times 10^{-9} \text{ J/m}^3$.

Στην πράξη, τα θυγατρικά του ραδονίου σπάνια –αν όχι ποτέ– βρίσκονται σε πλήρη ραδιενεργή ισορροπία με το ραδόνιο. Επομένως, η συγκέντρωση της δυνητικής ενέργειας άλφα (PAEC) θα αποτελεί ένα ποσοστό αυτής της θεωρητικής τιμής. Το ποσοστό αυτό ονομάζεται συντελεστής ισορροπίας (*equilibrium factor*, F).

$$PAEC (\text{J/m}^3) = 5.56 \times F$$

Η εξίσωση που παρουσιάζεται εδώ υπολογίζει την PAEC, όταν η συγκέντρωση του ραδονίου είναι 1 Bq/m^3 , λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή F.

Η έκθεση ενός ατόμου στα θυγατρικά του ραδονίου προσδιορίζεται πολλαπλασιάζοντας τη συγκέντρωση δυνητικής ενέργειας άλφα (PAEC, σε J/m^3) με τη χρονική διάρκεια της έκθεσης (σε ώρες). Συνεπώς, η έκθεση εκφράζεται σε μονάδες $\text{J} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$. Δεδομένου ότι η PAEC συνήθως μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της περιόδου έκθεσης, η συνολική έκθεση πρέπει να υπολογίζεται ως ολοκλήρωμα ως προς τον χρόνο, όπως δείχνεται στη σχετική εξίσωση.

$$\text{Potential alpha energy exposure} = \int_0^T PAEC(t) dt$$

Η διάρκεια έκθεσης εκτιμάται σε ετήσια βάση. Ωστόσο, το άτομο εκτίθεται, συνήθως, μόνο για ένα ποσοστό του συνολικού χρόνου. Αν αυτό το ποσοστό δεν είναι γνωστό, είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται προκαθορισμένες (τυπικές) τιμές:

- 80% (7000 ώρες/έτος) για κατοικίες και
- 23% (2000 ώρες/έτος) για χώρους εργασίας.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η χρήση αυτών των προκαθορισμένων τιμών ενδέχεται να οδηγήσει σε συντηρητική εκτίμηση της ετήσιας έκθεσης.

Υπάρχει μια εναλλακτική μέθοδος αναφοράς στη συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα. Εάν η συγκέντρωση του ραδονίου (σε Bq/m^3) πολλαπλασιαστεί με τον συντελεστή ισορροπίας F, το προκύπτον μέγεθος ονομάζεται ισοδύναμη

συγκέντρωση ισορροπίας (Equilibrium Equivalent Concentration – EEC) του ραδονίου (εκφρασμένο επίσης σε μονάδες Bq/m³).

Η EEC ορίζεται ως η συγκέντρωση του ραδονίου που, αν βρισκόταν σε ισορροπία με τα θυγατρικά, θα παρήγαγε την ίδια συγκέντρωση δυνητικής ενέργειας άλφα (PAEC) με αυτή που αποδίδεται στο πραγματικό, μη ισορροπημένο μείγμα.

$$PAEC \text{ (in J/m}^3\text{)} = 5.56 \times EEC \text{ (in Bq/m}^3\text{)}$$

Η παραπάνω εξίσωση προσδιορίζει τη μαθηματική σχέση μεταξύ της PAEC και της EEC.

Με παρόμοιο τρόπο, η έκθεση στα θυγατρικά του ραδονίου μπορεί να εκφραστεί ως «ισοδύναμη έκθεση ισορροπίας» (equilibrium equivalent exposure), με μονάδες Bq·h·m⁻³, όπως φαίνεται στην αντίστοιχη εξίσωση.

$$\text{Equilibrium equivalent exposure} = \int_0^T EEC(t) dt$$

Η επιλογή μεταξύ της δυνητικής έκθεσης σε ενέργεια άλφα (potential alpha energy exposure) ή της ισοδύναμης έκθεσης ισορροπίας (equilibrium equivalent exposure) δεν είναι κρίσιμη, καθώς οι δύο αυτές ποσότητες σχετίζονται απλά με έναν σταθερό συντελεστή ίσο με 5.56×10^{-9} (J·h·m⁻³) ανά (Bq·h·m⁻³).

1.3. Μεταφορά ραδονίου

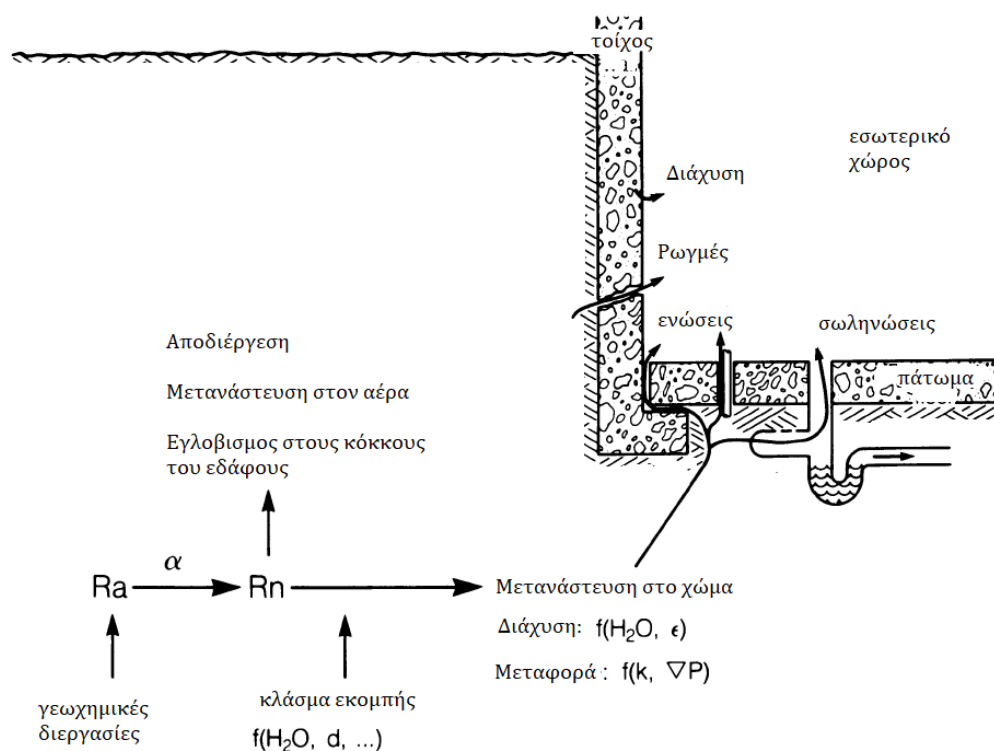
Στον ακόλουθο πίνακα 4 παρουσιάζονται ενδεικτικές συγκεντρώσεις ραδονίου σε διάφορες τοποθεσίες. Δεδομένου ότι το ραδόνιο προέρχεται από τη διάσπαση του ραδίου στους κόκκους του εδάφους, παρατηρούμε ότι ένα μικρό μέρος του απελευθερώνεται και μετακινείται μέσω των πόρων του εδάφους στην ατμόσφαιρα, το μεγαλύτερο μέρος αυτού διασπάται πριν προλάβει να μεταφερθεί με τον άνεμο στον ωκεανό. Οι κατοικίες βρίσκονται μεταξύ του εδάφους και της ατμοσφαιράς, όποτε οι συγκεντρώσεις που συναντάμε είναι μεταξύ του γεωαερίου και της ατμόσφαιρας.

Πίνακας 4. Συγκεντρώσεις ραδονίου σε διάφορες τοποθεσίες.

Τοποθεσία	Συγκέντρωση (atoms cm ⁻³)
Πάνω από τους ωκεανούς	0,04

Κοντά στην επιφάνεια της Γης	4
Τυπική κατοικία	20
Γεωαέριο	20000
Ορυχείο	500000

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την παραγωγή και τη μετανάστευση του ραδονίου μέσω των εδαφών και μέσα στα κτίρια απεικονίζονται στο Σχήμα 3. Οι γεωχημικές διεργασίες επηρεάζουν τη συγκέντρωση ραδίου στο έδαφος. Το κλάσμα εκπομπής (emanating fraction) εξαρτάται κυρίως από την υγρασία του εδάφους (H_2O) και την κατανομή των κόκκων του εδάφους (d). Η διάχυση του ραδονίου μέσω του εδάφους επηρεάζεται πρωτίστως από το πορώδες του εδάφους (ϵ) και την περιεκτικότητα σε υγρασία, ενώ η μεταφορά του αερίου εξαρτάται κυρίως από τη διαπερατότητα του εδάφους (k) και τη βαθμίδα πίεσης (∇P) που δημιουργείται στο κτίριο [16].



Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση των παραγόντων που επηρεάζουν την παραγωγή και τη μετανάστευση του ραδονίου στα εδάφη και στο εσωτερικό των κτιρίων [16].

Η περιεκτικότητα ραδίου των επιφανειακών εδαφών που δεν σχετίζονται με την εξόρυξη ή την επεξεργασία του ουρανίου ποικίλλει κατά λίγο περισσότερο από μία τάξη μεγέθους, με τυπική τιμή περίπου 40 Bq kg^{-1} . Στις περιοχές κοντά σε ορυχεία ή εγκαταστάσεις κατεργασίας ουρανίου, έχει παρατηρηθεί πολύ μεγαλύτερη

διακύμανση της συγκέντρωσης ραδίου στο έδαφος. Το έδαφος είναι ένα μείγμα πετρωμάτων, αέρα και συνήθως νερού και οργανικής ύλης. Η συγκέντρωση του ραδίου στο έδαφος συχνά αντανακλά τη συγκέντρωση ραδίου των πετρωμάτων. Οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται από ~ 0 έως 20 Bq kg^{-1} για υπερβασικά πετρώματα (δουνίτης) και από 1 έως 1835 Bq kg^{-1} για πυριγενή μεταμορφωμένα πετρώματα (γνεύσιος)[17]. Αν και οι διακυμάνσεις αυτές στα πετρώματα είναι ευρύτερες σε σχέση με αυτές που παρατηρούνται στα εδάφη, οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων για τα πετρώματα (εξαιρουμένων των αλκαλικών πετρωμάτων) είναι συνεπείς με τις μέσες τιμές που παρατηρούνται στα εδάφη.

Κατά τη διάσπαση του ραδίου παράγονται ένα σωματίδιο α ενέργειας $4,871 \text{ MeV}$ και ένα άτομο ραδονίου με κινητική ενέργεια 86 keV . Η απόσταση που διασχίζει το ανακρουόμενο (recoil) άτομο εξαρτάται από τη σύσταση και την πυκνότητα των υλικών που συναντά στην πορεία του.

Τυπικά αποστάσεις του ανακρουόμενου ατόμου είναι:

- $60 \mu\text{m}$ στον αέρα,
- 75 nm στο νερό,
- 35 nm σε κρυσταλλικά υλικά (πετρώματα).

Υπάρχουν αρκετές πιθανές καταλήξεις για το ανακρουόμενο άτομο. Μπορεί να σταματήσει μέσα στο πέτρωμα από όπου ξεκίνησε ή να ενσωματωθεί σε γειτονικό πέτρωμα. Η διάχυση του ραδονίου από το πέτρωμα είναι εξαιρετικά αργή, ωστόσο υπάρχουν κάποιες ενδείξεις ότι η διάχυση μέσα από το κανάλι του υλικού που έχει αλλοιωθεί από τη διέλευση της ανάκρουσης συμβαίνει πιο γρήγορα [18]. Μια άλλη πιθανότητα είναι το ραδόνιο να τερματίσει την ανάκρουσή του στο νερό του εδάφους. Το νερό, ως πολύ αποτελεσματικός απορροφητής ανάκρουσης, είναι μια σημαντική μεταβλητή για τον προσδιορισμό της ποσότητας του ραδονίου που είναι παρόν στο έδαφος.

Ο λόγος του ραδονίου που διαχέεται προς το συνολικά παραγόμενο ραδόνιο ορίζεται ως κλάσμα εκπομπής ή συντελεστή εκπομπής (emanating fraction or emanation coefficient) [19]. Το εύρος των τιμών του συντελεστή εκπομπής κυμαίνεται μεταξύ 0.05 και 0.7 με τυπική τιμή 0.25 [16]. Ο συντελεστής εκπομπής για τα ξηρά υλικά είναι περίπου 4 φορές μικρότερος σε σύγκριση με τον αντίστοιχο συντελεστή σε συνθήκες

κορεσμού με νερό. Καθώς προστίθεται υγρασία σε ένα ξηρό υλικό αρχικά ο συντελεστής διάχυσης αυξάνεται ραγδαία, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός μειώνεται.

Κεφάλαιο 2ο: Έκθεση στο ραδόνιο

Η εκτίμηση του κινδύνου από την έκθεση στο ραδόνιο και τα βραχύβια θυγατρικά του αποτελεί έναν από τους θεμελιώδεις άξονες της ραδιολογικής προστασίας του πληθυσμού. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν διαμορφωθεί δύο διακριτές αλλά συμπληρωματικές προσεγγίσεις: η επιδημιολογική και η δοσιμετρική. Η καθεμία προσεγγίζει τον προσδιορισμό του κινδύνου με διαφορετική μεθοδολογία και θεωρητική βάση, αντανakλώντας τόσο την εξέλιξη της επιστημονικής γνώσης όσο και τις ανάγκες για ακριβέστερη εκτίμηση της δόσης.

2.1. Επιδημιολογική και δοσιμετρική προσέγγιση

Η επιδημιολογική προσέγγιση βασίζεται στην ανάλυση πληθυσμιακών δεδομένων από άτομα που έχουν εκτεθεί σε ραδόνιο, κυρίως εργαζομένων σε υπόγεια ορυχεία ουρανίου, αλλά και σε μελέτες σε οικιακά περιβάλλοντα. Η βασική της αρχή έγκειται στην παρατήρηση της συσχέτισης μεταξύ της σωρευτικής έκθεσης στα θυγατρικά του ραδονίου και της εμφάνισης επιπτώσεων στην υγεία, με έμφαση στον καρκίνο του πνεύμονα.

Το μοντέλο που υιοθετήθηκε στο ICRP Publication 66 (1994) αντλεί τα βασικά του πορίσματα από επιδημιολογικές μελέτες σε ανθρακωρύχους, στις οποίες έγινε εκτίμηση της σχετικής επικινδυνότητας (Relative Risk) και του υπερβάλλοντος σχετικού κινδύνου (Excess Relative Risk – ERR). Η προσέγγιση αυτή είναι εμπειρική, αλλά βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα ανθρώπινης έκθεσης, ενισχύοντας τη βιολογική εγκυρότητα των εκτιμήσεων. Ωστόσο, η εφαρμογή της σε γενικούς πληθυσμούς είναι περιορισμένη, λόγω των σημαντικών διαφορών στις συνθήκες έκθεσης (π.χ. συγκεντρώσεις ραδονίου, αερισμός, συνθήκες εργασίας) μεταξύ των ανθρακωρύχων και του γενικού πληθυσμού.

Σε αντίθεση με την επιδημιολογική, η δοσιμετρική προσέγγιση βασίζεται σε μοντέλα εσωτερικής έκθεσης και στην εφαρμογή βιοκινητικών και φυσιολογικών παραμέτρων για την υπολογιστική εκτίμηση της απορροφούμενης δόσης από τα ραδιενεργά προϊόντα του ραδονίου στο αναπνευστικό σύστημα. Το θεωρητικό υπόβαθρο αυτής της προσέγγισης βασίζεται στο μοντέλο του αναπνευστικού συστήματος της ICRP

(Human Respiratory Tract Model – HRTM), το οποίο παρουσιάζεται εκτενώς παρακάτω.

Η σημαντική μετάβαση στη χρήση της δοσιμετρικής προσέγγισης σημειώθηκε με τη δημοσίευση του ICRP Publication 137 (2017), στο οποίο εφαρμόζεται αναλυτικά η δοσιμετρική μεθοδολογία για τον υπολογισμό συντελεστών μετατροπής δόσης (Dose Conversion Factors – DCF). Αυτοί οι συντελεστές εκφράζουν την ενεργό δόση σε mSv ανά μονάδα συγκέντρωσης ραδονίου και χρόνου έκθεσης (συνήθως σε mSv per Bq·h·m⁻³), επιτρέποντας την ποσοτική εκτίμηση της δόσης βάσει μετρούμενων επιπέδων συγκέντρωσης ραδονίου σε κλειστούς χώρους.

2.2. Η έννοια της δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας

Καθώς η ακτινοβολία διέρχεται μέσα από την ύλη ένα μέρος της ενέργειας απορροφάται. Στην περίπτωση των βιολογικών ιστών η ενέργεια που απορροφάται προκαλεί φυσικά, χημικά, βιοχημικά και βιολογικά αποτελέσματα.

Η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα μάζας ορίζεται ως **απορροφούμενη δόση D** και η μονάδα μέτρησής της είναι το gray (Gy). Ένα gray ορίζεται ως 1 Joule ενέργειας που απορροφάται σε 1 κιλό. Ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης εκφράζεται ανά μονάδα χρόνου (Gy h⁻¹)[20].

Κάθε είδος ακτινοβολίας αλληλεπιδρά με τον ιστό ή το όργανο και μπορεί να προκαλέσει βλάβη. Η βλάβη που θα προκληθεί εξαρτάται από τη γραμμική μεταφορά ενέργειας (LET) της ακτινοβολίας. Η LET (Linear Energy Transfer) είναι η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρει ένα φορτισμένο σωματίδιο στο υλικό από το οποίο διέρχεται ανά μονάδα μήκους. Το μέγεθος LET ποσοτικοποιεί την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα διαδρομής της ακτινοβολίας στην ύλη, η οποία είναι ενδεικτική της απορρόφησης ενέργειας, ή ισοδύναμα της πυκνότητας ιονισμών ανά μονάδα διαδρομής των σωματιδίων της ακτινοβολίας σε ένα υλικό. Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι ακτινοβολία με μεγάλο LET έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να πλήξει τον εξαιρετικά μικρών διαστάσεων στόχο του DNA. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η βιολογική επιβάρυνση που προκαλεί η ακτινοβολία σε έναν ιστό ή όργανο χρησιμοποιείται η έννοια της ισοδύναμης δόσης. Η **ισοδύναμη δόση H_e** ορίζεται ως το γινόμενο της

απορροφούμενης δόσης D επί του συντελεστή στάθμισης W_R και δίνεται από τον τύπο:

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ είναι η απορροφούμενη μέση δόση σε ιστό ή όργανο T , λόγω της ακτινοβολίας R και w_R είναι ο συντελεστής στάθμισης ακτινοβολίας (Πίνακας 5). Η μονάδα μέτρησης είναι το Sievert (Sv). Όταν το πεδίο ακτινοβολίας αποτελείται από διαφορετικά είδη και ενέργειες με διαφορετικές τιμές του w_R , η συνολική ισοδύναμη δόση, H_T , δίνεται από τον τύπο[21]:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

Πίνακας 5. Συντελεστές στάθμισης της ακτινοβολίας W_R [22]

Τύπος ακτινοβολίας	Συντελεστής βαρύτητας ακτινοβολίας, w_R
Φωτόνια	1
Ηλεκτρόνια και μίονια	1
Πρωτόνια και φορτισμένα πιόνια	2
Σωματίδια άλφα, θραύσματα σχάσης, βαρέα ιόντα	20
Νετρόνια	Συνεχής συνάρτηση της ενέργειας του νετρονίου

Για μια συγκεκριμένη ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας H_T , οι διάφοροι ιστοί του ανθρώπινου σώματος συνεισφέρουν με διαφορετικό βαθμό στον συνολικό κίνδυνο για την υγεία. Για παράδειγμα, η ακτινοβόληση του αιμοποιητικού ιστού ενέχει μεγαλύτερο κίνδυνο σε σύγκριση με την ακτινοβόληση του θυρεοειδούς με την ίδια ισοδύναμη δόση H_t , ενώ η τελευταία είναι πιο επικίνδυνη σε σχέση με την ακτινοβόληση του δέρματος. Όταν η ισοδύναμη δόση σε έναν ιστό πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή στάθμισης W_T , που χαρακτηρίζει την έκθεση του ιστού, προκύπτει μια νέα ποσότητα που συμβάλλει στην εκτίμηση του συνολικού κινδύνου ακτινοβόλησης του συγκεκριμένου ιστού, γνωστή ως ενεργός δόση E_{eff} .

Η ενεργός δόση σχετίζεται με την πιθανότητα εμφάνισης στοχαστικών επιπτώσεων, δηλαδή με τη συνολική βλάβη που μπορεί να προκαλέσει η ισοδύναμη δόση στην υγεία του ακτινοβοληθέντος ιστού, και υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{eff} = D \cdot W_R \cdot W_T$$

Η μονάδα μέτρησης της ενεργού δόσης είναι το Sievert (Sv), ενώ οι τιμές του συντελεστή W_T για κάθε ιστό παρέχονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Συντελεστές στάθμισης του εκτιθέμενου ιστού W_T για τον υπολογισμό της ενεργού δόσης E_{eff} [22]

Ιστός	W_T	ΣW_T
Ερυθρός μυελός των οστών, Παχύ έντερο, Πνεύμονας, Στομάχι, Στήθος, Υπόλοιποι ιστοί*	0.12	0.72
Γονάδες	0.08	0.08
Ουροδόχος κύστη, Οισοφάγος, Ήπαρ, Θυρεοειδής	0.04	0.16
Επιφάνεια οστών, Εγκέφαλος, Σιελογόνοι αδένες, Δέρμα	0.01	0.04
Σύνολο		1.00

*Υπόλοιποι ιστοί: Επινεφρίδια, Εξωθωρακική περιοχή (ΕΤ), Χοληδόχος κύστη, Καρδιά, Νεφροί, Λεμφαδένες, Μύες, Βλεννογόνο στομάτος, Πάγκρεας, Προστάτης, Λεπτό έντερο, Σπλήνα, Θύμος αδένας, Μήτρα/τράχηλος.

Εάν εκτεθούν πολλαπλοί ιστοί σε ακτινοβολία, τότε η συνολική ενεργός δόση προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους ενεργών δόσεων των εκτεθειμένων ιστών:

$$E_{eff} = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

Η έννοια της ενεργού δόσης ισοδυναμεί με τη συνολική ισοδύναμη δόση σώματος H_b που θα έπρεπε να λάβει το άτομο για να αντιμετωπίσει τον ίδιο κίνδυνο εμφάνισης στοχαστικών αποτελεσμάτων και με εκείνον που προκύπτει από την τοπική ακτινοβολία ενός συγκεκριμένου ιστού με την αντίστοιχη ισοδύναμη δόση.

2.3. Δοσιμετρία – εσωτερική δοσιμετρία

Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με τον ανθρώπινο οργανισμό απαιτεί την ακριβή ποσοτικοποίηση της απορροφούμενης δόσης, τόσο για την εκτίμηση του κινδύνου όσο και για την προστασία της υγείας. Η δοσιμετρία είναι το εργαλείο που επιτρέπει αυτή την ποσοτικοποίηση, καθώς συνδέει την παρουσία ραδιενεργών πηγών με τις βιολογικές τους επιπτώσεις.

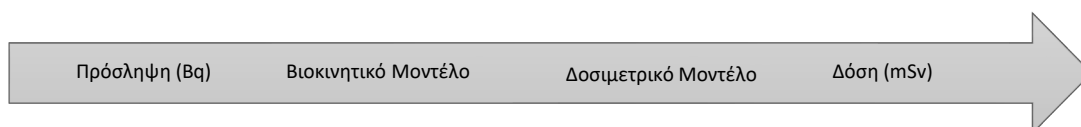
Η δοσιμετρία αποτελεί θεμελιώδη επιστημονικό κλάδο της ακτινοπροστασίας και της ιατρικής φυσικής, ο οποίος ασχολείται με τη μέτρηση και εκτίμηση της απορροφούμενης δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας από τον ανθρώπινο οργανισμό ή άλλα βιολογικά συστήματα. Οι κυριότερες κατηγορίες δοσιμετρίας διακρίνονται σε εξωτερική δοσιμετρία, που αφορά την ακτινοβολήση από εξωτερικές πηγές ακτινοβολίας, και εσωτερική δοσιμετρία, η οποία ασχολείται με την εκτίμηση της δόσης που απορροφάται από ραδιενεργές ουσίες που έχουν εισέλθει εντός του σώματος, κυρίως μέσω της εισπνοής, της κατάποσης ή της δερματικής απορρόφησης. Συμπληρωματικά, η βιοδοσιμετρία χρησιμοποιεί βιολογικούς δείκτες για την εκτίμηση της απορροφούμενης δόσης, ιδίως σε περιπτώσεις ατυχημάτων ή ανεπαρκών φυσικών μετρήσεων.

Η εσωτερική δοσιμετρία αποτελεί εξειδικευμένο υποκλάδο της δοσιμετρίας, εστιάζοντας στη μελέτη και μοντελοποίηση της συμπεριφοράς ραδιονουκλιδίων που έχουν εισέλθει εντός του ανθρώπινου σώματος. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της κατανομής και της απορροφούμενης δόσης σε επιμέρους όργανα και ιστούς, συμβάλλοντας στην εκτίμηση του βιολογικού αποτελέσματος της έκθεσης.

Η εσωτερική δοσιμετρία ξεκινά με το βιοκινητικό μοντέλο για την κατανόηση της συμπεριφοράς των ραδιονουκλιδίων στο σώμα, και στη συνέχεια, το δοσιμετρικό μοντέλο υπολογίζει τη δόση. Αυτά τα στάδια είναι απαραίτητα για την ακριβή εκτίμηση της εσωτερικής έκθεσης σε ακτινοβολία και τη διαχείριση των κινδύνων που σχετίζονται με αυτήν. Αναλυτικά τα στάδια της εσωτερικής δοσιμετρίας είναι:

1. Πρόσληψη Ραδιονουκλιδίων: Το πρώτο στάδιο είναι ο προσδιορισμός της ποσότητας των ραδιονουκλιδίων που εισήλθαν στο σώμα μέσω εισπνοής, κατάποσης, απορρόφησης μέσω του δέρματος ή πληγής. Αυτή η εκτίμηση βασίζεται σε μετρήσεις όπως βιολογικά δείγματα (π.χ. ούρα, αίμα), περιβαλλοντικές μετρήσεις ή μοντέλα πρόσληψης.
2. Βιοκινητικό Μοντέλο: Το βιοκινητικό μοντέλο περιγράφει τη μετακίνηση των ραδιονουκλιδίων στο σώμα. Περιλαμβάνει:
 - Την απορρόφηση (Absorption), μετά την πρόσληψη, τα ραδιονουκλίδια απορροφώνται στο αίμα από το σημείο εισόδου (π.χ. οι πνεύμονες για την εισπνοή ή το γαστρεντερικό σύστημα για την κατάποση).

- Την κατανομή (Distribution), τα ραδιονουκλίδια μεταφέρονται μέσω του αίματος σε διάφορα όργανα και ιστούς. Η κατανομή εξαρτάται από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ραδιονουκλιδίων, καθώς και από τη φυσιολογία του οργανισμού.
 - Τον μεταβολισμό (Metabolism), ορισμένα ραδιονουκλίδια μπορεί να μεταβολίζονται ή να συμμετέχουν σε βιοχημικές διεργασίες, επηρεάζοντας τη βιολογική τους συμπεριφορά και την παραμονή τους στο σώμα.
 - Την αποβολή (Excretion), τα ραδιονουκλίδια αποβάλλονται από το σώμα μέσω διαφόρων οδών, όπως τα ούρα, τα κόπρανα, ο ιδρώτας ή η εκπνοή. Ο ρυθμός αποβολής επηρεάζεται από τη φύση του ραδιονουκλιδίου και την οδό πρόσληψης.
 - Την κατακράτηση (Retention), που είναι ο χρόνος που ένα ραδιονουκλίδιο παραμένει στο σώμα ή σε συγκεκριμένα όργανα είναι γνωστός ως βιολογικός χρόνος ημίσειας ζωής. Παρέχει πληροφορίες για το πού βρίσκονται τα ραδιονουκλίδια σε διάφορα όργανα και ιστούς με την πάροδο του χρόνου.
3. Δοσιμετρικό Μοντέλο: Το δοσιμετρικό μοντέλο χρησιμοποιεί τα δεδομένα από το βιοκινητικό μοντέλο για να υπολογίσει τη δόση ακτινοβολίας που λαμβάνουν τα όργανα και οι ιστοί. Εξετάζει την ενεργειακή εναπόθεση από τη διάσπαση των ραδιονουκλιδίων.
 4. Υπολογισμός Δόσεων: Με βάση το δοσιμετρικό μοντέλο, υπολογίζεται η δόση που απορροφάται από συγκεκριμένα όργανα και ιστούς. Αυτό περιλαμβάνει τη δόση οργάνου (dose to an organ) και τη συνολική ενεργό δόση (effective dose).



2.3.1. Βιοκινητικό μοντέλο του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος (HRTM)

Σύμφωνα με το ICRP, υπάρχουν αρκετά βιοκινητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη συμπεριφορά των ραδιονουκλιδίων στο ανθρώπινο σώμα. Αυτά τα μοντέλα συνήθως κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τύπο του

ραδιονουκλιδίου, τον τρόπο εισόδου στον οργανισμό και τα συγκεκριμένα όργανα ή συστήματα που επηρεάζουν. Αρκετά βιοκινητικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί, όπως τ (ICRP 66 και 130) που περιγράφει την απορρόφηση, την παραμονή και την αποβολή των εισπνεόμενων ραδιονουκλιδίων στο αναπνευστικό σύστημα. Το Μοντέλο Ανθρώπινου Γαστρεντερικού Συστήματος (Human Alimentary Tract Model (HATM)) (ICRP 30 και 100), αυτό το μοντέλο καλύπτει την απορρόφηση και κατανομή των ραδιονουκλιδίων μετά την κατάποση και την κίνησή τους μέσω του γαστρεντερικού συστήματος. Τα Συστηματικά Μοντέλα (ICRP 67 και 78) που περιγράφουν την κατανομή των ραδιονουκλιδίων σε διάφορα όργανα και ιστούς, αφού εισχωρήσουν στο αίμα. Αυτό περιλαμβάνει το σκελετικό σύστημα, το ήπαρ, τα νεφρά και άλλα όργανα. Καθώς και βιοκινητικά μοντέλα για συγκεκριμένα ραδιονουκλίδια (π.χ. ιώδιο, ράδιο, πλουτώνιο).

Για την εκτίμηση της δόσης στον άνθρωπο από το ραδόνιο χρησιμοποιείται το βιοκινητικό μοντέλο του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος που περιγράφει πώς το ραδόνιο και τα θυγατρικά συμπεριφέρονται κατά την εισπνοή τους.

Το Μοντέλο Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος μπορεί να υποδιαιρεθεί σε μια σειρά επί μέρους μοντέλων, το καθένα από τα οποία περιγράφει μια διαφορετική πτυχή της διαδικασίας, αλλά συνδέεται στενά με τα υπόλοιπα:

- Το μορφομετρικό μοντέλο περιγράφει τις περιοχές στις οποίες υποδιαιρείται το αναπνευστικό σύστημα για σκοπούς μοντελοποίησης, καθώς και τα μεγέθη και τα σχήματα των οργάνων και ιστών, κυρίως των αεραγωγών.
- Το φυσιολογικό μοντέλο περιγράφει τις παραμέτρους της αναπνοής, οι οποίες καθορίζουν την ποσότητα των ραδιονουκλιδίων που εισπνέονται και εξαρτώνται από την ηλικία, το μέγεθος του σώματος και το επίπεδο σωματικής δραστηριότητας (άσκηση).
- Το μοντέλο εναπόθεσης (deposition) αξιολογεί το ποσοστό των εισπνεόμενων σωματιδίων που αποτίθεται σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος.
- Το μοντέλο απομάκρυνσης (clearance) ποσοτικοποιεί την κατακράτηση (retention) της αποτιθέμενης δραστηριότητας σε κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος και την απομάκρυνση προς άλλα όργανα, μέσω τριών διαδικασιών απομάκρυνσης:
 - απομάκρυνση από τη μύτη (π.χ. φύσημα μύτης)

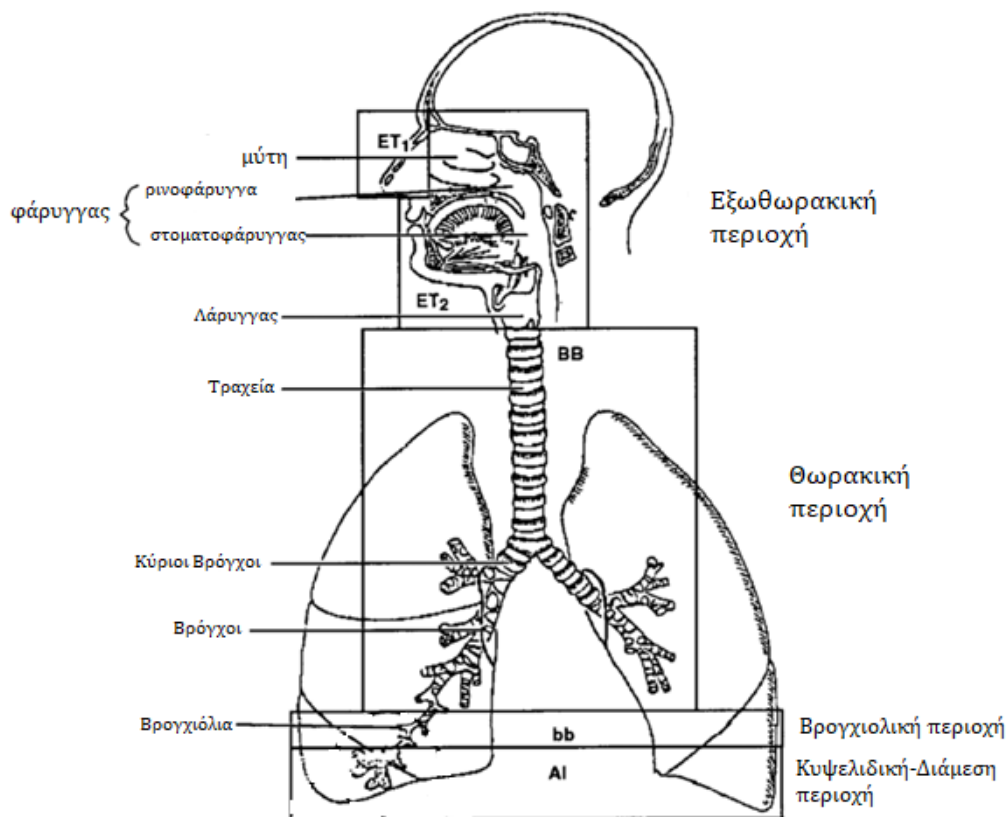
- μεταφορά σωματιδίων προς το γαστρεντερικό σύστημα και τους λεμφαδένες και
- απορρόφηση δραστηριότητας στο αίμα και σε άλλα σωματικά υγρά.

Τα αέρια και οι ατμοί επίσης εξετάζονται.

- Το δοσιμετρικό μοντέλο επιτρέπει τον υπολογισμό των δόσεων στις διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. [23]

Μορφομετρικό μοντέλο

Το ICRP 66 εισάγει το HRTM, το οποίο έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει την εναπόθεση (deposition), απομάκρυνση (clearance) και μεταφορά (translocation) των εισπνεόμενων σωματιδίων και αερίων. Στη συνέχεια το ICRP 130 επεκτείνει το HRTM, για να παρέχει επικαιροποιημένους συντελεστές δόσης για επαγγελματική έκθεση. Το μοντέλο χωρίζει το αναπνευστικό σύστημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4, στις ακόλουθες περιοχές:



Σχήμα 4. Περιοχές του αναπνευστικού συστήματος όπως ορίζονται στο Μοντέλο του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος[24]

Εξωθωρακική περιοχή :ET1: Μύτη / Ρινοφάρυγγας

ET2: Στοματοφάρυγγας / Λάρυγγας

LNET: Λεμφαδένες εξωθωρακικής περιοχής

Θωρακική περιοχή :Βρογχική περιοχή (BB): Τραχεία και κύριοι βρόγχοι

Βρογχιολική περιοχή (bb): Τελικά βρογχιόλια

Κυψελιδική-διάμεση περιοχή (AI): Κυψελιδική περιοχή

Λεμφαδένες θωρακικής περιοχής (LNTH)

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη το μέγεθος των σωματιδίων, τη διαλυτότητα και τις χημικές ιδιότητες, που επηρεάζουν τον τρόπο εναπόθεσης και απομάκρυνσης των ραδιονουκλιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. Περιλαμβάνει, επίσης, μηχανισμούς για την απομάκρυνση μέσω της βλεννογόνου, την απορρόφηση στο αίμα και τη μεταφορά στον γαστρεντερικό σωλήνα.

Φυσιολογικό μοντέλο

Ο ρυθμός και ο όγκος του αέρα που αναπνέουμε, καθώς και ο λόγος του αέρα που εισέρχεται από τη μύτη προς αυτόν που εισέρχεται από το στόμα καθορίζουν την ποσότητα των ραδιονουκλιδίων που εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα. Παράγοντες που επηρεάζουν το αναπνευστικό σύστημα είναι το μέγεθός του σώματος, το επίπεδο δραστηριότητας, οι ασθένειες του αναπνευστικού και το κάπνισμα. Οι τιμές αναφοράς σε διαφορετικά επίπεδα δραστηριότητας, σύμφωνα με το φυσιολογικό μοντέλο του ICRP 66 (pg 24) παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7. Τιμές Αναφοράς Αναπνευστικών Παραμέτρων για τον Γενικό Καυκάσιο Πληθυσμό σε Διαφορετικά Επίπεδα Δραστηριότητας[25] .

Επίπεδο Δραστηριότητας	Παράμετρος	3 Μηνών	1 Έτους	5 Ετών (Αγόρι)	5 Ετών (Κορίτσι)	10 Ετών (Αγόρι)	10 Ετών (Κορίτσι)	15 Ετών (Αγόρι)	15 Ετών (Κορίτσι)	Ενήλικας (Αγόρι)	Ενήλικας (Κορίτσι)
Ανάπαυση (8%)	VT (L)	0.04	0.07	0.3	0.5	0.417	0.625	0.444	—	—	—
	B (m ³ /h)	0.09	0.15	0.31	0.42	0.35	0.45	0.32	—	—	—
	fR (/min)	38	34	17	14	14	12	12	—	—	—
Καθιστή εγρήγορση (12%)	VT (L)	NA	0.10	0.33	0.533	0.417	0.750	0.464	—	—	—
	B (m ³ /h)	NA	0.22	0.38	0.48	0.40	0.54	0.39	—	—	—
	fR (/min)	NA	36	19	15	16	12	14	—	—	—
Ήπια άσκηση (32%)	VT (L)	0.07	0.13	0.58	1.0	0.903	1.25	0.992	—	—	—
	B (m ³ /h)	0.19	0.35	1.12	1.38	1.30	1.50	1.25	—	—	—
	fR (/min)	48	46	32	23	24	20	21	—	—	—
Έντονη άσκηση (64%)	VT (L)	NA	NA	—	—	1.352	1.127	1.923	1.364	0.841	0.667
	B (m ³ /h)	NA	NA	—	—	2.92	2.57	3.00	2.70	2.22	1.84
	fR (/min)	NA	NA	—	—	36	38	26	33	44	46

Μοντέλο εναπόθεσης (deposition)

Για την εκτίμηση της δόσης από εισπνεόμενα ραδιονουκλίδια, είναι απαραίτητο να κατανοηθεί ο τρόπος με τον οποίο τα σωματίδια εναποτίθενται στις διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Το μοντέλο εναπόθεσης περιλαμβάνει τους βασικούς φυσικοχημικούς και φυσιολογικούς παράγοντες που επηρεάζουν αυτή τη διαδικασία και καθορίζουν την τελική κατανομή της ραδιενεργού ύλης. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που καθορίζουν την εναπόθεση των σωματιδίων είναι οι εξής:

Γεωμετρική Διάμετρος των Αερολυμάτων: Αναφέρεται στο μέγεθος των εισπνεόμενων σωματιδίων, το οποίο μετράται συνήθως σε μικρόμετρα (μm). Τα αερολύματα με διάμετρο στην περιοχή των 0.1 έως 10 μm είναι πιο πιθανό να εναποτεθούν στους πνεύμονες, ενώ τα μικρότερα σωματίδια μπορούν να φτάσουν σε πιο βαθιά μέρη του αναπνευστικού συστήματος ή να εκπνευστούν χωρίς να κατακρατηθούν. Η εναπόθεση εξαρτάται από παράγοντες όπως το μέγεθος, το σχήμα των σωματιδίων και το πώς αλληλεπιδρούν με τη ροή του αέρα στο αναπνευστικό σύστημα. Για την ποσοτική περιγραφή της εναπόθεσης ραδιενεργών αερολυμάτων, το ICRP έχει θεσπίσει την έννοια της Διάμεσης Αεροδυναμικής διαμέτρου της ενεργότητας (Activity Median Aerodynamic Diameter – AMAD). Το AMAD ορίζεται ως η αεροδυναμική διάμετρος της σφαίρας μοναδιαίας πυκνότητας (1 g/cm^3) που έχει την ίδια τελική ταχύτητα καθίζησης με το διάμεσο της κατανομής της ενεργότητας των σωματιδίων. Με άλλα λόγια, το AMAD είναι η διάμετρος για την οποία το 50% της συνολικής ραδιενεργού ενεργότητας βρίσκεται σε σωματίδια μικρότερα από αυτήν και το υπόλοιπο 50% σε μεγαλύτερα σωματίδια.

Η έννοια αυτή είναι κομβικής σημασίας για τη δοσιμετρική εκτίμηση, καθώς το μέγεθος των σωματιδίων επηρεάζει άμεσα το βάθος διείσδυσης και το σημείο εναπόθεσης στον πνεύμονα, και συνεπώς και την προσλαμβανόμενη δόση. Στο μοντέλο του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος του ICRP (HRTM), η τυπική αναφορά για το AMAD είναι 5 μm , τιμή που αντιστοιχεί σε συνθήκες επαγγελματικής έκθεσης, όπως π.χ. σε ορυχεία ουρανίου ή βιομηχανίες πυρηνικών υλικών.

Ωστόσο, σε περιβαλλοντικές συνθήκες, οι τυπικές τιμές του AMAD είναι συνήθως μικρότερες και κυμαίνονται μεταξύ 0.6–1.5 μm , με συχνότερη τιμή αναφοράς το 1 μm .

Οι χαμηλότερες αυτές τιμές αντανακλούν την παρουσία μικρότερων σωματιδίων στον αέρα, όπως αυτά που προέρχονται από την αποικοδόμηση του ραδονίου (θυγατρικά προϊόντα ^{222}Rn), τα οποία προσκολλώνται σε υπάρχοντα αερολύματα.

Η χρήση του AMAD στις δοσιμετρικές μελέτες είναι απαραίτητη για την ακριβή μοντελοποίηση της εναπόθεσης και της επακόλουθης κατακράτησης και απομάκρυνσης των ραδιονουκλιδίων από το αναπνευστικό σύστημα. Επίσης, το AMAD επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων έκθεσης και τη χρήση προτυποποιημένων παραμέτρων σε υπολογιστικά μοντέλα (π.χ. dosimetric software που βασίζονται σε μοντέλα του ICRP).

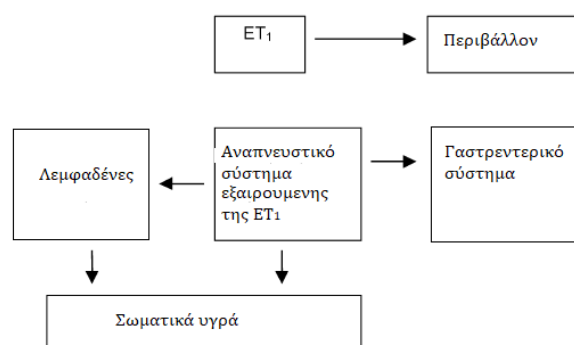
Πυκνότητα των Σωματιδίων: Η πυκνότητα των σωματιδίων επηρεάζει το πόσο μακριά μπορούν να ταξιδέψουν στο αναπνευστικό σύστημα. Τα σωματίδια με μεγαλύτερη πυκνότητα τείνουν να κατακάθονται πιο γρήγορα, εναποτίθενται νωρίτερα στις ανώτερες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος, ενώ τα πιο ελαφρά σωματίδια παραμένουν στον αέρα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και φτάνουν βαθύτερα στους πνεύμονες.

Ροή Όγκου (Ταχύτητα Αναπνοής): Ο ρυθμός ροής ή η «ταχύτητα» του αέρα κατά την εισπνοή επηρεάζει τη μεταφορά των σωματιδίων μέσω του αναπνευστικού συστήματος. Η ταχύτερη αναπνοή αυξάνει την πιθανότητα βαθύτερης εναπόθεσης, καθώς περισσότερος αέρας (και σωματίδια) φτάνει στους πνεύμονες. Οι φυσιολογικές αναπνευστικές συνήθειες σε σχέση με την ταχεία ή ρηχή αναπνοή μπορούν να επηρεάσουν την εναπόθεση των σωματιδίων.

Ποσοστό Ρινοφαρυγγικής/Στοματικής Αναπνοής: Ο τρόπος με τον οποίο ο αέρας εισέρχεται στο αναπνευστικό σύστημα (ρινική ή στοματική αναπνοή) επηρεάζει σημαντικά το πού καταλήγουν τα σωματίδια. Η ρινική αναπνοή είναι πιο αποτελεσματική στο φιλτράρισμα των σωματιδίων, με τη μύτη να λειτουργεί ως φυσικό εμπόδιο που παγιδεύει τα μεγαλύτερα σωματίδια, προτού φτάσουν στους πνεύμονες. Αντιθέτως, η στοματική αναπνοή παρακάμπτει αυτό το φιλτράρισμα, επιτρέποντας στα σωματίδια να φτάσουν πιο βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα.

Μοντέλο απομάκρυνσης (clearance)

Το HRTM περιγράφει λεπτομερώς τις οδούς απομάκρυνσης από το αναπνευστικό σύστημα (Σχήμα 5), οι οποίες βασίζονται σε τρεις βασικές διαδικασίες. Τα υλικά που εναποτίθενται στην περιοχή ET1 απομακρύνονται μέσω φυσήματος της μύτης και καθαρίσματος (σκούπισμα). Στις άλλες περιοχές, η απομάκρυνση προκύπτει από έναν συνδυασμό μετακίνησης σωματιδίων προς το γαστρεντερικό (GI) σύστημα και τους λεμφαδένες (μεταφορά σωματιδίων particle transport) και μετακίνησης ραδιονουκλιδίων από το αναπνευστικό σύστημα στο αίμα και, κατ' επέκταση, στα σωματικά υγρά [23].



Σχήμα 5. Οδοί απομάκρυνσης από το αναπνευστικό σύστημα[23]

Ο ρυθμός απομάκρυνσης των εναποτιθέμενων υλικών μέσω κάθε οδού εξαρτάται κυρίως από τρεις παράγοντες:

- Την τοποθεσία εντός του αναπνευστικού συστήματος όπου έχει εναποτεθεί το υλικό.
- Τη φυσικοχημική μορφή του υλικού.
- Τον χρόνο που έχει παρέλθει από την εναπόθεση.

Η βασική προσέγγιση του μοντέλου στηρίζεται στην υπόθεση ότι η απομάκρυνση από κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος αποτελεί ανταγωνιστική διαδικασία μεταξύ των μηχανισμών της μεταφοράς σωματιδίων (transport) και της απορρόφησης στο αίμα (absorption).

Η **μεταφορά σωματιδίων** αναφέρεται στις διαδικασίες που απομακρύνουν το υλικό από το αναπνευστικό σύστημα προς το γαστρεντερικό σύστημα (GI) και τους λεμφαδένες (LN), καθώς και στη μετακίνηση του υλικού εντός του αναπνευστικού συστήματος. Οι ρυθμοί με τους οποίους απομακρύνονται τα σωματίδια από το αναπνευστικό σύστημα καθορίζονται από τις συνεχείς βιολογικές διαδικασίες, όπως

η ροή υγρών πάνω από τις επιφάνειες των αεραγωγών, οι οποίες γενικά είναι ανεξάρτητες από τη χημική σύσταση ή την παρουσία του υλικού.

Η **απορρόφηση** αναφέρεται στη μετακίνηση του υλικού από το αναπνευστικό σύστημα προς την κυκλοφορία του αίματος, ανεξάρτητα από τον ακριβή μηχανισμό. Πρόκειται για μια διαδικασία δύο σταδίων:

- Τη διάσπαση (dissolution) των σωματιδίων σε μορφή διαλυτή και βιοδιαθέσιμη στα σωματικά υγρά,
- Την πρόσληψη (uptake) του διαλυτού υλικού και των προϊόντων διάσπασης στο αίμα.

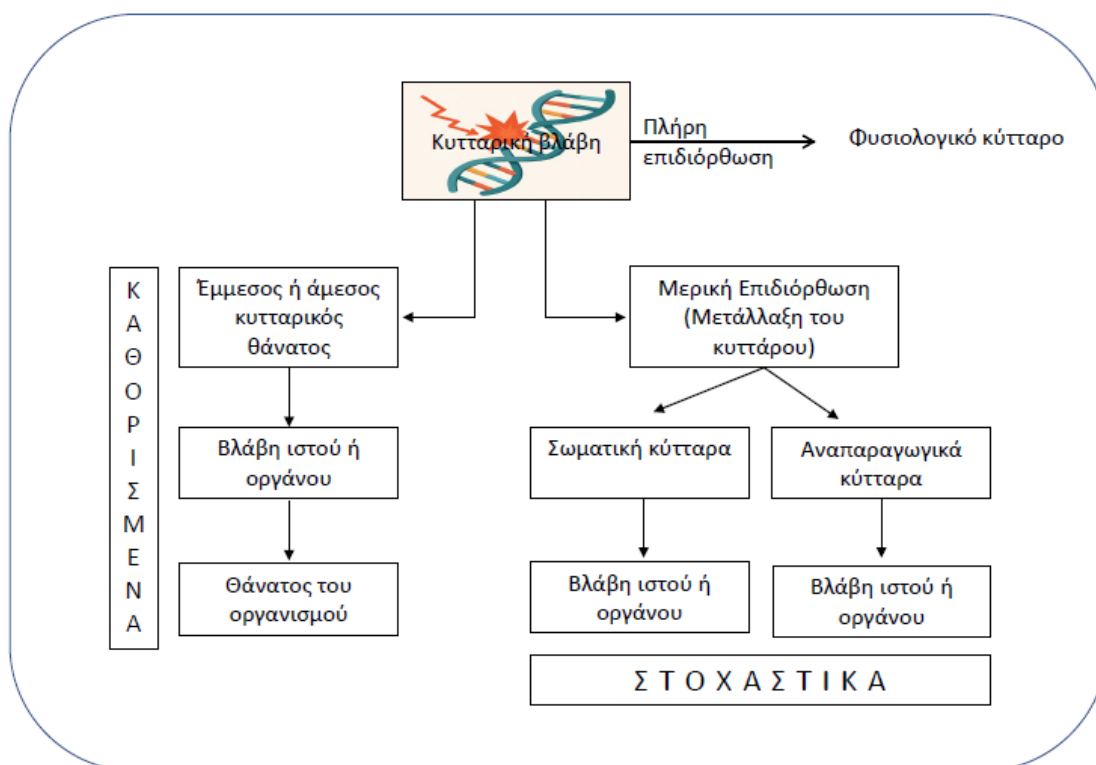
Οι ρυθμοί απομάκρυνσης σε κάθε στάδιο μπορεί να μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου.

Δοσιμετρικό μοντέλο

Τα μοντέλα εναπόθεσης και απομάκρυνσης που περιγράφηκαν παραπάνω επιτρέπουν τον προσδιορισμό της χρονικής και χωρικής κατανομής της ραδιενεργού δραστηριότητας σε ολόκληρο το αναπνευστικό σύστημα σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή μετά την εισπνοή. Το δοσιμετρικό μοντέλο καθιστά εφικτό τον υπολογισμό των απορροφούμενων δόσεων σε κάθε επιμέρους τμήμα του αναπνευστικού συστήματος. Σε τυπικές συνθήκες εφαρμογής, δεν προβλέπεται η ανάγκη τροποποίησης οποιασδήποτε από τις συναφείς παραμέτρους.

2.4. Επιπτώσεις της ραδιενέργειας στον άνθρωπο

Η έκθεση του ανθρώπου σε ιοντίζουσα ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει ποικίλες βιολογικές επιπτώσεις, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από το είδος και την ενεργειακή κατανομή της ακτινοβολίας, τη δόση, τον ρυθμό έκθεσης, καθώς και από την ατομική ευαισθησία των ιστών ή οργάνων που εκτίθενται. Η βιολογική απόκριση του οργανισμού σχετίζεται άμεσα με τις αλληλεπιδράσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με το βιολογικό υλικό και ιδιαίτερα με το DNA, προκαλώντας μοριακές βλάβες που είτε αποκαθίστανται είτε οδηγούν σε παθολογικές εξελίξεις. Οι επιδράσεις αυτές διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Το Σχήμα 6 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών κατηγοριών:



Σχήμα 6. Η ανεπιτυχής ή η μερική επιδιόρθωση της κυτταρικής βλάβης, μπορεί να οδηγήσει σε μία από τις δύο γενικές κατηγορίες των βιολογικών αποτελεσμάτων των ακτινοβολιών: τα καθορισμένα (για την περιοχή των μεγάλων δόσεων) και τα στοχαστικά αποτελέσματα.

- Καθορισμένα αποτελέσματα (deterministic effects), ή αλλιώς επιβλαβείς αντιδράσεις των ιστών, εμφανίζονται όταν η απορροφούμενη δόση υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι (threshold dose), πάνω από το οποίο παρατηρούνται λειτουργικές ή μορφολογικές βλάβες στους ιστούς [26]. Οι επιπτώσεις αυτές οφείλονται στη μαζική απώλεια ή σοβαρή δυσλειτουργία κυττάρων και χαρακτηρίζονται από αιτιοκρατικό χαρακτήρα, δηλαδή η σοβαρότητα της βλάβης αυξάνεται με την αύξηση της δόσης. Οι κυριότερες πηγές δεδομένων για την κατανόηση των καθορισμένων επιδράσεων περιλαμβάνουν τις παρενέργειες της ακτινοθεραπείας, την έκθεση των πρώτων ραδιοβιολόγων, τις συνέπειες της ρίψης ατομικών βομβών στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι, καθώς και δεδομένα από σοβαρά πυρηνικά ή βιομηχανικά ατυχήματα.
- Στοχαστικά αποτελέσματα (stochastic effects), όπως η λευχαιμία, διάφορες μορφές καρκίνου και οι κληρονομήσιμες μεταλλάξεις, διαφέρουν σημαντικά ως προς τη φύση τους. Οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι η πιθανότητα εμφάνισής τους ακολουθεί στατιστικούς νόμους. Οι στοχαστικές επιδράσεις

σχετίζονται με την πιθανότητα ένα μεταλλαγμένο σωματικό ή γεννητικό κύτταρο –που έχει υποστεί βλάβη από την ακτινοβολία– να διαφύγει των μηχανισμών επιδιόρθωσης ή απόπτωσης και να οδηγήσει σε ανεξέλεγκτο κυτταρικό πολλαπλασιασμό ή γενετική μετάδοση της βλάβης [27]. Οι γνώσεις μας για τα στοχαστικά αποτελέσματα βασίζονται κυρίως σε μακροχρόνιες επιδημιολογικές μελέτες επιζώντων από τις ατομικές εκρήξεις στην Ιαπωνία, καθώς και σε πληθυσμούς που εκτέθηκαν σε ιατρικές (π.χ. ακτινοθεραπεία ή διαγνωστικές εξετάσεις) και επαγγελματικές πηγές ακτινοβολίας. Επιπλέον, πειραματικές μελέτες σε ζώα συμβάλλουν στην κατανόηση των μηχανισμών και της δοσοεξάρτησης των στοχαστικών επιδράσεων, ιδιαίτερα όσον αφορά τις γενετικές αλλοιώσεις.

2.4.1. Καθορισμένα αποτελέσματα

Τα καθορισμένα αποτελέσματα (deterministic effects) προκύπτουν όταν η έκθεση ενός ιστού σε ιοντίζουσα ακτινοβολία προκαλεί άμεση και σημαντική ενεργειακή βλάβη στα κύτταρα, οδηγώντας σε απώλεια της φυσιολογικής λειτουργίας ή/και μορφολογική αλλοίωση του ιστού. Η εκδήλωση τέτοιων επιδράσεων απαιτεί την υπέρβαση μιας ελάχιστης τιμής απορροφούμενης δόσης, γνωστής ως κατώφλι δόσης (threshold dose), που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 1 Sv. Κάτω από αυτό το όριο, οι καθορισμένες βλάβες δεν παρατηρούνται.

Η σοβαρότητα των καθορισμένων επιπτώσεων αυξάνεται αναλογικά με τη δόση, ενώ η χρονική κατανομή της δόσης διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο. Όταν η ακτινοβολήση λαμβάνει χώρα σε μικρότερους ρυθμούς δόσης και για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους (π.χ. χρόνια), η πιθανότητα εμφάνισης σοβαρής βλάβης μειώνεται σημαντικά, καθώς οι μηχανισμοί κυτταρικής επιδιόρθωσης και αναγέννησης μπορούν να αναπληρώσουν τα κατεστραμμένα κύτταρα.

Μεταξύ των κλινικά σημαντικών καθορισμένων επιδράσεων περιλαμβάνονται:

- καταστολή του μυελού των οστών (με επακόλουθη αιματολογική ανεπάρκεια),
- βλάβες του γαστρεντερικού συστήματος,
- ακτινικά δερματικά εγκαύματα,
- ακτινικός καταρράκτης,
- λεμφοπενία και
- γενικευμένες φλεγμονώδεις αποκρίσεις.

Τα πρώτα συμπτώματα έκθεσης σε υψηλές δόσεις ακτινοβολίας μπορεί να περιλαμβάνουν ναυτία, εμέτους, κοιλιακό άλγος και ερύθημα του δέρματος. Σε περιπτώσεις σοβαρής έκθεσης, π.χ. σε δόσεις άνω των 10 Sv, η πρόγνωση είναι ιδιαίτερα δυσμενής και συχνά θανατηφόρα. Αν και τέτοια περιστατικά είναι εξαιρετικά σπάνια σε περιόδους ειρήνης, έχουν καταγραφεί σε σοβαρά πυρηνικά ατυχήματα και εργαστηριακά συμβάντα.

Ανάλογα με τον χρόνο εμφάνισης, τα καθορισμένα αποτελέσματα διακρίνονται σε πρώιμα και καθυστερημένα:

- Πρώιμες αντιδράσεις εμφανίζονται εντός εβδομάδων από την έκθεση και περιλαμβάνουν φλεγμονώδη απόκριση, που σχετίζεται με την απελευθέρωση κυτταροκινών και βιοδραστικών μορίων (π.χ. ισταμίνης), καθώς και απώλεια λειτουργικών κυττάρων, ιδίως στο πλακώδες επιθήλιο ή σε άλλους ταχέως ανανεούμενους ιστούς.
- Καθυστερημένες αντιδράσεις παρατηρούνται μήνες ή και χρόνια μετά την έκθεση και διακρίνονται σε:
 - αντιδράσεις γενικού τύπου, οι οποίες οφείλονται σε άμεση βλάβη του ιστού (π.χ. ινώδωση ή αγγειακές αποφράξεις που μπορεί να οδηγήσουν σε ισχαιμία και νέκρωση) και
 - επακόλουθες αντιδράσεις, οι οποίες ενδέχεται να σχετίζονται με έμμεσες διεργασίες, όπως μεταβολές στη μικροκυκλοφορία ή την ανοσολογική απόκριση του ιστού.

Σε εξαιρετικά σοβαρές περιπτώσεις, έχει αναφερθεί χρήση μεταμόσχευσης αιμοποιητικών βλαστοκυττάρων για την ενίσχυση της ανάκτησης του αιμοποιητικού ιστού μετά από μαζική ακτινική καταστροφή, με περιορισμένη, αλλά υπαρκτή, επιτυχία.

2.4.2. Στοχαστικά αποτελέσματα

Τα στοχαστικά αποτελέσματα (stochastic effects) της έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία προκύπτουν κυρίως από γενετικές βλάβες σε μεμονωμένα κύτταρα, οι οποίες ενδέχεται να οδηγήσουν σε κακοήθεις εξεργασίες ή κληρονομήσιμες μεταλλάξεις. Σε αντίθεση με τα καθορισμένα αποτελέσματα, τα στοχαστικά δεν παρουσιάζουν δοσολογικό κατώφλι, γεγονός που σημαίνει ότι ακόμη και μικρές

δόσεις ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβες, αν και η πιθανότητα εμφάνισης μειώνεται σημαντικά. Η σοβαρότητα του αποτελέσματος δεν εξαρτάται από το μέγεθος της δόσης, αλλά η πιθανότητα εκδήλωσής του αυξάνεται αναλογικά με αυτή.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα στοχαστικού αποτελέσματος είναι η ανάπτυξη καρκίνου, όπως η λευχαιμία ή συμπαγείς όγκοι, που μπορεί να εμφανιστούν ακόμη και δεκαετίες μετά την έκθεση. Επιπλέον, οι γενετικές βλάβες που επηρεάζουν τα γεννητικά κύτταρα είναι δυνατόν να μεταδοθούν στους απογόνους. Τα στοιχεία που στηρίζουν τη συσχέτιση μεταξύ ακτινοβολίας και στοχαστικών επιδράσεων προέρχονται κυρίως από μακροχρόνιες επιδημιολογικές μελέτες, με πιο χαρακτηριστική εκείνη των επιζώντων των ατομικών βομβαρδισμών της Χιροσίμα και του Ναγκασάκι. Σε μια ομάδα περίπου 80.000 ατόμων παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική αύξηση της επίπτωσης κακοηθειών για δόσεις άνω των 0.2 Sv που χορηγήθηκαν με υψηλούς ρυθμούς δόσης.

Ωστόσο, η ποσοτική εκτίμηση του κινδύνου που σχετίζεται με τη χρόνια έκθεση σε χαμηλές δόσεις, συγκρίσιμες με εκείνες του φυσικού ραδιενεργού υποβάθρου, παραμένει αβέβαιη. Δεν έχει τεκμηριωθεί, για παράδειγμα, αξιόπιστη αύξηση της συχνότητας καρκίνου σε πληθυσμούς που κατοικούν σε περιοχές με αυξημένα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας.

Η αποτίμηση του κινδύνου εμφάνισης στοχαστικών επιπτώσεων βασίζεται, κατά κύριο λόγο, στο μοντέλο «γραμμικό χωρίς κατώφλι δόσης» (*Linear Non-Threshold model, LNT*), σύμφωνα με το οποίο η πιθανότητα πρόκλησης καρκίνου είναι ανάλογη της προσλαμβανόμενης δόσης, ανεξαρτήτως του πόσο μικρή είναι αυτή. Το μοντέλο LNT προϋποθέτει γραμμική παρεκβολή των επιδημιολογικών δεδομένων που καταγράφονται σε υψηλές δόσεις προς την περιοχή των πολύ χαμηλών δόσεων. Παρόλο που το μοντέλο έχει αποτελέσει αντικείμενο επιστημονικών αντιπαραθέσεων, εξακολουθεί να αποτελεί τη βάση για τις διεθνείς κανονιστικές προσεγγίσεις.

Η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP) εκτιμά ότι ο μέσος συντελεστής κινδύνου για θανάσιμο καρκίνο λόγω ακτινοβολίας είναι 0.04 ανά Sv για ενήλικες εργαζόμενους και 0.05 ανά Sv για τον γενικό πληθυσμό [20].

Πίνακας 8. Σύγκριση καθορισμένων και στοχαστικών επιδράσεων της ιοντίζουσας ακτινοβολίας

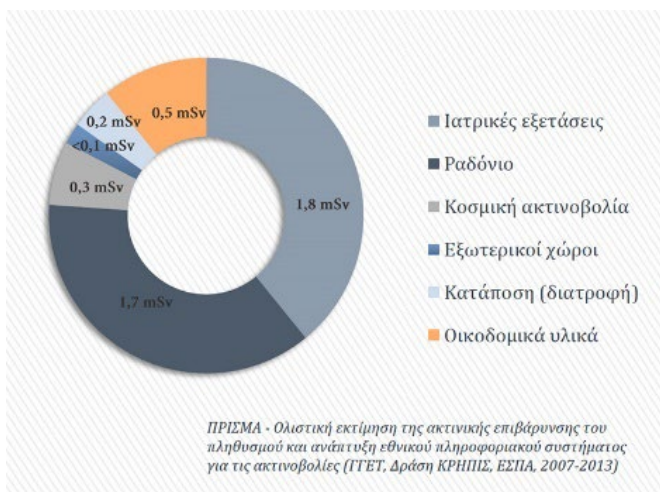
Χαρακτηριστικό	Καθορισμένα αποτελέσματα	Στοχαστικά αποτελέσματα
Όριο εμφάνισης	Υπάρχει – απαιτείται υπέρβαση συγκεκριμένου κατωφλίου	Δεν υπάρχει – μπορεί να εμφανιστούν σε οποιαδήποτε δόση
Μηχανισμός	Μαζικός κυτταρικός θάνατος ή σοβαρή δυσλειτουργία κυττάρων	Γενετική μετάλλαξη
Σχέση με τη δόση	Η σοβαρότητα αυξάνεται με την αύξηση της δόσης	Η πιθανότητα εμφάνισης αυξάνεται με τη δόση
Παραδείγματα	Ερύθημα, καταρράκτης, στείρωση, καταστολή μυελού, ακτινική νέκρωση	Λευχαιμία, καρκίνος (π.χ. θύμος αδένας, πνεύμονας), κληρονομήσιμες μεταλλάξεις
Χρονική εκδήλωση	Σχετικά σύντομος χρόνος μετά την έκθεση (ώρες – εβδομάδες)	Μακροπρόθεσμα, συχνά έτη ή δεκαετίες μετά την έκθεση
Δυνατότητα πρόληψης	Ναι, μέσω διατήρησης της δόσης κάτω από το κατώφλι	Όχι πλήρως, αλλά μειώνεται η πιθανότητα με περιορισμό της δόσης
Πηγές δεδομένων	Ακτινοθεραπεία, πυρηνικά ατυχήματα, έκθεση ραδιοβιολόγων	Επιδημιολογικές μελέτες επιζώντων, ιατρική και επαγγελματική έκθεση, μελέτες σε ζώα

2.5. Επιπτώσεις στον άνθρωπο της έκθεσης στο ραδόνιο

Το 1988, η Διεθνής Υπηρεσία Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC) ταξινόμησε το ραδόνιο ως καρκινογόνο για τον άνθρωπο. Ακολούθως, το 2005, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) ξεκίνησε το Διεθνές Πρόγραμμα Ραδονίου (International Radon Project) με στόχο τη μείωση του κινδύνου καρκίνου του πνεύμονα παγκοσμίως. Το 2009, ο ΠΟΥ δημοσίευσε το «Εγχειρίδιο για το Εσωτερικό Ραδόνιο: Μια Δημόσια Υγειονομική Προσέγγιση», παρέχοντας κατευθυντήριες γραμμές για τα επίπεδα αναφοράς και τις στρατηγικές μετριασμού [26]. Η έκθεση στο ραδόνιο είναι η δεύτερη σημαντικότερη αιτία θανάτου από καρκίνο του πνεύμονα παγκοσμίως μετά το κάπνισμα [27] [30]. Εκτιμάται ότι κάθε χρόνο πεθαίνουν περίπου 88.000 άνθρωποι παγκοσμίως από καρκίνο του πνεύμονα που σχετίζεται με το ραδόνιο [31] [32]. Σε επιμέρους χώρες, ο αριθμός των θανάτων διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τα επίπεδα ραδονίου και τον πληθυσμό. Στις ΗΠΑ για παράδειγμα περίπου 21.000 θάνατοι ετησίως οφείλονται σε καρκίνο του πνεύμονα λόγω έκθεσης στο ραδόνιο [33], ενώ στην Ευρώπη για το 2019 οι θάνατοι εκτιμήθηκαν στους 19.000 [34]. Στη χώρα μας, σύμφωνα με την πρόσφατη έκθεση της Globocan [35], το 2022 καταγράφηκαν 8,583 θάνατοι από καρκίνο του

πνεύμονα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το 5-10% των καρκίνων οφείλεται στο ραδόνιο, εκτιμάται ότι 430-850 άνθρωποι τον χρόνο χάνουν τη ζωή τους λόγω έκθεσης στο ραδόνιο.

Το ραδόνιο θεωρείται σήμερα η κύρια πηγή έκθεσης του ανθρώπου στη φυσική ακτινοβολία. Στην έκθεση του 2006 του UNSCEAR παρουσιάζεται ότι, σε παγκόσμιο επίπεδο, το ραδόνιο αντιπροσωπεύει περίπου το 52% της παγκόσμιας μέσης έκθεσης σε φυσική ακτινοβολία. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) στην Ελλάδα, η μέση ετήσια ενεργός δόση που δέχεται ένας κάτοικος είναι συνολικά 4.5 mSv ανά άτομο: 2.7 mSv από φυσικές πηγές ακτινοβολίας και 1.8 mSv από τις διαγνωστικές ιατρικές πρακτικές.



2.6. Συντελεστές μετατροπής συγκέντρωσης ραδονίου σε ενεργό δόση

Προκειμένου να γίνει εκτίμηση της έκθεσης των εργαζομένων, χρειάζονται οι κατάλληλοι συντελεστές μετατροπής. Οι πρώτοι συντελεστές μετατροπής που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το ICRP 65 (International Commission on Radiological Protection, 1993), το οποίο βασίστηκε σε επιδημιολογικές μελέτες, και ήταν οι ακόλουθοι:

- 2.52 nSv/(Bq·m⁻³·h) για τις κατοικίες και
- 3.12 nSv/(Bq·m⁻³·h) για τους χώρους εργασίας

Για παράδειγμα,

για έναν χώρο εργασίας με συγκέντρωση ραδονίου 300 Bq/m³ θεωρώντας ότι ο χρόνος εργασίας είναι 2.000 ώρες και ο συντελεστής ισορροπίας των θυγατρικών του ραδονίου είναι 0.4 και ο μέσος ρυθμός αναπνοής είναι 1.2m³h⁻¹, προκύπτει ότι η ετήσια ενεργός δόση για τους εργαζομένους είναι **1.87 mSv**.

Το 2017 το ICRP δημοσίευσε νέους συντελεστές βασισμένους σε δοσιμετρικά μοντέλα (ICRP 137), σύμφωνα με τα οποία οι συντελεστές διαμορφώνονται ως εξής:

- 6.7 nSv/(Bqm⁻³h) για κατοικίες και χώρους εργασίας,
- 13 nSv/(Bqm⁻³h) για χώρους εργασίας με υψηλή φυσική δραστηριότητα και τουριστικά σπήλαια.

Για παράδειγμα, για ένα τουριστικό σπήλαιο με συγκέντρωση ραδονίου 300 Bq/m³ θεωρώντας ότι ο χρόνος εργασίας είναι 2.000 ώρες και ο συντελεστής ισορροπίας των θυγατρικών του ραδονίου είναι 0.4 και ο μέσος ρυθμός αναπνοής είναι 1.2m³h⁻¹, προκύπτει ότι η ετήσια ενεργός δόση για τους εργαζομένους είναι **7.8** mSv. Τετραπλάσια δόση από αυτή που προτείνει το ICRP 65.

Το 2019 ο οργανισμός UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) πρότεινε τον ακόλουθο νέο συντελεστή μετατροπής βασισμένο τόσο σε επιδημιολογικές μελέτες όσο και σε δοσιμετρικά μοντέλα:

- 3.6 Sv/(Bqm⁻³h) για κατοικίες και χώρους εργασίας.

Με τα παραπάνω δεδομένα και χωρίς να υπάρχει μια επίσημη οδηγία, η κάθε χώρα αποφάσιζε ποιους συντελεστές θα χρησιμοποιήσει με επικρατέστερους τους συντελεστές του ICRP 65 για οικονομικούς και πολιτικούς λόγους. Τον Φεβρουάριου του 2024, όμως, η ευρωπαϊκή επιτροπή δημοσίευσε οδηγία (COMMISSION RECOMMENDATION 2024/440) και προτείνει, χωρίς να επιβάλλει όμως, τη χρήση από τα κράτη-μέλη του ICRP 137.

Κεφάλαιο 3ο: Ραδόνιο στους εσωτερικούς χώρους

3.1. Χωρικές και Χρονικές Μεταβολές της συγκέντρωσης Ραδονίου

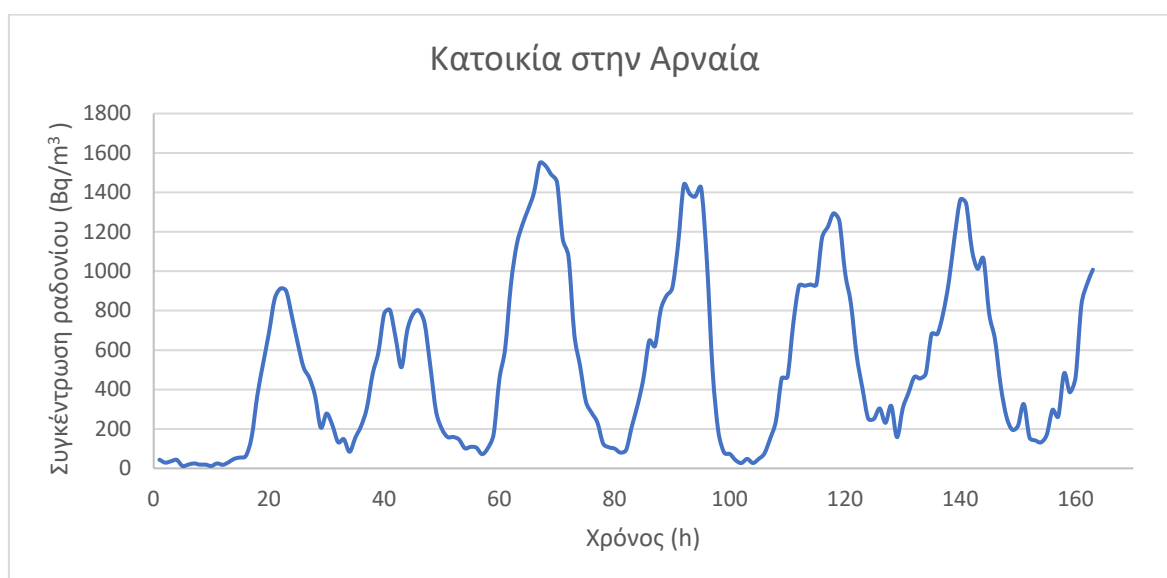
Η μελέτη των χωρικών και χρονικών μεταβολών του ραδονίου είναι κρίσιμη για την κατανόηση της κατανομής του σε διάφορα περιβάλλοντα και τις επιπτώσεις του στην ανθρώπινη υγεία. Το ραδόνιο παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις ανάλογα με την εποχή και τη γεωγραφική θέση.

3.1.1. Χρονικές μεταβολές

Στη συγκέντρωση ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους παρατηρούνται χρονικές διακυμάνσεις και συγκεκριμένα σε ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις.

Ημερήσιες διακυμάνσεις

Οι ημερήσιες διακυμάνσεις του ραδονίου στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών είναι συχνές και επηρεάζονται κυρίως από μεταβολές στη θερμοκρασία, την πίεση, τη σχετική υγρασία, τον αερισμό και τις καιρικές συνθήκες. Η διαφορά πίεσης μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου και οι συνήθειες αερισμού είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τις ημερήσιες διακυμάνσεις του ραδονίου[36]. Στο σχήμα 7 αποτυπώνονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις όπως αυτές καταγράφηκαν με τη χρήση ενεργητικών ανιχνευτών μέτρησης ραδονίου του ΤΕΡΠ – ΕΕΑΕ σε κατοικία στην Αρναία Χαλκιδικής.



Σχήμα 7. Ημερήσια διακύμανση ραδονίου σε κατοικία

Εποχιακές διακυμάνσεις

Οι εποχιακές μεταβολές στη συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους είναι ένα σημαντικό ζήτημα γιατί επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου παρουσιάζουν εποχιακή διακύμανση, με τις υψηλότερες τιμές να παρατηρούνται συνήθως κατά τους χειμερινούς μήνες και τις χαμηλότερες κατά τους καλοκαιρινούς [37] [38].

Παράγοντες που επηρεάζουν τις Εποχιακές Μεταβολές

Θερμοκρασία και Υγρασία: Οι εξωτερικές θερμοκρασίες και η σχετική υγρασία επηρεάζουν σημαντικά τις συγκεντρώσεις ραδονίου. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η αυξημένη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος οδηγεί σε αύξηση του φαινομένου της καμινάδας (stack effect), προκαλώντας αρνητική πίεση στους χαμηλούς ορόφους και τα υπόγεια. Αυτό διευκολύνει τη μεταφορά ραδονίου από το έδαφος προς τους εσωτερικούς χώρους μέσω ρωγμών στη θεμελίωση και στα πατώματα [39].

Αερισμός: Η τάση να ανοίγονται τα παράθυρα το καλοκαίρι και να παραμένουν κλειστά τον χειμώνα οδηγεί σε μεγαλύτερη συσσώρευση ραδονίου τον χειμώνα [40]. Κατά τους ψυχρούς μήνες, τα κτίρια είναι γενικώς καλύτερα σφραγισμένα, με περιορισμένο φυσικό αερισμό, γεγονός που μειώνει την αραίωση του ραδονίου και συμβάλλει στην αύξηση της συγκέντρωσής του [41].

Γεωλογικά και Δομικά Χαρακτηριστικά: Η γεωλογική φύση του εδάφους και τα υλικά κατασκευής επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις ραδονίου. Σε περιοχές με ηφαιστειακή δραστηριότητα, μπορεί να παρατηρηθούν αντίστροφες εποχιακές μεταβολές [42].

Ειδικές Περιπτώσεις

Αντίστροφες Εποχιακές Μεταβολές: Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως σε ηφαιστειακές περιοχές, οι συγκεντρώσεις ραδονίου μπορεί να είναι υψηλότερες το καλοκαίρι [42].

Διαφορές σε Κτίρια: Οι συγκεντρώσεις ραδονίου διαφέρουν ανάλογα με το ύψος και τη χρήση των κτιρίων, με τα χαμηλότερα επίπεδα να έχουν συνήθως υψηλότερες συγκεντρώσεις [38].

3.1.2. Χωρικές διακυμάνσεις

Οι χωρικές διακυμάνσεις της συγκέντρωσης ραδονίου στην ατμόσφαιρα επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως η γεωλογία, οι μετεωρολογικές συνθήκες και η δομή των κτιρίων. Συγκεκριμένα:

Γεωλογικοί Παράγοντες: Η συγκέντρωση ραδονίου επηρεάζεται από το περιεχόμενο ουρανίου στο υπέδαφος. Περιοχές με υψηλή περιεκτικότητα σε ουράνιο παρουσιάζουν αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου [43].

Δομή Κτιρίων: Η μόνωση και η κατασκευή των κτιρίων επηρεάζουν τη συγκέντρωση ραδονίου. Κτίρια με καλή μόνωση μπορεί να έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις λόγω περιορισμένης διαφυγής [44].

Υψόμετρο: Οι συγκεντρώσεις ραδονίου μειώνονται με την αύξηση του ύψους από το έδαφος, λόγω της ατμοσφαιρικής αραίωσης [43].

3.2. Κατανομή Ραδονίου και Λογαριθμοκανονική Κατανομή (lognormal)

Η κατανομή των συγκεντρώσεων ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους σε πολλές χώρες μπορεί να προσεγγιστεί με λογαριθμικά κανονική (lognormal) κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι ο λογάριθμος της συγκέντρωσης του ραδονίου ακολουθεί κανονική (Gaussian) κατανομή. Η αιτία για την οποία η συγκέντρωση ραδονίου ακολουθεί αυτή την κατανομή μπορεί να ερμηνευθεί με βάση τους πολλαπλασιαστικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη σχέση μεταξύ του ραδίου στο έδαφος και του ραδονίου στον εσωτερικό αέρα.

Η συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, R_i , σε οποιαδήποτε κατοικία, μπορεί να εκφραστεί ως:

$$R_i = R_0 + R_{\text{source}} \times A \times B \times C \times \dots$$

όπου:

- R_0 είναι η συγκέντρωση ραδονίου στο εξωτερικό περιβάλλον,
- R_{source} είναι ένας όρος που εξαρτάται από την περιεκτικότητα του εδάφους σε ράδιο,

- A,B,C,... είναι όροι που αντιστοιχούν σε παραμέτρους όπως η διαπερατότητα του εδάφους, το πλήθος και το μέγεθος των εισόδων του ραδονίου, η υποπίεση στο κτίριο και ο αερισμός του.

Η εξίσωση μπορεί να αναδιατυπωθεί ως εξής:

$$\ln(R_i - R_0) = \ln(R_{\text{source}}) + \ln(A) + \ln(B) + \ln(C) + \dots$$

Η κατανομή του $\ln(R_i - R_0)$ αναμένεται να είναι κανονική, εφόσον υπάρχει επαρκής αριθμός ανεξάρτητων και τυχαία κατανεμημένων όρων. Εάν το $\ln(R_i - R_0)$ ακολουθεί κανονική κατανομή, τότε το $(R_i - R_0)$ ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή (lognormal distribution).

Αυτή η κατανομή επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση και εκτίμηση των επιπέδων ραδονίου σε διάφορες περιοχές. Παραδείγματα τέτοιων μελετών είναι:

- Ισπανία: Σε μια εθνική έρευνα στην Ισπανία, η κατανομή των επιπέδων ραδονίου βρέθηκε να είναι περίπου λογαριθμοκανονική με γεωμετρικό μέσο όρο 41.1 Bq/m^3 και τυπική απόκλιση 3 [45].
- Αυστρία και Ευρώπη: Η λογαριθμοκανονική κατανομή παρατηρήθηκε επίσης σε δεδομένα από την Αυστρία και το ευρωπαϊκό πρόγραμμα χαρτογράφησης ραδονίου, αν και μερικές φορές παρατηρούνται αποκλίσεις λόγω «παχιάς ουράς» στη συχνότητα [46].
- Περού: Στη Λίμα οι μετρήσεις ραδονίου έδειξαν σημαντική χρονική μεταβλητότητα, με γεωμετρικούς μέσους όρους που κυμαίνονται από 146.4 έως 162.3 Bq/m^3 . Η λογαριθμοκανονική κατανομή επιβεβαιώθηκε μέσω δοκιμών κανονικότητας [47].
- Μαυροβούνιο: Η λογαριθμοκανονική κατανομή των δεδομένων ραδονίου βελτιώθηκε μετά την αφαίρεση της συγκέντρωσης ραδονίου στον εξωτερικό αέρα, υποδεικνύοντας την ανάγκη για προσαρμογές στα δεδομένα [48].

Μια λογαριθμοκανονική κατανομή μπορεί να χαρακτηριστεί από τον γεωμετρικό μέσο (GM) και τη γεωμετρική τυπική απόκλιση (GSD). Η συνάρτηση πιθανότητας $f(y)$ της κανονικής κατανομής $y = \ln(x)$ με μέσο μ και τυπική απόκλιση σ είναι:

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(y - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Η συνάρτηση πιθανότητας $F(x)$ μιας λογαριθμικά κανονικής κατανομής είναι:

$$F(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, x > 0$$

Ο αριθμητικός μέσος μ της κανονικής κατανομής $f(y)$ είναι ο λογάριθμος του γεωμετρικού μέσου (GM) της λογαριθμοκανονικής κατανομής $F(x)$:

$$GM = \sqrt[n]{x_1 x_2 x_3 \dots x_n}$$

$$\ln(GM) = \frac{1}{n} (\ln x_1 + \ln x_2 + \ln x_3 + \dots + \ln x_n)$$

$$\ln(GM) = \mu$$

Η τυπική απόκλιση σ μιας κανονικής κατανομής $f(y)$ είναι ο λογάριθμος της γεωμετρικής τυπικής απόκλισης (GSD) μιας λογαριθμοκανονικής κατανομής $F(x)$:

$$\ln(GSD) = \sigma$$

Ο GM ισούται με τη διάμεσο της λογαριθμοκανονικής κατανομής και το 68% διάστημα εμπιστοσύνης δίνεται από $(GM/GSD, GM \cdot GSD)$.

Αν και οι συγκεντρώσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους συνήθως ακολουθούν λογαριθμικά κανονική κατανομή, αυτή η υπόθεση θα πρέπει να ελέγχεται ξεχωριστά για κάθε επισκόπηση. Για παράδειγμα, μικρές περιοχές με αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τη συνολική κατανομή. Οι στατιστικές παράμετροι που υπολογίζονται σε τέτοιες μελέτες πρέπει να περιλαμβάνουν, τουλάχιστον, την αριθμητική μέση τιμή, την τυπική απόκλιση, τη γεωμετρική μέση τιμή και τη γεωμετρική τυπική απόκλιση [10].

Η συγκέντρωση ραδονίου στον εξωτερικό αέρα μπορεί να προκαλέσει απόκλιση από τη λογαριθμοκανονική κατανομή, οδηγώντας σε υποεκτίμηση των παραμέτρων κατανομής. Η αφαίρεση μιας σταθερής εξωτερικής τιμής μπορεί να διορθώσει αυτή την απόκλιση [49].

3.3. Ραδόνιο στις κατοικίες

Κατά τις δεκαετίες του 1950 και 1960, πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες συστηματικές μετρήσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, με σκοπό την εκτίμηση της έκθεσης του γενικού πληθυσμού. Ένα σημαντικό περιστατικό σημειώθηκε το 1984 στις Ηνωμένες Πολιτείες, όταν εντοπίστηκαν εξαιρετικά υψηλά επίπεδα ραδονίου σε κατοικία στην Πενσυλβάνια, γεγονός που αύξησε την ευαισθητοποίηση του κοινού και των αρχών για τους κινδύνους του ραδονίου [50].

Το 2011 το JRC (Joint Research Center) της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποφάσισε να δημιουργήσει τον Ευρωπαϊκό Χάρτη συγκεντρώσεων ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους (European Indoor Radon Map) στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Άτλαντα Φυσικής Ραδιενέργειας (European Atlas of Natural Radiation) [51]. Ο Άτλας αποτελεί μία συλλογή χαρτών της Ευρώπης, που απεικονίζουν τα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας από διάφορες πηγές, όπως η κοσμική ακτινοβολία και τα φυσικά ραδιονουκλίδια του φλοιού της γης. Η ψηφιακή έκδοση του Άτλαντα είναι διαθέσιμη διαδικτυακά στη διεύθυνση <https://remon.jrc.ec.europa.eu> [52]. Μια πρώτη καταγραφή των επισκοπήσεων ραδονίου στην Ευρώπη είχε πραγματοποιηθεί το 2005. Η ανασκόπηση αυτή ανέδειξε σημαντική ετερογένεια μεταξύ των διαφόρων ερευνών, όσον αφορά στις στρατηγικές δειγματοληψίας, τις μεθόδους μέτρησης, τη διάρκεια και την εποχικότητα των μετρήσεων [53]. Για τον λόγο αυτό, καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια συλλογής και ομοιογενούς ενσωμάτωσης των δεδομένων συγκεντρώσεων ραδονίου από διαφορετικές χώρες, με σκοπό την παραγωγή ενός ενιαίου ευρωπαϊκού χάρτη συγκεντρώσεων ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Ο χάρτης αυτός βασίζεται σε γεωγραφικά πλέγματα διαστάσεων 10 × 10 χιλιομέτρων. Στο πλαίσιο αυτής της πρωτοβουλίας, πολλές ευρωπαϊκές χώρες –μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα– πραγματοποίησαν επισκοπήσεις στο σύνολο της επικράτειάς τους.

Προκειμένου να υποστηριχθεί η ομοιομορφία στον σχεδιασμό και την υλοποίηση επισκοπήσεων ραδονίου παγκοσμίως, ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency - IAEA) σε συνεργασία με τον Διεθνή Οργανισμό Υγείας (World Health Organization – WHO) δημοσίευσε το 2019 την έκθεση Safety Reports Series No 998, με τίτλο “Design and Conduct of Indoor Radon Surveys”. Η έκθεση αυτή παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τον ορθό σχεδιασμό, την επιλογή

του κατάλληλου πληθυσμού-στόχου, τις μεθόδους δειγματοληψίας, τη διάρκεια των μετρήσεων, καθώς και για τη στατιστική επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων. Σκοπός της είναι να διασφαλίσει τη συγκρισιμότητα και την επιστημονική αξιοπιστία των επισκοπήσεων ραδονίου, τόσο εντός όσο και μεταξύ διαφορετικών χωρών, υποστηρίζοντας τη χάραξη εθνικών στρατηγικών διαχείρισης της έκθεσης στον ραδόνιο.

Μια επισκόπηση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους θα πρέπει να βασίζεται σε μετρήσεις που γίνονται σε μεμονωμένες κατοικίες και όχι σε δημόσια ή επαγγελματικά κτίρια, όπως σχολεία, χώρους εργασίας ή ιδρύματα. Ο λόγος είναι ότι οι άνθρωποι που βρίσκονται σε τέτοια κτίρια δεν αντιπροσωπεύουν το σύνολο του πληθυσμού και τα αποτελέσματα μπορεί να επηρεαστούν από διαφορετικούς παράγοντες που σχετίζονται με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτών των χώρων.

Για παράδειγμα, τέτοιου τύπου κτίρια έχουν διαφορετική χρήση (παραμένουν κλειστά τη νύχτα και τα Σαββατοκύριακα), διαφορετικά πρότυπα σχεδιασμού και κατασκευής σε σχέση με τις κατοικίες, και συνεπώς διαφορετική συμπεριφορά όσον αφορά τη συγκέντρωση ραδονίου.

Επιπλέον, κατά τον σχεδιασμό μιας τέτοιας έρευνας είναι σημαντικό να προβλεφθεί από την αρχή η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, ώστε να καταγράφονται σωστά και με ασφάλεια τα δεδομένα των μετρήσεων. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η οργάνωση, η αποδοτικότητα και η αξιοπιστία της επιστημονικής καταγραφής.

3.3.1. Στρατηγική Δειγματοληψίας

Κατά τον σχεδιασμό μιας εθνικής επισκόπησης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, είναι σημαντικό να καθοριστεί ο στόχος της μελέτης: αν δηλαδή αποσκοπεί κυρίως στην αποτύπωση της γεωγραφικής κατανομής των συγκεντρώσεων ραδονίου, στην αξιολόγηση του κινδύνου για τη δημόσια υγεία, ή και στα δύο. Η πρώτη περίπτωση απαιτεί γεωγραφικά στοχευμένη δειγματοληψία, ενώ η δεύτερη επικεντρώνεται στην κατανομή του πληθυσμού. Με κατάλληλη μεθοδολογία, είναι δυνατό μια επισκόπηση να εξυπηρετεί και τους δύο στόχους ταυτόχρονα.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά τον χειρισμό των πολυώροφων κτιρίων στις μελέτες συγκέντρωσης ραδονίου. Συνήθως, τα διαμερίσματα στους υψηλότερους ορόφους εμφανίζουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου συγκριτικά με τους ισόγειους ή υπόγειους χώρους, καθώς απέχουν περισσότερο από το έδαφος – την κύρια πηγή εκπομπής του ραδονίου. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι υψηλοί όροφοι μπορεί να εμφανίζουν σημαντικά επίπεδα ραδονίου, κυρίως όταν τα δομικά υλικά είναι η κύρια πηγή του ή όταν υπάρχουν μηχανισμοί μεταφοράς, όπως οι αγωγοί εξαερισμού ή τα κεντρικά συστήματα κλιματισμού, που μπορεί να μεταφέρουν ραδόνιο από τους κατώτερους ορόφους προς τους ανώτερους.

Η εξαίρεση των άνω ορόφων από τη μελέτη μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση των μέσων συγκεντρώσεων ραδονίου στο σύνολο του πληθυσμού, δηλαδή να παρουσιαστεί η γενική εικόνα ως πιο επιβαρυνμένη απ' ό,τι πραγματικά είναι. Παρ' όλα αυτά, ακόμη και με αυτή την προσέγγιση, η επισκόπηση μπορεί να προσφέρει αξιόπιστες πληροφορίες για τον εντοπισμό των περιοχών με αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου, οι οποίες χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και πιθανά μέτρα αποκατάστασης.

3.3.2 Πρόσθετες πληροφορίες

Κατά την υλοποίηση μιας επισκόπησης ραδονίου, είναι χρήσιμο να συλλέγονται πρόσθετα δεδομένα μέσω ερωτηματολογίων. Το ερωτηματολόγιο μπορεί να περιλαμβάνει πληροφορίες για τα βασικά χαρακτηριστικά της κατοικίας, όπως η ύπαρξη υπογείου, ο όροφος στον οποίο βρίσκεται, το έτος κατασκευής, ο τρόπος και η συχνότητα αερισμού, τα οικοδομικά υλικά (κουφώματα, πατώματα κ.ά.) και αν πρόκειται για μόνιμη ή εξοχική κατοικία. Επίσης, από πλευράς δημόσιας υγείας, μπορεί να είναι χρήσιμο να καταγραφούν οι συνήθειες καπνίσματος των κατοίκων, δεδομένου ότι το κάπνισμα αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει τον κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα σε συνδυασμό με την έκθεση σε ραδόνιο.

3.3.3. Στρατηγική επιλογής συμμετεχόντων

Η συμμετοχή πολιτών στις επισκοπήσεις ραδονίου είναι κρίσιμη για την επιτυχία και την αντιπροσωπευτικότητα των αποτελεσμάτων. Οι συνήθειες τρόποι πρόσκλησης περιλαμβάνουν αποστολή προσκλήσεων ταχυδρομικά, τηλεφωνική επικοινωνία,

άμεση επαφή, καθώς και αξιοποίηση εκπροσώπων συγκεκριμένων κοινωνικών ομάδων. Για παράδειγμα, στην Αυστρία, εθελοντές της πυροσβεστικής χρησιμοποιήθηκαν για την εκπροσώπηση του πληθυσμού.

Η εμπλοκή των τοπικών αρχών αποδεικνύεται, επίσης, ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς μπορούν να συμβάλουν τόσο στην ενημέρωση όσο και στην ενθάρρυνση της συμμετοχής. Ωστόσο, η μέθοδος επιλογής πρέπει να σχεδιαστεί με προσοχή, ώστε να περιορίζονται οι πιθανότητες μεροληψίας. Για παράδειγμα, η τυχαία επιλογή μέσω σταθερών τηλεφώνων, όπως εφαρμόστηκε στον Καναδά, τείνει να γίνεται λιγότερο αντιπροσωπευτική λόγω της αυξανόμενης χρήσης κινητών τηλεφώνων.

3.3.4. Επιλογή ανιχνευτών ραδονίου

Για τη μακροχρόνια μέτρηση του ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους (διάρκεια τουλάχιστον δύο μηνών) [54], υπάρχουν διάφορες τεχνικές. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι οι ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών στερεάς κατάστασης (SSNTDs), με χαρακτηριστικό παράδειγμα τους ανιχνευτές CR-39.

Οι SSNTDs έχουν πολλά πλεονεκτήματα: είναι φθηνοί, μικροί σε μέγεθος, εύχρηστοι και δεν απαιτούν επιτόπου μέτρηση υποβάθρου γ-ακτινοβολίας. Τα CR-39 μπορούν να αρχειοθετηθούν και να αναλυθούν ξανά στο μέλλον, ενώ η ανάλυσή τους σήμερα γίνεται με σύγχρονα μικροσκόπια συνδεδεμένα με λογισμικά προγράμματα, επιτρέποντας την επεξεργασία μεγάλου αριθμού δειγμάτων σε σύντομο χρόνο.

3.3.5. Χαρακτηριστικά μέτρησης

Η συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους εμφανίζει εποχικές διακυμάνσεις, κυρίως λόγω παραγόντων όπως η θέρμανση και ο αερισμός των χώρων. Για την αποτύπωση αντιπροσωπευτικών μέσων τιμών, θεωρείται βέλτιστη μια διάρκεια μέτρησης 12 μηνών. Σε αρκετές χώρες εφαρμόζονται μετρήσεις μικρότερης διάρκειας, π.χ. τριών ή έξι μηνών, ιδίως κατά τη χειμερινή περίοδο, κατά την οποία οι συγκεντρώσεις ραδονίου είναι συνήθως υψηλότερες λόγω περιορισμένου αερισμού. Οι μετρήσεις αυτές οδηγούν σε συντηρητικά υπερεκτιμημένες τιμές.

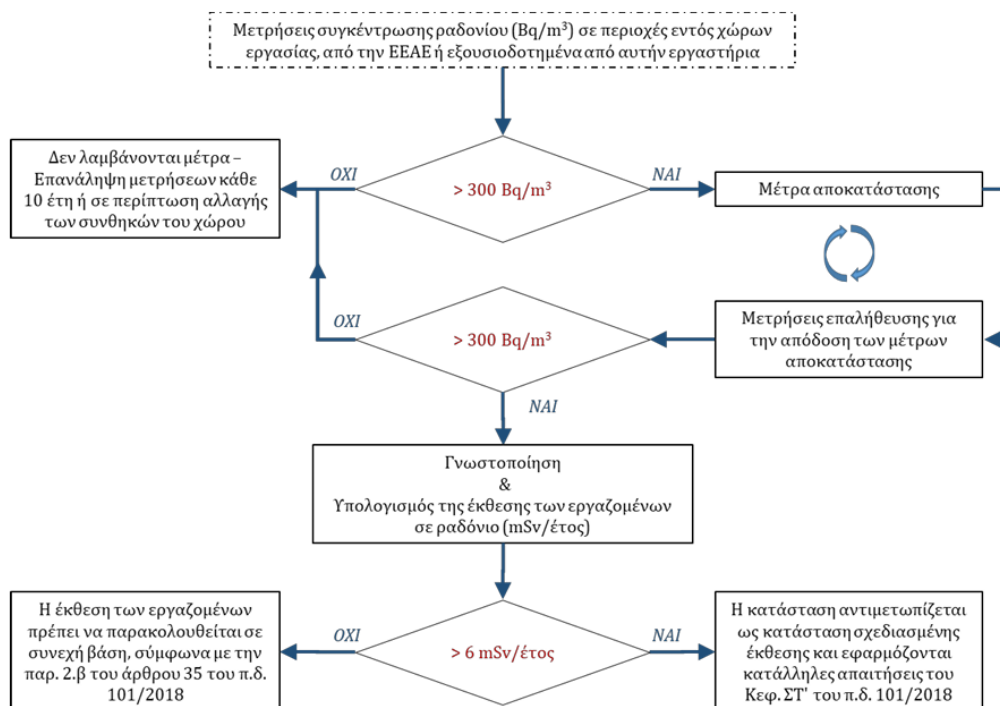
Η κατανομή του ραδονίου σε μια κατοικία δεν είναι ομοιόμορφη, καθώς επηρεάζεται από τη θέση των σημείων εισόδου (π.χ. ρωγμές, δάπεδα) αλλά και από τοπικές

συνθήκες θέρμανσης και αερισμού. Η ιδανική λύση θα ήταν η χρήση πολλών ανιχνευτών σε κάθε κατοικία, όμως το κόστος καθιστά κάτι τέτοιο συχνά ανέφικτο. Έτσι, συνήθως τοποθετούνται δύο ανιχνευτές σε κατοικίες ενός ή δύο επιπέδων: ένας στο καθιστικό και ένας σε υπνοδωμάτιο. Οι χώροι αυτοί επιλέγονται επειδή είναι εκεί όπου οι ένοικοι περνούν τον περισσότερο χρόνο.

Τέλος, οι οδηγίες μέτρησης ραδονίου σε κατοικίες επισημαίνουν την ανάγκη σωστής τοποθέτησης των ανιχνευτών. Θα πρέπει να αποφεύγονται σημεία κοντά σε παράθυρα, λόγω πιθανών παρεμβολών από ρεύματα αέρα, και κοντά σε πηγές θερμότητας, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία του ανιχνευτή [55].

3.4. Ραδόνιο στους χώρους εργασίας

Αρχικά, ο κίνδυνος από το ραδόνιο μελετήθηκε σε εργαζόμενους σε υπόγεια ορυχεία. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν μελέτες στον γενικό πληθυσμό για την κατανόηση της σχέσης μεταξύ οικιακής έκθεσης σε ραδόνιο και καρκίνου του πνεύμονα. Αν και τα στοιχεία για την οικιακή έκθεση είναι εκτενή, υπάρχουν ελάχιστα δεδομένα σχετικά με την έκθεση στους χώρους εργασίας [56]. Καθώς τα άτομα εκτίθενται σε ραδόνιο, όχι μόνο στο οικιακό αλλά και στο επαγγελματικό περιβάλλον, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για μελέτες που θα ενσωματώνουν μια ολιστική προσέγγιση της έκθεσης, λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο πηγές. Η Οδηγία 2013/59/Euratom του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθορίζει απαιτήσεις για την εκτίμηση της επαγγελματικής έκθεσης σε ραδόνιο, περιλαμβάνοντας τη θέσπιση επιπέδων αναφοράς και καθιστώντας υποχρεωτική τη διενέργεια μετρήσεων στους χώρους εργασίας. Τα κράτη-μέλη της ΕΕ, μεταξύ αυτών και η Ελλάδα, έχουν ενσωματώσει τις διατάξεις αυτές στη νομοθεσία τους. Στην εθνική νομοθεσία (π.δ. 101/2018, ΦΕΚ 194/Α) έχει καθοριστεί εθνικό επίπεδο αναφοράς για τις συγκεντρώσεις ραδονίου εντός κτιρίων και σε χώρους εργασίας ίσο με 300 Bq/m³. Επιπρόσθετα, έχει θεσπιστεί το εθνικό σχέδιο δράσης για την αντιμετώπιση των μακροπρόθεσμων κινδύνων από την έκθεση στο ραδόνιο ΕΣΧΕΔΡΑ (κεφ. 3.5).



Σχήμα 8. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας μετρήσεων, υπολογισμού και γνωστοποίησης της έκθεσης των εργαζομένων.

Στο Σχήμα 8 δίνεται διάγραμμα ροής για τις δράσεις που λαμβάνονται σε χώρους εργασίας με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. Σύμφωνα με το διάγραμμα, εφόσον οι συγκεντρώσεις ραδονίου συνεχίζουν να υπερβαίνουν το εθνικό επίπεδο αναφοράς, παρά τα μέτρα αποκατάστασης που ελήφθησαν για τη μείωσή τους, απαιτείται γνωστοποίηση της διενεργούμενης πρακτικής σύμφωνα με την παρ. 2 του άρθρου 25 του π.δ. 101/2018. Η διαδικασία της γνωστοποίησης πραγματοποιείται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της παραγράφου 1, του άρθρου 7 της κ.υ.α. 45872/2019, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται η εκτίμηση της επαγγελματικής έκθεσης στο ραδόνιο. Σε αυτή την περίπτωση και εφόσον η έκθεση των εργαζομένων στο ραδόνιο ενδέχεται να υπερβεί μια ενεργό δόση 6 mSv ετησίως, η κατάσταση αντιμετωπίζεται ως κατάσταση σχεδιασμένης έκθεσης και εφαρμόζονται οι εξειδικευμένες για το ραδόνιο απαιτήσεις του Κεφαλαίου ΣΤ' του π.δ. 101/2018, που αφορούν την επαγγελματική έκθεση. Σύμφωνα με την Έκθεση της UNSCEAR του 2020, τα επίπεδα συγκέντρωσης ραδονίου στους χώρους εργασίας εμφανίζουν εξαιρετικά μεγάλη μεταβλητότητα, με αποτέλεσμα σημαντικές δόσεις να μπορούν να καταγραφούν όχι μόνο στα υπόγεια ορυχεία, αλλά και σε άλλους χώρους εργασίας, όπως θερμαλιστικά κέντρα, σπήλαια,

μεταλλευτικά τουριστικά πάρκα, εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού και υπόγειες αποθήκες ή σταθμούς.

Στην Ελλάδα, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για τη συγκέντρωση ραδονίου σε συγκεκριμένους χώρους εργασίας, παρέχοντας σημαντικά δεδομένα για την έκθεση των εργαζομένων. Η πρώτη πιλοτική μελέτη διεξήχθη το 2007 και περιλάμβανε μετρήσεις συγκεντρώσεων ραδονίου και ρυθμού δόσης γάμμα σε 561 χώρους εργασίας σε 19 νομούς της Ελλάδας, κυρίως σχολεία [57] [58].

Τα σχολεία αποτελούν μια σημαντική κατηγορία χώρων εργασίας όπου έχουν διεξαχθεί μετρήσεις ραδονίου. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το 2009 [59] σε σχολεία της περιφέρειας Ξάνθης, ενώ το 2011 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ραδονίου και ρυθμού δόσης γάμμα σε 512 σχολεία σε 8 από τις 13 περιφέρειες της Ελλάδας [60] [61].

Η συγκέντρωση ραδονίου στα ελληνικά ιαματικά λουτρά αποτελεί σημαντικό θέμα για την υγεία όχι τόσο των λουόμενων όσο του προσωπικού. Εκτενώς έχουν μελετηθεί οι ιαματικές πηγές της Λέσβου [62] [63] [64], ενώ μετρήσεις έχουν γίνει στην Αιδηψό [65], το Λουτράκι [66] και την Ικαρία [67].

3.5. Ελληνικό κανονιστικό πλαίσιο

Στο πλαίσιο της εφαρμογής της Οδηγίας 2013/59/Ευρατόμ και της εναρμόνισης της ελληνικής νομοθεσίας μέσω του π.δ. 101/2018, το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την Αντιμετώπιση των Μακροπρόθεσμων Κινδύνων από το Ραδόνιο (ΕΣΧΕΔΡΑ) αποσκοπεί στη συστηματική καταγραφή, παρακολούθηση και αντιμετώπιση της έκθεσης σε ραδόνιο τόσο σε κατοικίες όσο και σε χώρους εργασίας.

1. Μετρήσεις σε Κατοικίες και Προσδιορισμός Περιοχών Προτεραιότητας

Στο πλαίσιο της Δράσης 1 του ΕΣΧΕΔΡΑ, η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) υλοποιεί ένα εκτεταμένο πρόγραμμα μετρήσεων συγκέντρωσης ενεργότητας ραδονίου στον εσωτερικό αέρα ισόγειων κατοικιών, με στόχο τη χαρτογράφηση της ραδονικής κατανομής στον ελλαδικό χώρο. Οι μετρήσεις καλύπτουν γεωγραφικά και πληθυσμιακά το σύνολο της επικράτειας, και ενσωματώνονται σε βάση δεδομένων

που συνδέεται με πληροφορίες για το κτίριο, το περιβάλλον και τις συνθήκες διαβίωσης.

Τα δεδομένα αυτά αξιοποιούνται για τον καθορισμό των λεγόμενων «περιοχών προτεραιότητας», δηλαδή περιοχών όπου η πιθανότητα υπέρβασης του θεσμοθετημένου εθνικού επιπέδου αναφοράς των 300 Bq/m^3 υπερβαίνει το 10%. Στις περιοχές αυτές συστήνονται μέτρα ενημέρωσης, πρόληψης και αποκατάστασης, και δίδεται προτεραιότητα σε δημόσια και ιδιωτικά κτίρια για επιπλέον ελέγχους.

2. Ραδόνιο σε Χώρους Εργασίας – Κανονιστικό Πλαίσιο και Υποχρεώσεις

Η έκθεση στο ραδόνιο σε χώρους εργασίας ρυθμίζεται από το άρθρο 54 του π.δ. 101/2018, με επίπεδο αναφοράς επίσης τα 300 Bq/m^3 , ως μέση ετήσια συγκέντρωση ενεργότητας. Το ΕΣΧΕΔΡΑ διακρίνει δύο κύριες κατηγορίες χώρων όπου ο έλεγχος είναι υποχρεωτικός:

- Χώροι εργασίας προτεραιότητας (π.χ. ορυχεία, σπήλαια, ιαματικά λουτρά, γεωθερμικά πεδία, βιομηχανίες φωσφορικών λιπασμάτων, σταθμοί ενέργειας).
- Χώροι εργασίας και δημόσιας πρόσβασης εντός των περιοχών προτεραιότητας (π.χ. σχολεία, νηπιαγωγεία, υπόγεια εργαστήρια).

Σε περιπτώσεις υπέρβασης του ορίου, οι εργοδότες υποχρεούνται να προβούν σε διορθωτικά μέτρα. Εφόσον αυτά δεν επαρκούν, εφαρμόζεται διαδικασία γνωστοποίησης προς την ΕΕΑΕ, ενώ ενεργοποιείται η υποχρεωτική παρακολούθηση της δόσης των εργαζομένων. Σε περιπτώσεις όπου η ενεργός δόση υπερβαίνει τα 6 mSv/έτος , η έκθεση θεωρείται «σχεδιασμένη» και απαιτείται περαιτέρω ρυθμιστικός έλεγχος.

3. Μέτρα πρόληψης και αποκατάστασης

Στο πλαίσιο του ΕΣΧΕΔΡΑ και σε συνεργασία με το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ), συντάσσεται οδηγός με εγκεκριμένες τεχνικές αποκατάστασης, βασισμένος σε διεθνείς πρακτικές και προσαρμοσμένος στην ελληνική πραγματικότητα, ο οποίος περιλαμβάνει ενδεικτικό κόστος εφαρμογής και κριτήρια αξιολόγησης της αποτελεσματικότητάς τους. Επιπλέον, στις περιοχές προτεραιότητας προβλέπεται η ενσωμάτωση τεχνικών προληπτικών μέτρων στους οικοδομικούς κανονισμούς.

4. Συστηματική Προσέγγιση και Στρατηγική Ενημέρωσης

Το ΕΣΧΕΔΡΑ προβλέπει την αναγνώριση εργαστηρίων μέτρησης από την ΕΕΑΕ με τυποποιημένες μεθόδους, τη δημιουργία διαδραστικού χάρτη ραδονίου, την ενημέρωση οργανισμών και πολιτών, και την εκπαίδευση εγκεκριμένων μηχανικών για την εφαρμογή τεχνικών αποκατάστασης.

Παράλληλα, προβλέπονται προγράμματα ενημέρωσης του πληθυσμού στις περιοχές προτεραιότητας, με στόχο την ευαισθητοποίηση, την πρόληψη και την ενίσχυση της περιβαλλοντικής συνείδησης.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 4ο: Μέτρηση ραδονίου

4.1 Ανιχνευτές μέτρησης ραδονίου στην ατμόσφαιρα

Η πρόοδος στον τομέα της ανίχνευσης ιοντιζουσών ακτινοβολιών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη και αξιοποίηση ποικίλων πειραματικών και τεχνολογικών προσεγγίσεων για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Η επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων, όπως η επιδιωκόμενη χρονική διάρκεια της μέτρησης, τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, το είδος της ακτινοβολίας που ανιχνεύεται (άλφα, βήτα ή/και γάμμα), καθώς και ο στόχος της μέτρησης – δηλαδή εάν αφορά την άμεση συγκέντρωση του ίδιου του ραδονίου ή των βραχύβιων θυγατρικών του.

Η πρώτη κρίσιμη απόφαση κατά τον σχεδιασμό μίας μέτρησης είναι η επιλογή μεταξύ της ανίχνευσης του ραδονίου ως χημικού στοιχείου ή των θυγατρικών του. Στην πράξη, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται βασίζονται κυρίως στην ανίχνευση της άλφα ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά τη διάσπαση είτε του ίδιου του ραδονίου είτε των θυγατρικών του (π.χ. Po-218, Po-214), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται, επίσης, η ανίχνευση γάμμα ή και βήτα ακτινοβολίας.

Οι κυριότερες τεχνικές και τα κυριότερα όργανα που εφαρμόζονται για τη μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου ή/και των θυγατρικών του περιλαμβάνουν:

- Ανιχνευτές καταγραφής ιχνών (track-etch detectors)
- Ανιχνευτές ενεργού άνθρακα (charcoal canisters)
- Ανιχνευτές ηλεκτρίσιμων υλικών (electret ion chambers)
- Θάλαμοι σπινθηρισμών (scintillation cells)
- Θάλαμοι ιοντισμού (ionization chambers)

Οι τεχνικές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμούς, με βάση τις απαιτήσεις της μελέτης και τις συνθήκες του πεδίου. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [8], υπάρχουν περισσότεροι από 300 πιθανοί συνδυασμοί τεχνικών που μπορούν να εφαρμοστούν σε ζεύγη ή και σε πολυσύνθετες

διατάξεις, γεγονός που καταδεικνύει τη μεγάλη ευελιξία και προσαρμοστικότητα των μεθοδολογιών στην πράξη.

Η ταξινόμηση των μεθόδων μέτρησης μπορεί να γίνει με βάση δύο βασικά κριτήρια:

1. Βάσει του τύπου των ανιχνευτών:

- **Παθητικοί ανιχνευτές (passive detectors):** Δεν απαιτούν ηλεκτρική τροφοδοσία και λειτουργούν με φυσικές διεργασίες συλλογής των προϊόντων διάσπασης του ραδονίου. Η λειτουργία τους βασίζεται συνήθως σε μηχανισμούς παγίδευσης σωματιδίων ή ιοντισμού, όπως στους ανιχνευτές καταγραφής ιχνών (π.χ. CR-39), στους ενεργούς άνθρακες και στους θαλάμους με ηλεκτρίσιμα υλικά. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι το χαμηλό κόστος και η ευκολία εγκατάστασης, ωστόσο απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης (συνήθως εβδομάδες ή και μήνες) για τη συλλογή επαρκών δεδομένων.
- **Ενεργητικοί ανιχνευτές (active detectors):** Απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια και ενσωματώνουν βαθμονομημένα ηλεκτρονικά συστήματα (π.χ. αισθητήρες, ενισχυτές σήματος, καταγραφικά). Παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την παρακολούθηση βραχυχρόνιων διακυμάνσεων της συγκέντρωσης ραδονίου. Ενδεικτικά παραδείγματα περιλαμβάνουν τους θαλάμους σπινθηρισμών και τους ηλεκτρονικούς θαλάμους ιοντισμού. Αν και προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα, παρουσιάζουν αυξημένο κόστος και ανάγκη για συνεχή τεχνική υποστήριξη.

2. Βάσει του χρόνου απόκρισης και του τύπου της μέτρησης:

- **Στιγμιαίες δειγματοληψίες (grab sampling):** Πρόκειται για βραχυχρόνιες μετρήσεις που καταγράφουν τη συγκέντρωση ραδονίου σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Γίνονται αποκλειστικά με τη χρήση ενεργητικών ανιχνευτών και εφαρμόζονται κυρίως για ελέγχους συμμόρφωσης ή ταχείες εκτιμήσεις.
- **Συνεχής παρακολούθηση (continuous monitoring):** Περιλαμβάνει καταγραφή σε τακτά χρονικά διαστήματα και χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της μεταβλητότητας της συγκέντρωσης ραδονίου. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται κυρίως με ηλεκτρονικά ενεργητικά συστήματα και

επιτρέπουν τη συσχέτιση των επιπέδων ραδονίου με εξωτερικούς περιβαλλοντικούς ή δομικούς παράγοντες.

- **Ολοκληρωμένες μετρήσεις (integrated techniques):** Αναφέρονται σε μακροχρόνιες μετρήσεις, οι οποίες βασίζονται σε αθροιστική συλλογή δεδομένων μέσω παθητικών ή και ενεργητικών ανιχνευτών. Η μέση τιμή που προκύπτει από το σύνολο των καταγραφών θεωρείται αντιπροσωπευτική της πραγματικής συγκέντρωσης ραδονίου στον εσωτερικό χώρο και χρησιμοποιείται ευρέως σε επιδημιολογικές μελέτες ή αξιολογήσεις κινδύνου.

Η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου εξαρτάται συνεπώς από το επιστημονικό ερώτημα, τις δυνατότητες του εξοπλισμού, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη διάρκεια της επιθυμητής μέτρησης. Στο πλαίσιο εφαρμογών περιβαλλοντικής παρακολούθησης, όπου απαιτείται η αποτύπωση της μακροχρόνιας έκθεσης του πληθυσμού, οι παθητικοί ανιχνευτές τύπου CR-39 αποτελούν την πλέον ενδεδειγμένη λύση, ενώ για λεπτομερή ανάλυση της χρονικής μεταβλητότητας ή για την επικύρωση δεδομένων, συχνά αξιοποιούνται συνδυαστικά και ενεργητικά συστήματα μέτρησης.

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζεται η ταξινόμηση που προτείνει το διεθνές πρότυπο IEC 61577-1 [68].

Πίνακας 9. Ταξινόμηση των οργάνων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ραδονίου

Διάρκεια Δειγματοληψίας	Τύπος Ανιχνευτή	Πληροφορίες που συλλέγονται	Μετρηθείσα Ποσότητα
Στιγμιαία (Grab)	Σπινθιρισμός από σωματίδια άλφα (ZnS(Ag) + φωτοπολλαπλασιαστής)	Μετρήσεις παλμών	Ενεργότητα
	Ιοντισμός αερίων	Ρεύμα, πλήθος παλμών, ύψος παλμών	Ενεργότητα, ενέργεια
	Ημιαγωγός	Πλήθος παλμών, ύψος παλμών	Ενεργότητα, ενέργεια
Συνεχής (Continuous)	Άλφα σπινθιρισμός (ZnS(Ag) + φωτοπολλαπλασιαστής)	Πλήθος παλμών	Ενεργότητα
	Ιοντισμός αερίων	Ρεύμα, πλήθος παλμών, ύψος παλμών	Ενεργότητα, ενέργεια
	Ημιαγωγός	Πλήθος παλμών, ύψος παλμών	Ενεργότητα, ενέργεια
Ολοκληρωμένη (Integrating)	SSNTD (ανιχνευτής πυρηνικών ιχνών στερεάς κατάστασης)	Αριθμός ιχνών	Έκθεση σε Rn
	Θερμο-φωταύγεια + φωτοπολλαπλασιαστής	Ένταση του φωτός	Έκθεση σε Rn
	Απορρόφηση σε κάρβουνο + NaI(Tl) σκόνη + φωτοπολλαπλασιαστής ή ημιαγωγός GeHP	Πλήθος παλμών	Έκθεση σε Rn
	Έλεκτρετ	Ηλεκτροστατική τάση	Έκθεση σε Rn

Ορισμένες παράμετροι μπορούν να επηρεάσουν περισσότερο ή λιγότερο την απόκριση της μετρητικής συσκευής. Οι παράμετροι αυτές είναι η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία, η ατμοσφαιρική πίεση, η περιβαλλοντική γάμμα ακτινοβολία, τα αερολύματα και το ηλιακό φως.

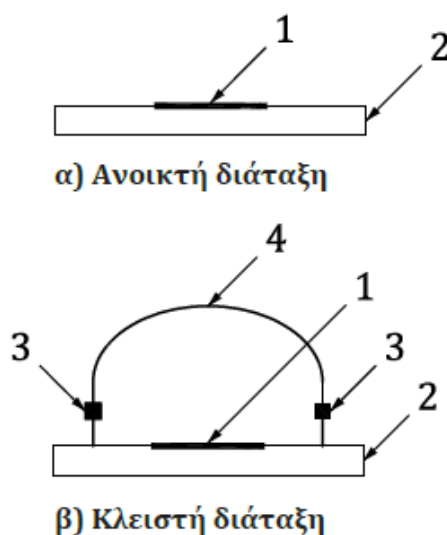
4.2. Μέτρηση με ανιχνευτή πυρηνικών ιχνών στερεάς κατάστασης

Η μέτρηση με ανιχνευτή πυρηνικών ιχνών στερεάς κατάστασης είναι η πιο διαδεδομένη και οικονομική μέθοδος μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου. Η μέθοδος βασίζεται στα ακόλουθα στοιχεία:

- παθητική δειγματοληψία, κατά την οποία τα σωματίδια άλφα, συμπεριλαμβανομένων αυτών που παράγονται από τη διάσπαση του ραδονίου και των θυγατρικών του, μεταφέρουν την ενέργειά τους μέσω ιοντισμού σε ένα

διηλεκτρικό μέσο. Αυτή η ενέργεια που μεταφέρεται στο μέσο το διαβρώνει και αφήνει ένα «ίχνος».

- στο εργαστήριο με κατάλληλη χημική ή ηλεκτροχημική επεξεργασία τα ίχνη γίνονται ορατά και καταμετρώνται με ένα κατάλληλο μικροσκοπικό σύστημα. Ο αριθμός αυτών των ιχνών ανά μονάδα επιφάνειας συνδέεται με την έκθεση στο ραδόνιο μέσω του συντελεστή βαθμονόμησης που έχει οριστεί προηγουμένως για ανιχνευτές από την ίδια παρτίδα κατασκευής SSNTD, οι οποίοι έχουν υποστεί χημική ή ηλεκτροχημική επεξεργασία και έχουν καταμετρηθεί υπό τις ίδιες συνθήκες.
- προσδιορισμός της μέσης συγκέντρωσης ραδονίου, λαμβάνοντας υπόψη τη διάρκεια δειγματοληψίας και το υπόβαθρο.



Σχήμα 9. SSNTD σε κλειστή και ανοικτή διάταξη. 1. Διηλεκτρικό μέσο, 2. Βάση, 3. Φίλτρα, 4. Θάλαμος διάχυσης

Η μετρητική διάταξη απαρτίζεται από το διηλεκτρικό μέσο (SSNTD), το οποίο χρησιμοποιείται μόνο του ή με θάλαμο διάχυσης (σχήμα 9).

Ο ανιχνευτής πυρηνικών ιχνών στερεής κατάστασης είναι ένα διηλεκτρικό μέσο. Σε σχέση με τα γυάλινα και τους ορυκτούς κρυστάλλους, τα πολυμερή (πλαστικά) είναι αυτά που μπορούν να καταγράφουν ίχνη ατόμων με μικρό ατομικό αριθμό, όπως τα σωματίδια α. Τα πιο διαδεδομένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ραδονίου είναι:

- ✓ CR – 39 → Polyallyldiglycol carbonate
- ✓ Lexan → Bisphenol-A polycarbonate
- ✓ Makrofol → Bisphenol-A polycarbonate
- ✓ LR 115 → Cellulose nitrate

Στην ανοικτή διάταξη, ο ανιχνευτής μπορεί να καταγράφει ταυτόχρονα τις εκπομπές άλφα του ραδονίου και των θυγατρικών του, καθώς και οποιουδήποτε άλλου εκπομπού άλφα που υπάρχει στην ατμόσφαιρα. Στη διάταξη αυτή είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τον συντελεστή ισορροπίας (equilibrium factor) του ραδονίου και των θυγατρικών του. Εάν αυτή η παράμετρος δεν δύναται να μετρηθεί, η κοινώς χρησιμοποιούμενη τιμή για κατοικίες είναι ίση με 0.4 [15].

Στην κλειστή διάταξη, υπάρχει ένας θάλαμος διάχυσης ο οποίος επιτρέπει την είσοδο μόνο του ραδονίου. Με τη διάταξη αυτή αποφεύγεται η επίδραση στη μέτρηση των θυγατρικών του ραδονίου και οποιουδήποτε άλλου ραδιονουκλιδίου που εκπέμπει σωματίδια άλφα και βρίσκεται στην ατμόσφαιρα. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρουσία φίλτρου ανάμεσα στο εξωτερικό περιβάλλον και τον θάλαμο διάχυσης. Σε αυτήν την περίπτωση, δεν είναι απαραίτητη η γνώση του συντελεστή ισορροπίας μεταξύ του ραδονίου και των θυγατρικών του.

4.2.1. Διαδικασία μέτρησης

Παρουσίαση των βημάτων για τη μέτρηση ^{222}Rn με τη χρήση SSNTD

Προμήθεια ανιχνευτών

Προμηθευόμαστε τους ανιχνευτές CR-39 από την εταιρεία TASL της Αγγλίας. Με κάθε παραλαβή νέας παρτίδας CR39, ελέγχεται η ακεραιότητα της συσκευασίας και άμεσα τοποθετούνται στο ψυγείο του χημείου αναλυτικής χημείας, μέχρι να προκύψει ανάγκη χρήσης του. Κάθε παρτίδα ανάλογα με το πλήθος της αποτελείται από φύλλα των εκατό (περίπου) που είναι συσκευασμένα αυτόνομα και ελέγχονται ξεχωριστά. Τα CR39 φέρουν μονοσήμαντο αύξοντα αριθμό για λόγους ιχνηλασιμότητας. Η ημερομηνία παραλαβής σημειώνεται στη συσκευασία. Τα κυάθια των ανιχνευτών (θάλαμος διάχυσης) προμηθεύονται από την εταιρεία Frohe AB της Σουηδίας και φυλάσσονται σε ερμητικά κλειστές συσκευασίες προκειμένου να αποφευχθεί η συσσώρευση σκόνης (Σχήμα 9).



Σχήμα 9. Ανιχνευτές CR-39 και κυάθια μέτρησης

Διάθεση

Οι ανιχνευτές συναρμολογούνται τη μέρα που πρόκειται να αποσταλούν ή εφόσον πρόκειται για μεγάλο αριθμό λίγες μέρες νωρίτερα.

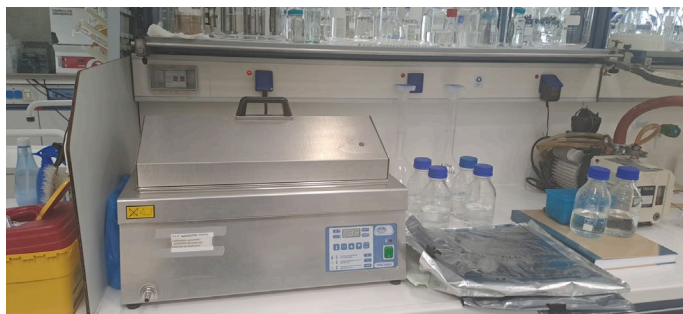
Οι ανιχνευτές αποστέλλονται ταχυδρομικά σε αεροστεγή συσκευασία (πολυαιθυλενίου – αλουμινίου). Στην περίπτωση των μετρήσεων σε κατοικίες, συνοδεύονται από έντυπο ενημερωτικό υλικό με σαφείς οδηγίες σχετικά με την τοποθέτηση και επιστροφή των ανιχνευτών, ερωτηματολόγιο καθώς και προπληρωμένο φάκελο για την επιστροφή τους. Αντιθέτως, στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε χώρους εργασίας, όπως τα σπήλαια, οι ανιχνευτές τοποθετούνται επιτόπου.

Παραλαβή

Οι ανιχνευτές επιστρέφονται συνήθως με το ταχυδρομείο ή στην περίπτωση των χώρων εργασίας συλλέγονται επιτόπου. Φυλάσσονται στο ψυγείο του εργαστηρίου αναλυτικής χημείας για το μικρότερο δυνατό χρονικό διάστημα με μέγιστη καθυστέρηση τον 1 μήνα.

Χημική Διάβρωση

Κατά τη χημική επεξεργασία το διηλεκτρικό μέσο CR39 αφαιρείται από τον ανιχνευτή. Υποβάλλεται σε χημική διαδικασία διάβρωσης (chemical etching) σε διάλυμα NaOH (6.25N) στους 77°C για 5.5h σε υδατόλουτρου (Σχήμα 10). Ο συγκεκριμένος χρόνος και θερμοκρασία έχουν επιλεγεί προκειμένου τα ίχνη να είναι αρκετά μεγάλα, ώστε να είναι ορατά και με μικρή μεγέθυνση, καθώς επίσης να μην επηρεάζονται από τη γήρανση (ageing) και τη εξασθένιση (fading).



Σχήμα 10. Υδατόλουτρο

Μετά τη διάβρωση ξεπλένονται με απιονισμένο νερό και αφήνονται να στεγνώσουν σε απορροφητικό χαρτί.

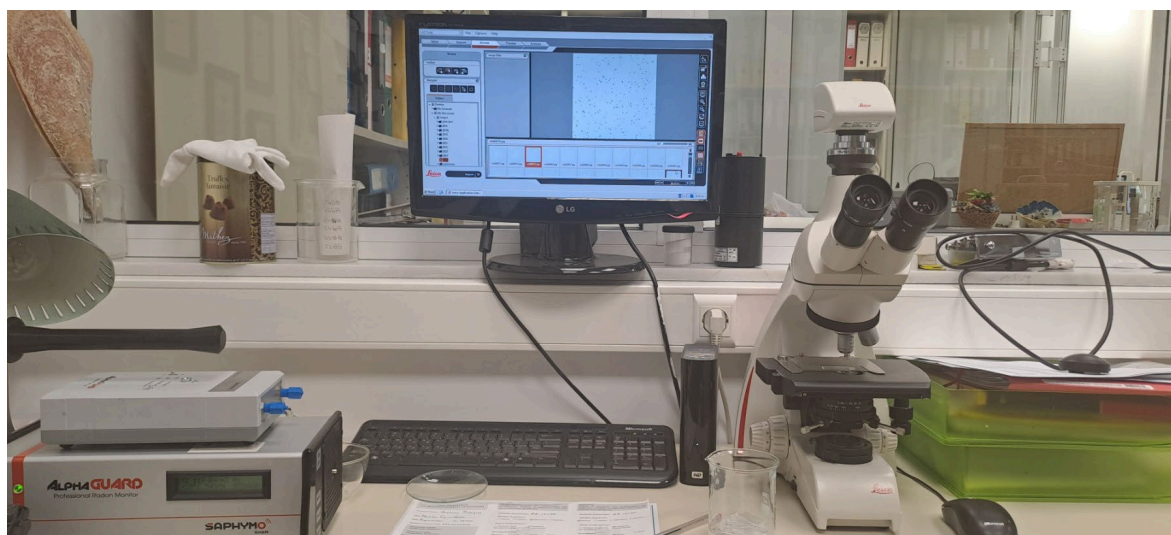
Η ημερομηνία και οι συνθήκες διάβρωσης καταγράφονται.

Παρασκευή NaOH

Διάλυμα καυστικού νατρίου (6.25N) παρασκευάζεται με διάλυση στερεού NaOH (pellets) σε απιονισμένο νερό. Η στερεά ουσία ζυγίζεται στον ζυγό του χημείου και στη συνέχεια φυλάσσεται στα δοχεία βρασμού.

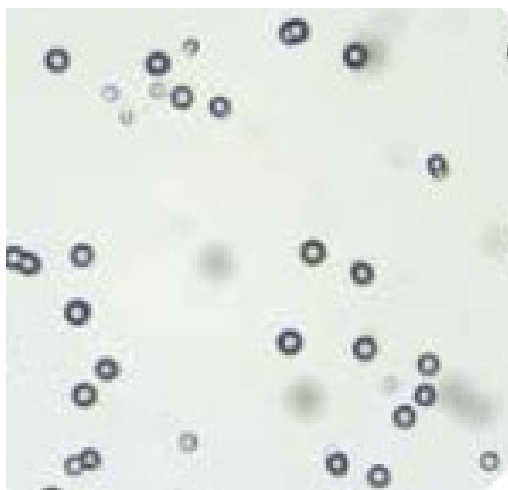
Καταγραφή ιχνών

Μετά το τέλος της διαδικασίας της χημικής διάβρωσης μετρούνται με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου (Leica) και φακό 4x/0.1 10 διαδοχικά πεδία (0.4 cm^2) (Σχήμα 11). Για το υπόβαθρο μετρούνται επίσης 10 πεδία (0.4 cm^2).



Σχήμα 11. Διάταξη μέτρησης ιχνών ραδονίου

Χρησιμοποιείται το Software Image Analysis. Όλες οι απεικονίσεις και τα Excel αρχεία που παράγονται αποθηκεύονται στον υπολογιστή (Σχήμα 12).



Σχήμα 12. Φωτογραφία ιχνών από το μικροσκόπιο

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις υποβάθρου και πιθανές παρατηρήσεις αποθηκεύονται, επίσης στον υπολογιστή.

Ρύθμιση μικροσκοπίου

Οι παράμετροι του μικροσκοπίου ρυθμίστηκαν όταν παραλήφθηκε το μικροσκόπιο και δεν απαιτείται αλλαγή αυτών (Πίνακας 10).

Πίνακας 10. Τιμές των παραμέτρων μέτρησης του μικροσκοπίου

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	
Threshold H	299 – 300
Threshold S	255 – 0
Threshold I	170 – 0
Binary Processing Pre-Filter Mode	Discard detail – open / size 2
Binary Processing Pre-Filter Separation	1 step
Image Processing Pre-Filter Mode	Enhance black detail / size 10
Pixel Limit	5

Συντελεστής βαθμονόμησης

Για τη δημιουργία της καμπύλης βαθμονόμησης, ανιχνευτές ραδονίου ακτινοβολούνται σε περιβάλλον αναφοράς (θάλαμος ραδονίου).

Πραγματοποιούνται 3-4 διαφορετικές ακτινοβολήσεις από 100 – 2000 KBq m⁻³ h.

Για κάθε ακτινοβολήση χρησιμοποιείται επαρκής αριθμός ανιχνευτές.

Μαζί με τους ανιχνευτές που πρόκειται να ακτινοβοληθούν αποστέλλονται και ανιχνευτές αναφοράς (transit), προκειμένου να ελεγχθεί το υπόβαθρο.

Με την επιστροφή των ανιχνευτών, διαβρώνονται άμεσα και μετρούνται όπως περιγράφεται στο εγχειρίδιο.

Προσδιορίζεται ο μέσος όρος των ιχνών ανά cm² και για τους ανιχνευτές της κάθε ακτινοβολήσης. Τα πειραματικά σημεία απεικονίζονται σε γραφική παράσταση που συνδέει τον αριθμό των ιχνών ανά cm² (y) συναρτήσει της ολοκληρωμένης έκθεσης (Bq h / m³) σε πρότυπη ατμόσφαιρα ραδονίου γνωστής συγκέντρωσης (x). Προσαρμόζεται ευθεία γραμμή στα πειραματικά σημεία ($y = ax + b$).

Ο συντελεστής βαθμονόμησης είναι η κλίση (a) της ευθείας.

Αποτελέσματα

Η μέση συγκέντρωση ραδονίου προκύπτει από την εξίσωση:

$$\bar{C} = (n_g - \bar{n}_b) \cdot \frac{1}{t \cdot S_{SSNTD} \cdot F_C} = (n_g - \bar{n}_b) \cdot \omega \text{ όπου } \omega = \frac{1}{t \cdot S_{SSNTD} \cdot F_C}$$

Όπου

F_C συντελεστής βαθμονόμησης

n_g ο αριθμός των ιχνών

\bar{n}_b μέσος όρος των ιχνών του υποβάθρου

S_{SSNTD} η επιφάνεια που μετρήθηκε (cm²)

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδονίου λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες πηγές:

1. Η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό των συνολικών ιχνών του υποβάθρου και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$U_{bg} = \sqrt{\frac{n_b}{n}} \cdot \omega \quad \omega = \frac{1}{t \cdot S_{SSNTD} \cdot F_C}$$

2. Η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό των συνολικών ιχνών που ισούται με:

$$U_g = \sqrt{n_g} \cdot \omega$$

3. Η αβεβαιότητα που οφείλεται στη βαθμονόμηση των ιχνών και μας δίνεται από το ptb 6.5%

4. Η αβεβαιότητα από τον χρόνο μέτρησης θεωρείται αμελητέα (ISO 11665:2012).

5. Η αβεβαιότητα από τη μέτρηση του μετρούμενου εμβαδού θεωρείται επίσης αμελητέα.

Η αβεβαιότητα της μέτρησης προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$u(\bar{C}) = \sqrt{\left(n_g + \frac{\bar{n}_b}{n}\right) \cdot \omega^2 + \bar{C}^2 \cdot u_{rel}^2(\omega)} \quad \text{με } u_{rel}^2(\omega) = u_{rel}^2(F_C) + u_{rel}^2(S_{SSNTD})$$

Όπου:

- \bar{n}_b ο μέσος όρος των ιχνών που οφείλονται στο υποβάθρο
- n ο αριθμός των στοιχείων που μετρήθηκαν για τον υπολογισμό του υποβάθρου
- t ο χρόνος
- S_{SSNTD} το εμβαδό
- F_C ο συντελεστής βαθμονόμησης

Έλεγχος Ποιότητας

1. Έλεγχος υποβάθρου

Ο έλεγχος του υποβάθρου πραγματοποιείται σε κάθε φύλλο CR-39. Κάθε φύλλο είναι μεμονωμένα συσκευασμένο και διατηρείται στο ψυγείο σε αεροστεγή συσκευασία. Με το άνοιγμα της συσκευασίας του κάθε φύλλου τα ανάλογα στοιχεία CR-39 και συγκεκριμένα τουλάχιστον 12 ανά παρτίδα και κατ' ελάχιστον 3 ανά φύλλο CR-39 επεξεργάζονται και μετρούνται σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο εγχειρίδιο διαπιστευμένων μεθόδων. Η μέτρηση σώζεται ηλεκτρονικά στο αρχείο του υπολογιστή με όνομα background μαζί με τις αντίστοιχες εικόνες. Σε περίπτωση που η τυπική απόκλιση του πλήθους των ιχνών ανά cm^2 κατά τη μέτρηση του υποβάθρου είναι μεγαλύτερη από 70 ίχνη ανά cm^2 το φύλλο απορρίπτεται.

2. Έλεγχος χημικής διάβρωσης και καταγραφής ιχνών

Προκειμένου να ελέγχουν οι συνθήκες διάβρωσης των CR39 εξετάζονται κατά τη μέτρηση οι εξής παράμετροι:

1. η στρογγυλότητα (roundness) των οπών
2. το μέσο μήκος των οπών

Τα αποδεκτά όρια για τη στρογγυλότητα και για το μέσο μήκος των οπών προσδιορίστηκαν από την ανάλυση των βαθμονομημένων CR39. Το αποδεκτό εύρος τιμών για την περίμετρο είναι:

$$0.6 - 0.8$$

και το αποδεκτό εύρος τιμών για το μέσο μήκος των οπών είναι:

$$0.020 - 0.030$$

Σε περίπτωση που η μέτρηση των στοιχείων αυτών είναι εκτός των αποδεικτικών ορίων πραγματοποιείται επιπλέον έλεγχος και τα όρια των αποδεκτών ιχνών προσαρμόζεται ανάλογα.

Συμμετοχή σε διαβαθμονομήσεις

Για να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια στις μετρήσεις και να διατηρηθεί το πάντα υψηλό επίπεδο ποιότητας απαιτείται η συμμετοχή σε διαβαθμονομήσεις. Κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης διατριβής, ανιχνευτές SSNTD εστάλησαν στο γερμανικό εργαστήριο BfS σε δύο διασυγκρίσεις το 2021 και το 2023. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες 11 και 12.

Πίνακας 11. Αποτελέσματα διαβαθμονόμησης στο εργαστήριο BFS 2021

Referenzwert / Reference value			$X_g = 678 \text{ kBq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$		
Transitgruppe / Transit group			Expositionsgruppe 1/ Exposure group 1		
Laufende Nummer / Running number	ID-Nummer des Gerätes / Identification number of the instrument	Anzeigewert $x_{a,i}$ / Indication value $x_{a,i}$ in $\text{kBq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$	ID-Nummer des Gerätes / Identification number of the instrument	Anzeigewert $x_{a,i}$ / Indication value $x_{a,i}$ in $\text{kBq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$	$x_{a,i}/X_g$ ($UG_g = 0,7$; $OG_g = 1,3$)
1	917-T-01	20	917-01	782	1,2
2	917-T-02	21	917-02	696	1,0
3	917-T-03	15	917-03	756	1,1
4	917-T-04	19	917-04	707	1,0
5	917-T-05	17	917-05	707	1,0
6	917-T-06	18	917-06	767	1,1
7	917-T-07	22	917-07	767	1,1
8	917-T-08	18	917-08	718	1,1
Mittelwert / Mean value in $\text{kBq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$		19,0			738,0
Standardabweichung / Standard deviation in %		12,2			4,6
Relative Messabweichung / Relative Error in %					8,8
Anzahl Ausreißer / Number of outliers					0
Leistung in der Eignungsprüfung/ Performance in Proficiency testing			Zufriedenstellend/ Satisfactory		

Πίνακας 12. Αποτελέσματα διαβαθμονόμησης στο εργαστήριο BFS 2023

Expositionsgruppe/ Exposure group	Transitgruppe/ Transit group		1		2		3		4	
Referenzwert der Rn-222-Exposition/ Reference exposure to radon-222 $P_{Rn,Ref}$ [kBq·h/m³]			460		1327		1577		2536	
Nummer / Number	Messgeräte- Code/ Code of device	Anzeigewert/ Indication [kBq·h/m³]	Messgeräte- Code/ Code of device	Anzeigewert/ Indication [kBq·h/m³]	Messgeräte- Code/ Code of device	Anzeigewert/ Indication [kBq·h/m³]	Messgeräte- Code/ Code of device	Anzeigewert/ Indication [kBq·h/m³]	Messgeräte- Code/ Code of device	Anzeigewert/ Indication [kBq·h/m³]
1	081105	29	081102	439	081101	1348	081104	1520	081103	2382
2	081107	27	081109	503	081113	1372	081110	1586	081106	2498
3	081108	39	081114	403	081116	1224	081111	1505	081123	2417
4	081112	27	081120	429	081126	1262	081115	1582	081124	2396
5	081118	32	081129	451	081130	1310	081117	1615	081125	2562
6	081119	29	081133	493	081131	1324	081121	1532	081128	2472
7	081127	41	081134	439	081135	1275	081122	1584	081132	2491
Mittelwert/ Mean value [kBq·h/m³]		32		451		1302		1561		2460
Relative Standardabweichung/ Relative standard deviation [%]		18		7,9		4,0		2,7		2,7
Relative Messabweichung / Relative error [%]				-2,0		-1,9		-1,0		-3,0

Η επίδοση του εργαστηρίου ήταν εξαιρετική (όλες οι μετρήσεις ήταν εντός των τιθέντων ορίων με μέγιστη απόκλιση 3%).

Κεφάλαιο 5ο: Βάση δεδομένων συγκέντρωσης ραδονίου

Στο πλαίσιο της διατριβής αναπτύχθηκε μια δυναμική και επεκτάσιμη βάση δεδομένων στην οποία εντάχθηκαν όλες οι διαθέσιμες μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου σε κατοικίες.

Η βάση δεδομένων έχει σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι επεκτάσιμη με την έννοια ότι θα μπορούν να εισαχθούν στη βάση νέες ιδιότητες που μπορεί να αφορούν τη μετρούμενη κατοικία, τον ιδιώτη, την αίτηση για μέτρηση, καθώς και τη μέτρηση ραδονίου.

Η εφαρμογή, η οποία αναπτύχθηκε για τη διαχείριση της βάσης δεδομένων MS-SQL, εκτελείται σε Windows Server 2012 R2, σε εξυπηρετητή Apache, και είναι γραμμένη στις γλώσσες προγραμματισμού PHP και JavaScript. Η εφαρμογή είναι προσβάσιμη μέσω φυλλομετρητή ιστού (web browser) εντός του δικτύου (Σχήμα 13).

Κατά την είσοδο στην εφαρμογή υπάρχουν πέντε βασικές ενότητες:

- i. Παθητικές Μετρήσεις
- ii. Επιτόπιες Μετρήσεις
- iii. Μετρήσεις Συνεργατών
- iv. Ιστορικές Μετρήσεις και
- v. Βαθμονόμηση

The screenshot displays the 'Passive Measurements' (Παθητικές Μετρήσεις) section of the EEAE web application. The interface features a top navigation bar with tabs for 'Passive Measurements', 'Spot Measurements', 'Cooperative Measurements', 'Historical Measurements', 'Calibration', and 'Statistics'. The left sidebar shows a 'Customers' (Κατοικίες) section with a 'New Customer' (+ Εισαγωγή Πελάτη) button. The main form allows searching for a customer by name, phone, or address. Below the form, a table lists customer details.

Επώνυμο	Όνομα	Διεύθυνση Επικοινωνίας	Κατοικίες	Ενέργειες
ΚΟΛΟΒΟΥ	ΜΑΡΙΑ	ΛΕΩΦΩΤΗΣ 65, ΔΗΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ - ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗΣ, 16777	Κατοικίες Μετρήσεων	+

Σχήμα 13. Μέρος της ιστοσελίδας που αλληλεπιδρά ο χρήστης

5.1. Παθητικές Μετρήσεις

Αφού ο χρήστης επιλέξει την ενότητα «Παθητικές Μετρήσεις», αποκτά πρόσβαση σε παθητικές μετρήσεις ραδονίου που έχουν γίνει από την ΕΕΑΕ στην Ελλάδα. Για αυτόν τον λόγο η εισαγωγή της μέτρησης γίνεται πάντα σε δύο βήματα, πρώτα η εύρεση του ιδιώτη καθώς και της κατοικίας στην οποία έχει ή θα γίνει μέτρηση και στη συνέχεια η εισαγωγή της μέτρησης. Τα δύο αυτά βήματα μπορούν να πραγματοποιούνται είτε σε διαφορετικές χρονικές στιγμές είτε ταυτόχρονα.

Ο χρήστης θα μπορεί στην ενότητα «Παθητικές Μετρήσεις» να έχει πρόσβαση στις παρακάτω επιλογές:

1. Κατοικίες
2. Χώροι Εργασίας

5.1.1. Κατοικίες

Η οθόνη αυτή αφορά τις παθητικές μετρήσεις ραδονίου που γίνονται σε κατοικίες. Μέσω πλαισίου αναζήτησης, ο χρήστης μπορεί να εφαρμόσει φίλτρα για την αναζήτηση πελατών τόσο από το εξωτερικό πελατολόγιο της ΕΕΑΕ όσο και από την εσωτερική βάση δεδομένων ραδονίου (χωρίς χρήση ΑΦΜ). Τα διαθέσιμα φίλτρα περιλαμβάνουν:

- Όνομα πελάτη,
- Επώνυμο πελάτη,
- Τηλέφωνο επικοινωνίας του πελάτη,
- Διεύθυνση επικοινωνίας του πελάτη από οδό και αριθμό, ΤΚ και Καλλικρατικό Δήμο,
- ΑΦΜ πελάτη,
- Εάν έχει καταχωρημένη κατοικία μέτρησης ραδονίου ή όχι.

Με βάση τα παραπάνω φίλτρα, εμφανίζονται σε πίνακα οι αντίστοιχοι πελάτες. Από προεπιλογή, εμφανίζονται οι πελάτες για τους οποίους έχει καταχωρηθεί κατοικία, αλλά δεν έχουν εισαχθεί μετρήσεις. Ο πίνακας περιλαμβάνει τις εξής στήλες:

- Ονοματεπώνυμο πελάτη,
- Διεύθυνση επικοινωνίας,
- Διεύθυνση(-εις) κατοικίας μέτρησης,
- Ενημέρωση για εκκρεμότητες στην εισαγωγή μετρήσεων.

Ανάλογα με τα αποτελέσματα της αναζήτησης, ο χρήστης μπορεί:

- Να δημιουργήσει νέο πελάτη,
- Να προσθέσει νέα κατοικία μέτρησης για υφιστάμενο πελάτη,
- Να επεξεργαστεί υπάρχουσα κατοικία μέτρησης,
- Να απενεργοποιήσει κατοικία μέτρησης.

Δημιουργία νέου πελάτη

Αν δεν εντοπιστεί ο πελάτης κατά την αναζήτηση, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει νέα εγγραφή. Η οθόνη δημιουργίας περιλαμβάνει τέσσερις ενότητες:

- Στοιχεία επαφής,
- Στοιχεία κατοικίας,
- Δοσίμετρα,
- Υπολογισμοί.

Η εγγραφή του πελάτη συνοδεύεται από μοναδικό αναγνωριστικό (person_id) το οποίο συσχετίζεται με όλα τα δεδομένα που θα καταχωρηθούν στη συνέχεια.

Στοιχεία επαφής

Συμπληρώνονται τα εξής:

- Ονοματεπώνυμο (υποχρεωτικά),
- Τηλέφωνο (προαιρετικά),
- Διεύθυνση επικοινωνίας (υποχρεωτικά: οδός και αριθμός, Τ.Κ., Καλλικρατικός Δήμος, σχόλια),
- ΑΦΜ και Δ.Ο.Υ. (προαιρετικά, για έκδοση παραστατικών),
- Ηλεκτρονική διεύθυνση (προαιρετικά).

Διατίθεται βοηθητική λειτουργία εύρεσης Καλλικρατικού Δήμου μέσω τοπωνυμίου ή περιοχής. Όλα τα στοιχεία αποθηκεύονται στον πίνακα πελατών της βάσης δεδομένων. Το person_id εμφανίζεται σε μη επεξεργάσιμη μορφή.

Στοιχεία κατοικίας

Κατά τη δημιουργία νέου πελάτη, καταχωρείται υποχρεωτικά τουλάχιστον μία κατοικία μέτρησης, με τα εξής πεδία:

- Αν η διεύθυνση κατοικίας διαφέρει από αυτήν της επικοινωνίας, εισάγονται νέα πεδία (οδός, αριθμός, Τ.Κ., Καλλικρατικός Δήμος, σχόλια),
- Γεωγραφικό πλάτος και μήκος (υποχρεωτικά), καθώς και επίπεδο ποιότητας στίγματος (παραμετρικά πεδία),
- Ημερομηνία αποστολής δοσιμέτρων (προαιρετικά),

- Τύπος κατοικίας: Μονώροφο, Διώροφο, Πολυκατοικία (προαιρετικά),
- Υπάρχουσες κατασκευές: Πυλωτή, Ημιυπόγειο, Υπόγειο (πολλαπλή επιλογή),
- Υλικά κατασκευής: Τούβλα, Πέτρα, Σκυρόδεμα, Ξύλο, Άλλο (πολλαπλή επιλογή),
- Έτος ή δεκαετία κατασκευής (προαιρετικά).

Μετά από εισαγωγή μέτρησης υπολογίζεται ο αριθμητικός μέσος όρος των ενεργών μετρήσεων και αποθηκεύεται στη βάση.

Αν έχει προηγηθεί αίτηση μέτρησης, καταχωρούνται επιπλέον:

- Ημερομηνία αίτησης (υποχρεωτικά),
- Σχόλια αιτούντος (προαιρετικά),
- Αριθμός πρωτοκόλλου (υποχρεωτικά).

Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει, επεξεργαστεί ή διαγράψει μια αίτηση.

Έκδοση πιστοποιητικού

Αφού ολοκληρωθεί η μέτρηση, είναι δυνατή η έκδοση πιστοποιητικού με τα εξής στοιχεία:

- Ημερομηνία έκδοσης (υποχρεωτικά),
- Αριθμός πρωτοκόλλου (υποχρεωτικά), ίδιος με της αίτησης ή νέος,
- Διεύθυνση αποστολής (από τα στοιχεία επικοινωνίας + σχόλια),
- Κωδικοί ενεργών δοσιμέτρων,
- Ημερομηνία μέτρησης,
- Ημερομηνία έναρξης και λήξης τοποθέτησης,
- Χώρος τοποθέτησης,
- Συγκέντρωση ραδονίου και αβεβαιότητα ανά δοσίμετρο.

Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει, επεξεργαστεί ή διαγράψει πιστοποιητικό, και να το εκτυπώσει.

Δοσίμετρα

Με την παραλαβή των δοσιμέτρων, ο χρήστης μπορεί να ενημερώσει τα εξής στοιχεία:

- Ημερομηνία έναρξης και λήξης τοποθέτησης,
- Τύπος δοσιμέτρου: CR-39 ή Electret,
- Κωδικός δοσιμέτρου (μοναδικός για CR-39),
- Ημερομηνία μέτρησης,
- Κατάσταση μέτρησης: ενεργή ή όχι (προεπιλογή: ενεργή).

Αν εισάγεται δοσίμετρο τύπου CR-39, ελέγχεται αν υπάρχουν καταχωρημένα δεδομένα διαβαθμονόμησης (βλ. ενότητα 5.2). Σε περίπτωση ασυμφωνίας, εμφανίζεται μήνυμα.

Προαιρετικά, συμπληρώνονται στοιχεία από το ερωτηματολόγιο που συνοδεύει το δοσίμετρο:

- Είδος δωματίου (Υπνοδωμάτιο, Καθιστικό κ.λπ.),
- Σχόλιο για το δωμάτιο (π.χ. Παιδικό υπνοδωμάτιο),
- Όροφος δωματίου,
- Τύπος κουφωμάτων: παλαιού ή σύγχρονου τύπου,
- Υλικό εσωτερικών τοίχων: Βαφή, Ξύλο, Πέτρα, Άλλο (πολλαπλή επιλογή),
- Τύπος θέρμανσης: Καλοριφέρ, Σόμπα, Κλιματιστικό, Τζάκι (πολλαπλή επιλογή),
- Τύπος δαπέδου: Μωσαϊκό, Πλακάκια, Ξύλο, Μάρμαρο, Άλλο (πολλαπλή επιλογή),
- Συχνότητα αερισμού: Καθημερινά, 2 φορές την εβδομάδα, 2 φορές τον μήνα, Ποτέ,
- Συχνότητα καπνίσματος: Συχνά, Ποτέ, Σπάνια.

Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει, να επεξεργαστεί ή να διαγράψει εγγραφή δοσιμέτρου.

Υπολογισμοί

Το τελευταίο βήμα είναι ο υπολογισμός της συγκέντρωσης ραδονίου. Ο υπολογισμός διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του δοσιμέτρου και πραγματοποιείται αυτόματα από το σύστημα. Παρόλα αυτά ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει χειροκίνητα το αποτέλεσμα της μέτρησης και να το αποθηκεύσει στη βάση.

- Για δοσίμετρο τύπου CR-39, ο υπολογισμός βασίζεται στα εξής:
 - Ημερομηνία έναρξης και λήξης τοποθέτησης του δοσιμέτρου,
 - Επιφάνεια μέτρησης (E) σε mm²,
 - Αριθμός ιχνών (N) που εντοπίστηκαν στο πεδίο,
 - Σταθερές: υπόβαθρο (bkg), πλήθος μετρήσεων υποβάθρου (bkg_num), συντελεστής F, σχετική αβεβαιότητα πηγής (u_rel), όπως ορίζονται από τον χρήστη (βλ. ενότητα 5.2).

Τα αποτελέσματα της μέτρησης και της αβεβαιότητας προκύπτουν σε Bq/m³. Ο χρήστης μπορεί να διορθώσει χειροκίνητα την τιμή. Ακολουθούν οι μαθηματικοί τύποι υπολογισμού:

$$\bar{C} = \frac{N - bkg}{\Delta t_{\omega\rho\epsilon\varsigma} * E * F} * 1000$$

$$U = \sqrt{\left(N + \frac{bkg}{bkg_num}\right) * \left(\frac{1}{\Delta t_{\omega\rho\epsilon\varsigma} * E * F}\right)^2 + Bq^2 * u_rel^2}$$

Για δοσίμετρο τύπου Electret, ο υπολογισμός βασίζεται στα εξής:

- Ημερομηνία και ώρα έναρξης και λήξης τοποθέτησης,
- Τάση (V) πριν και μετά τη μέτρηση,
- Τύπος ανιχνευτή: μπλε short (SST), μπλε long (SLT), κόκκινο short (LST), κόκκινο long (LLT),
- Γάμα background (bg).

Ακολουθούν οι τύποι υπολογισμού για τους διάφορους τύπους ανιχνευτών electret:

$$\bar{C}_{SST} = \left(\frac{\Delta V}{\left(1.69776 + 0.0005742 * \frac{V_1 + V_2}{2}\right) * \Delta t_{\omega\rho\epsilon\varsigma}} - bg * 0.087 \right) * 37$$

$$\bar{C}_{SLT} = \left(\frac{\Delta V}{\left(0.14 + 0.0000525 * \frac{V_1 + V_2}{2}\right) * \Delta t_{\omega\rho\epsilon\varsigma}} - bg * 0.087 \right) * 37$$

$$\bar{C}_{LST} = \left(\frac{\Delta V}{\left(0.26127 + 0.0001386 * \frac{V_1 + V_2}{2}\right) * \Delta t_{\omega\rho\epsilon\varsigma}} - bg * 0.12 \right) * 37$$

$$\bar{C}_{LLT} = \left(\frac{\Delta V}{\left(0.023826 + 0.0000112 * \frac{V_1 + V_2}{2}\right) * \Delta t_{\omega\rho\epsilon\varsigma}} - bg * 0.12 \right) * 37$$

Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί μόνο τις μετρήσεις των δοσιμέτρων που έχουν εισαχθεί στην ενότητα «Δοσίμετρα», χρησιμοποιώντας τον κωδικό του δοσιμέτρου ως αναγνωριστικό για τη σύνδεση με τη μέτρηση, και υπό την προϋπόθεση ότι δεν έχει ακόμη καταχωρηθεί ο αντίστοιχος υπολογισμός. Σε αυτό το στάδιο, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει έναν νέο υπολογισμό, να τον τροποποιήσει ή να τον διαγράψει.

Δημιουργία νέας κατοικίας μέτρησης ραδονίου για έναν πελάτη

Στην περίπτωση που κατά την αναζήτηση στο πελατολόγιο ο χρήστης εντοπίσει τον πελάτη που αναζητά, αλλά όχι την προς μέτρηση κατοικία, προχωρά στη διαδικασία της δημιουργίας νέας κατοικίας μέτρησης. Η οθόνη αυτής της διαδικασίας είναι πανομοιότυπη με αυτή της δημιουργίας του νέου πελάτη με τέσσερις διαφορετικές ενότητες:

- Στοιχεία επαφής,
- Στοιχεία κατοικίας,
- Δοσίμετρα,
- Υπολογισμοί

με τη διαφορά ότι η ενότητα «Στοιχεία επαφής» είναι στατική και άρα όχι επεξεργάσιμη. Κατά την αποθήκευση της νέας κατοικίας μέτρησης ραδονίου, το μοναδικό person_id του χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των υπόλοιπων στοιχείων στη βάση ραδονίου.

Επεξεργασία κατοικίας μέτρησης ραδονίου

Εφόσον, κατά την αναζήτηση στο πελατολόγιο, ο χρήστης εντοπίσει τόσο τον επιθυμητό πελάτη όσο και την αντίστοιχη κατοικία μέτρησης, μπορεί να προχωρήσει στην επεξεργασία της συγκεκριμένης εγγραφής. Η σχετική οθόνη είναι ταυτόσημη με εκείνη της δημιουργίας νέου πελάτη και περιλαμβάνει τέσσερις ενότητες:

- Στοιχεία επαφής,
- Στοιχεία κατοικίας,
- Δοσίμετρα,
- Υπολογισμοί

με τη διαφορά ότι η ενότητα «Στοιχεία Επαφής» είναι στατική (μη επεξεργάσιμη) και οι υπόλοιπες ενότητες εμφανίζονται προσυμπληρωμένες με τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί στο παρελθόν.

Απενεργοποίηση κατοικίας μέτρησης ραδονίου

Μετά τον εντοπισμό της επιθυμητής κατοικίας μέτρησης ραδονίου ενός πελάτη, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να την απενεργοποιήσει. Η ενέργεια αυτή δεν συνεπάγεται διαγραφή των δεδομένων, αλλά αλλαγή της κατάστασης της εγγραφής

από *active* σε *inactive*, με σκοπό τη διατήρηση της ιστορικότητας των μετρήσεων και τη συνέχεια της πληροφορίας στη βάση δεδομένων.

5.1.2. Χώροι εργασίας

Η ενότητα «Χώροι Εργασίας» παρουσιάζει αντίστοιχη λειτουργικότητα με εκείνη των κατοικιών, με τη βασική διαφορά ότι αφορά πελάτες-εταιρίες αντί για πελάτες-ιδιώτες.

Ο χρήστης διαθέτει σύνολο φίλτρων για την αναζήτηση πελατών, μεταξύ των οποίων:

- Επωνυμία,
- Τηλέφωνο επικοινωνίας,
- Διεύθυνση (οδός, αριθμός, ΤΚ, Καλλικρατικός Δήμος),
- ΑΦΜ,
- Κατάσταση καταχώρισης χώρου εργασίας (υπάρχει/δεν υπάρχει).

Τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε πίνακα, με προκαθορισμένη προβολή των εταιριών για τις οποίες έχει καταχωρηθεί χώρος εργασίας αλλά δεν έχουν ακόμη εισαχθεί μετρήσεις. Οι στήλες του πίνακα περιλαμβάνουν:

- Επωνυμία πελάτη-εταιρίας,
- Διεύθυνση επικοινωνίας,
- Διευθύνσεις χώρων εργασίας,
- Κατάσταση εισαγωγής μετρήσεων ανά χώρο.

Ο χρήστης μπορεί:

- Να δημιουργήσει νέο πελάτη-εταιρία,
- Να καταχωρήσει νέο χώρο εργασίας για υπάρχοντα πελάτη,
- Να επεξεργαστεί ή να απενεργοποιήσει χώρο εργασίας.

Δημιουργία νέου πελάτη-εταιρίας

Σε περίπτωση που ο αναζητούμενος πελάτης δεν εντοπιστεί, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει νέο πελάτη-εταιρία, μέσω οθόνης που περιλαμβάνει τις εξής ενότητες:

- Στοιχεία Επαφής,
- Στοιχεία Χώρου Εργασίας,
- Δοσίμετρα,
- Υπολογισμοί.

Κατά την αποθήκευση, δημιουργείται μοναδικό *corporation_id*, το οποίο χρησιμοποιείται για τη σύνδεση όλων των σχετικών δεδομένων στη βάση ραδονίου.

Στοιχεία επαφής

Καταχωρούνται:

- Υποχρεωτικά: Επωνυμία, Διεύθυνση επικοινωνίας (οδός, αριθμός, ΤΚ, Δήμος), ΑΦΜ, ΔΟΥ,
- Προαιρετικά: Τηλέφωνο, FAX, σχόλια διεύθυνσης.

Προσφέρεται βοηθητική αναζήτηση Καλλικρατικού Δήμου μέσω τοπωνυμίου. Δίνεται δυνατότητα πολλαπλών διευθύνσεων επικοινωνίας.

Στοιχεία χώρου εργασίας

Ορίζεται υποχρεωτικά ένας χώρος εργασίας με:

- Διεύθυνση (αν είναι διαφορετική από αυτήν της επικοινωνίας),
- Γεωγραφικό πλάτος/μήκος, προσδιοριζόμενα αυτόματα ή εισαγόμενα από τον χρήστη,
- Ποιότητα συντεταγμένων βάσει ακρίβειας πληροφορίας,
- Ημερομηνία αποστολής δοσιμέτρων (προαιρετικά).

Μετά την εισαγωγή μετρήσεων, ο μέσος όρος ενεργών τιμών υπολογίζεται και αποθηκεύεται.

Αν υπάρχει σχετική αίτηση μέτρησης, εισάγονται:

- Ημερομηνία αίτησης,
- Σχόλια αιτούντος (προαιρετικά),
- Αριθμός πρωτοκόλλου (υποχρεωτικά).

Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει, επεξεργαστεί ή διαγράψει αιτήσεις ανά χώρο εργασίας.

Έκδοση πιστοποιητικού

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων, ο χρήστης μπορεί να εκδώσει πιστοποιητικό με τα εξής στοιχεία:

- Ημερομηνία έκδοσης,
- Αριθμός πρωτοκόλλου (ίδιος με της αίτησης ή νέος),
- Διεύθυνση αποστολής (από τη διεύθυνση επικοινωνίας και σχόλια),
- Κωδικοί δοσιμέτρων,
- Ημερομηνία μέτρησης,

- Ημερομηνίες τοποθέτησης,
- Χώρος τοποθέτησης,
- Συγκέντρωση ραδονίου και αβεβαιότητα.

Το πιστοποιητικό μπορεί να δημιουργηθεί, επεξεργαστεί, διαγραφεί ή αναπαραχθεί με μορφή εκτύπωσης.

Δοσίμετρα

Κατά την παραλαβή των δοσιμέτρων, εισάγονται τα ακόλουθα στοιχεία:

- Ημερομηνίες τοποθέτησης και αφαίρεσης,
- Τύπος δοσιμέτρου (CR-39 ή Electret),
- Κωδικός δοσιμέτρου (μοναδικός για CR-39),
- Έλεγχος ύπαρξης στοιχείων διαβαθμονόμησης (για CR-39, όπως ορίζεται στην Ενότητα 5.2),
- Ημερομηνία μέτρησης,
- Κατάσταση ενεργότητας (by default ενεργό),
- Είδος δωματίου (παραμετρικό, μέσω βάσης δεδομένων),
- Προσδιοριστικό σχόλιο (π.χ. "Γραφείο Διευθυντή").

Ο χρήστης μπορεί να δημιουργεί, τροποποιεί ή διαγράφει δοσίμετρα ανά χώρο εργασίας.

Υπολογισμοί

Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας είναι ο υπολογισμός της συγκέντρωσης ραδονίου. Ο υπολογισμός σε κάθε περίπτωση μέτρησης διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του δοσιμέτρου. Η εφαρμογή παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης εκτέλεσης του υπολογισμού από το σύστημα· ωστόσο, ο χρήστης μπορεί, εφόσον το επιθυμεί, να εισαγάγει χειροκίνητα το αποτέλεσμα και να το αποθηκεύσει στη βάση δεδομένων.

Για την εκτίμηση της συγκέντρωσης ακολουθούνται οι τύποι υπολογισμού που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.1.1.

Ο χρήστης μπορεί να προχωρήσει στην επεξεργασία μετρήσεων μόνο για τα δοσίμετρα που έχουν ήδη καταχωρηθεί στην ενότητα «Δοσίμετρα» και για τα οποία δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμη υπολογισμός. Η σύνδεση κάθε μέτρησης με το αντίστοιχο δοσίμετρο επιτυγχάνεται μέσω του μοναδικού κωδικού αναγνώρισης του δοσιμέτρου.

Ο χρήστης σε αυτό το σημείο έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί έναν υπολογισμό, να τον επεξεργαστεί ή να τον διαγράψει.

Δημιουργία νέου χώρου εργασίας ραδονίου για έναν πελάτη

Εφόσον κατά την αναζήτηση στο πελατολόγιο εντοπιστεί ο πελάτης-εταιρία, αλλά δεν υπάρχει καταχωρημένος ο αντίστοιχος χώρος εργασίας προς μέτρηση, ο χρήστης προχωρά στη δημιουργία νέας εγγραφής χώρου εργασίας ραδονίου. Η σχετική οθόνη αποτελεί αναπαραγωγή της οθόνης δημιουργίας νέου πελάτη-εταιρίας και περιλαμβάνει τις εξής τέσσερις ενότητες:

- Στοιχεία επαφής – στατική και μη επεξεργάσιμη,
- Στοιχεία χώρου εργασίας,
- Δοσίμετρα,
- Υπολογισμοί.

Κατά την αποθήκευση, το μοναδικό *corporation_id* του πελάτη χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του νέου χώρου με τη βάση δεδομένων ραδονίου.

Επεξεργασία χώρου εργασίας μέτρησης ραδονίου

Σε περίπτωση που ο χρήστης εντοπίσει τόσο τον πελάτη-εταιρία όσο και τον σχετικό χώρο εργασίας στη βάση δεδομένων, δύναται να προχωρήσει στην επεξεργασία της αντίστοιχης εγγραφής. Η οθόνη επεξεργασίας είναι ταυτόσημη με εκείνη της δημιουργίας νέου πελάτη-εταιρίας και περιλαμβάνει τις ακόλουθες τέσσερις ενότητες:

- Στοιχεία επαφής – στατική και μη επεξεργάσιμη,
- Στοιχεία χώρου εργασίας,
- Δοσίμετρα,
- Υπολογισμοί.

Οι τρεις τελευταίες ενότητες εμφανίζονται προσυμπληρωμένες με τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί από τον χρήστη κατά το παρελθόν, επιτρέποντας την επεξεργασία τους.

Απενεργοποίηση χώρου εργασίας μέτρησης ραδονίου

Μετά την επιτυχή αναζήτηση ενός χώρου εργασίας που συνδέεται με πελάτη-εταιρία, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τον απενεργοποιήσει. Η ενέργεια αυτή δεν διαγράφει τα σχετικά δεδομένα (π.χ. αιτήσεις, πιστοποιητικά, μετρήσεις ραδονίου), αλλά τροποποιεί την κατάστασή του από *active* σε *inactive*, διασφαλίζοντας τη διατήρηση της ιστορικότητας εντός της βάσης δεδομένων.

5.2. Επιτόπιες Μετρήσεις

Η ενότητα των επιτόπιων μετρήσεων παρέχει στον χρήστη ένα σύνολο φίλτρων για την αναζήτηση ενεργών μετρήσεων, με κριτήρια τα εξής:

- Διεύθυνση μέτρησης (οδός, αριθμός, ΤΚ, Καλλικρατικός Δήμος),
- Χρονικό διάστημα μέτρησης (από-έως),
- Τύπος μετρητή,
- Τύπος μέτρησης (χώμα, αέρας, νερό),
- Εύρος τιμών συγκέντρωσης (Bq/m^3),
- Κατάσταση μέτρησης (ενεργή/μη ενεργή).

Τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε πίνακα με τις εξής στήλες:

- Διεύθυνση μέτρησης,
- Ημερομηνία μέτρησης,
- Τύπος μετρητή,
- Τύπος επιτόπιας μέτρησης,
- Τιμή μέτρησης (Bq/m^3),
- Κατάσταση ενεργότητας.

Βάσει των αποτελεσμάτων, ο χρήστης έχει τις εξής επιλογές:

- Δημιουργία νέας ενεργής μέτρησης,
- Επεξεργασία υπάρχουσας ενεργής μέτρησης,
- Διαγραφή ενεργής μέτρησης.

Δημιουργία νέας επιτόπιας μέτρησης

Στην οθόνη δημιουργίας επιτόπιας μέτρησης καταχωρούνται τα εξής στοιχεία:

- Διεύθυνση μέτρησης (προαιρετικά): οδός, αριθμός, ΤΚ, Καλλικρατικός Δήμος και τυχόν σχόλια. Παρέχεται βοηθητική οθόνη που επιτρέπει την εύρεση του Καλλικρατικού Δήμου με βάση τοπωνύμιο ή περιοχή. Τα στοιχεία συμπληρώνονται αυτόματα, συμπεριλαμβανομένων των γεωγραφικών συντεταγμένων (πλάτος, μήκος),
- Γεωγραφικό πλάτος και μήκος (υποχρεωτικά), μαζί με το επίπεδο ποιότητας των συντεταγμένων,
- Τιμή μέτρησης σε Bq/m^3 (υποχρεωτικό),
- Ημερομηνία μέτρησης (υποχρεωτική),
- Τύπος μετρητή (υποχρεωτικό), π.χ. Sarad, Alpha, Terra κ.ά.,

- Κατάσταση μέτρησης (ενεργή/μη ενεργή), με προεπιλογή την ενεργή.

Επεξεργασία επιτόπιας μέτρησης

Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί μία επιτόπια μέτρηση με σκοπό να τη διορθώσει ή να την ενεργοποιήσει ή να την απενεργοποιήσει κ.λπ.

Διαγραφή επιτόπιας μέτρησης

Μετά την επιτυχή αναζήτηση μίας επιτόπιας μέτρησης, ο χρήστης μπορεί επιλέγοντάς τη να τη διαγράψει.

5.3. Μετρήσεις Συνεργατών

Η ενότητα περιλαμβάνει μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί από εξωτερικούς συνεργάτες, μη ανήκοντες στην ΕΕΑΕ.

Παρέχεται πλαίσιο αναζήτησης με φίλτρα για ενεργές μετρήσεις, όπως:

- Τύπος μέτρησης (παθητική ή επιτόπια),
- Σε παθητικές μετρήσεις, διαχωρισμός ανάλογα με το αν αφορούν κατοικία ή χώρο εργασίας,
- Σε παθητικές μετρήσεις, περαιτέρω κατηγοριοποίηση ανάλογα με το μέσο (χώμα, αέρας, νερό),
- Συνεργάτης που πραγματοποίησε τη μέτρηση,
- Διεύθυνση μέτρησης (οδός, αριθμός, ΤΚ, Καλλικρατικός Δήμος),
- Χρονικό διάστημα μέτρησης (από-έως),
- Κατάσταση μέτρησης (ενεργή/μη ενεργή).

Τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε πίνακα με τις εξής στήλες:

- Διεύθυνση μέτρησης,
- Ημερομηνία μέτρησης,
- Όνομα συνεργάτη,
- Τιμή μέτρησης (Bq/m³),
- Κατάσταση ενεργότητας.

Ο χρήστης διαθέτει τις εξής επιλογές:

- Δημιουργία νέας μέτρησης συνεργάτη,
- Επεξεργασία υπάρχουσας μέτρησης συνεργάτη,
- Διαγραφή μέτρησης συνεργάτη.

Δημιουργία νέας μέτρησης συνεργάτη

Στην οθόνη δημιουργίας της νέας μέτρησης συνεργάτη εμφανίζονται δυο διαφορετικές ενότητες για την εισαγωγή στοιχείων:

- Στοιχεία επαφής και τοποθεσίας,
- Στοιχεία μέτρησης.

Στοιχεία επαφής και τοποθεσίας

Στα στοιχεία επαφής και τοποθεσίας καταχωρούνται τα εξής:

- Όνομα και Επώνυμο επαφής (σε περίπτωση ιδιώτη) ή Επωνυμία (σε περίπτωση εταιρίας) – προαιρετικά,
- Τηλέφωνο επικοινωνίας ιδιώτη ή εταιρίας – προαιρετικά,
- Διεύθυνση μέτρησης (προαιρετικά), με πεδία: οδός, αριθμός, ΤΚ, Καλλικρατικός Δήμος και σχόλια. Παρέχεται βοηθητική οθόνη για την εύρεση του Καλλικρατικού Δήμου βάσει τοπωνυμίου ή περιοχής, με αυτόματη συμπλήρωση γεωγραφικού πλάτους και μήκους,
- Γεωγραφικό πλάτος και μήκος μέτρησης (υποχρεωτικά), μαζί με το επίπεδο ποιότητας των συντεταγμένων.

Για παθητικές μετρήσεις σε κατοικίες καταγράφονται επίσης:

- Τύπος κατοικίας (προαιρετικά): επιλογή μεταξύ Μονώροφου, Διώροφου και Πολυκατοικίας,
- Παρουσία πυλωτής, ημιυπογείου ή υπογείου με δυνατότητα πολλαπλής επιλογής (προαιρετικά),
- Οικοδομικά υλικά κατασκευής (προαιρετικά): πολλαπλή επιλογή μεταξύ Τούβλων, Πέτρας, Σκυροδέματος, Ξύλου και Άλλου,
- Έτος ή δεκαετία κατασκευής (προαιρετικά).

Στοιχεία μέτρησης

Καταχωρούνται τα εξής δεδομένα μέτρησης:

- Συνεργάτης που πραγματοποίησε τη μέτρηση (υποχρεωτικό),
- Τύπος μέτρησης (παθητική ή επιτόπια, υποχρεωτικό),
- Σε παθητικές μετρήσεις, διάκριση αν αφορά κατοικία ή χώρο εργασίας,
- Σε επιτόπιες μετρήσεις, κατηγοριοποίηση ανάμεσα σε χώμα, νερό ή αέρα,
- Επίπεδο μέτρησης σε Bq/m³ (υποχρεωτικό),
- Χρονικό διάστημα μέτρησης (για παθητικές) ή ημερομηνία μέτρησης (για επιτόπιες) (υποχρεωτικά),

- Κατάσταση μέτρησης (ενεργή/μη ενεργή, υποχρεωτικό, προεπιλογή ενεργή).

Για παθητικές μετρήσεις σε κατοικίες καταγράφονται επιπλέον (προαιρετικά):

- Είδος δωματίου (π.χ. Υπνοδωμάτιο, Καθιστικό, Γραφείο κ.ά.),
- Σχόλιο/προσδιοριστικό δωματίου (π.χ. Παιδικό Υπνοδωμάτιο),
- Όροφος δωματίου,
- Τύπος κουφωμάτων (παλαιού ή σύγχρονου τύπου),
- Υλικό εσωτερικών τοίχων (Βαφή, Ξύλο, Πέτρα, Άλλο – πολλαπλή επιλογή),
- Τύπος θέρμανσης (Καλοριφέρ, Σόμπα, Κλιματιστικό, Τζάκι – πολλαπλή επιλογή),
- Είδος πατώματος (Μωσαϊκό, Πλακάκια, Ξύλο, Μάρμαρο, Άλλο – πολλαπλή επιλογή),
- Συχνότητα αερισμού δωματίου (Καθημερινά, 2 φορές εβδομαδιαίως, 2 φορές μηνιαίως, Ποτέ),
- Συχνότητα καπνίσματος στο δωμάτιο (Συχνά, Σπάνια, Ποτέ).

Επεξεργασία μέτρησης συνεργάτη

Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί μία μέτρηση συνεργάτη με σκοπό να τη διορθώσει ή να την ενεργοποιήσει ή να την απενεργοποιήσει κ.λπ.

Διαγραφή μέτρησης συνεργάτη

Μετά την επιτυχή αναζήτηση μίας μέτρησης συνεργάτη, ο χρήστης μπορεί επιλέγοντάς τη να τη διαγράψει.

5.4. Ιστορικές Μετρήσεις

Η ενότητα αφορά παλαιότερες μετρήσεις με περιορισμένη αξιοπιστία και πιθανώς ελλιπή δεδομένα. Οι ιστορικές αυτές μετρήσεις εισήχθησαν στη βάση δεδομένων μέσω queries με σκοπό τη διατήρηση του αρχείου, χωρίς δυνατότητα επεξεργασίας ή σύγκρισης με το πελατολόγιο και τις μη ιστορικές μετρήσεις.

Παρέχεται πλαίσιο αναζήτησης με φίλτρα:

- Τύπος μέτρησης (παθητική ή επιτόπια),
- Σε παθητικές μετρήσεις, διάκριση ανά κατοικία ή χώρο εργασίας,
- Προέλευση μέτρησης (π.χ. ΕΕΑΕ, Κλουβάς κ.ά.),
- Διεύθυνση μέτρησης (οδός, αριθμός, ΤΚ, Καλλικρατικός Δήμος),
- Χρονικό διάστημα μέτρησης (από-έως).

Τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε πίνακα με τις στήλες:

- Διεύθυνση μέτρησης,
- Ημερομηνία μέτρησης,
- Συνεργάτης που πραγματοποίησε τη μέτρηση,
- Τιμή μέτρησης (Bq/m^3).

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα:

- Προβολής των στοιχείων μιας ιστορικής μέτρησης.

Προβολή Ιστορικής Μέτρησης

Η οθόνη προβολής περιλαμβάνει δύο μη επεξεργάσιμες ενότητες:

- Στοιχεία επαφής και τοποθεσίας,
- Στοιχεία μέτρησης .

Στοιχεία επαφής και τοποθεσίας

Στα στοιχεία επαφής και τοποθεσίας εμφανίζονται τα εξής:

- Όνομα και επώνυμο επαφής (για ιδιώτη) ή επωνυμία (για εταιρία),
- Τηλέφωνο επικοινωνίας,
- Διεύθυνση μέτρησης, με πεδία: οδός και αριθμός, ταχυδρομικός κώδικας, Καλλικρατικός Δήμος και τυχόν σχόλια,
- Γεωγραφικό πλάτος και μήκος της μέτρησης, καθώς και το επίπεδο ποιότητας των γεωγραφικών συντεταγμένων.

Σε περίπτωση παθητικής μέτρησης σε κατοικία, καταγράφονται επίσης:

- Τύπος κατοικίας (Μονώροφο, Διώροφο, Πολυκατοικία),
- Υπάρχουσες ιδιαιτερότητες όπως Πυλωτή, Ημιυπόγειο ή Υπόγειο (με δυνατότητα πολλαπλής επιλογής),
- Οικοδομικά υλικά κατασκευής (Τούβλα, Πέτρα, Σκυρόδεμα, Ξύλο, Άλλο – πολλαπλή επιλογή),
- Έτος ή δεκαετία κατασκευής της κατοικίας.

Στοιχεία μέτρησης

Τα καταγεγραμμένα δεδομένα της μέτρησης περιλαμβάνουν:

- Προέλευση μέτρησης (π.χ. ΕΕΑΕ, Κλουβάς κ.ά.),
- Τύπος μέτρησης (παθητική ή επιτόπια),
- Για παθητικές μετρήσεις, κατηγορία (κατοικία ή χώρος εργασίας),
- Επίπεδο μέτρησης σε Bq/m^3 ,

- Ημερομηνία μέτρησης.

Επιπλέον, για παθητικές μετρήσεις σε κατοικία καταγράφονται τα χαρακτηριστικά του δωματίου όπου τοποθετήθηκε το δοσίμετρο:

- Είδος δωματίου (π.χ. Υπνοδωμάτιο, Καθιστικό, Γραφείο),
- Σχόλια/προσδιοριστικά (π.χ. Παιδικό Υπνοδωμάτιο),
- Όροφος δωματίου,
- Τύπος κουφωμάτων (παλαιού ή σύγχρονου τύπου),
- Υλικό εσωτερικών τοίχων (Βαφή, Ξύλο, Πέτρα, Άλλο – πολλαπλή επιλογή),
- Είδος θέρμανσης (Καλοριφέρ, Σόμπα, Κλιματιστικό, Τζάκι – πολλαπλή επιλογή),
- Είδος πατώματος (Μωσαϊκό, Πλακάκια, Ξύλο, Μάρμαρο, Άλλο – πολλαπλή επιλογή),
- Συχνότητα αερισμού (Καθημερινά, 2 φορές εβδομαδιαίως, 2 φορές μηνιαίως, Ποτέ),
- Συχνότητα καπνίσματος στο δωμάτιο (Συχνά, Σπάνια, Ποτέ).

5.5. Βαθμονόμηση

Η διαδικασία της βαθμονόμησης συνιστά κρίσιμη παράμετρο για τον αξιόπιστο υπολογισμό των συγκεντρώσεων ραδονίου, καθώς συνδέεται άμεσα με τη διόρθωση των μετρητικών αποτελεσμάτων βάσει υποβάθρου και του συντελεστή βαθμονόμησης. Η ενότητα αυτή της εφαρμογής επιτρέπει στον χρήστη την εισαγωγή των απαραίτητων παραμέτρων που αφορούν τόσο στο υπόβαθρο (background) όσο και στον συντελεστή βαθμονόμησης (F), όπως περιγράφεται στη συνέχεια:

Παράμετροι Υποβάθρου (Background)

Ο χρήστης καταχωρεί:

- Την αριθμητική τιμή του υποβάθρου (*bkg*), εκφρασμένη σε κατάλληλες μονάδες,
- Τον αριθμό των μετρήσεων του υποβάθρου (*bkg_num*), ο οποίος χρησιμοποιείται για τη στατιστική ενίσχυση της ακρίβειας,
- Το εύρος των δοσιμέτρων για το οποίο ισχύει η τιμή του υποβάθρου, δηλαδή από έναν αριθμό/κωδικό δοσιμέτρου έως έναν άλλο, με την προϋπόθεση ότι τα δοσίμετρα είναι διαδοχικά αριθμημένα (σειριακή ταξινόμηση).

Παράμετροι Συντελεστή Βαθμονόμησης (Calibration Factor)

Ο χρήστης εισάγει:

- Την αριθμητική τιμή του συντελεστή βαθμονόμησης (F),
- Τη σχετική αβεβαιότητα της πηγής βαθμονόμησης (u_{rel}), όπως προκύπτει από τη συνοδευτική τεκμηρίωση του φορέα βαθμονόμησης,
- Το εύρος των δοσιμέτρων στα οποία εφαρμόζεται ο εν λόγω συντελεστής,
- Το κέντρο αποστολής του δείγματος για βαθμονόμηση (π.χ. BFS ή HPA),
- Τον αριθμό των δοσιμέτρων που εστάλησαν για βαθμονόμηση και
- Την ημερομηνία αποστολής τους προς τον φορέα βαθμονόμησης.

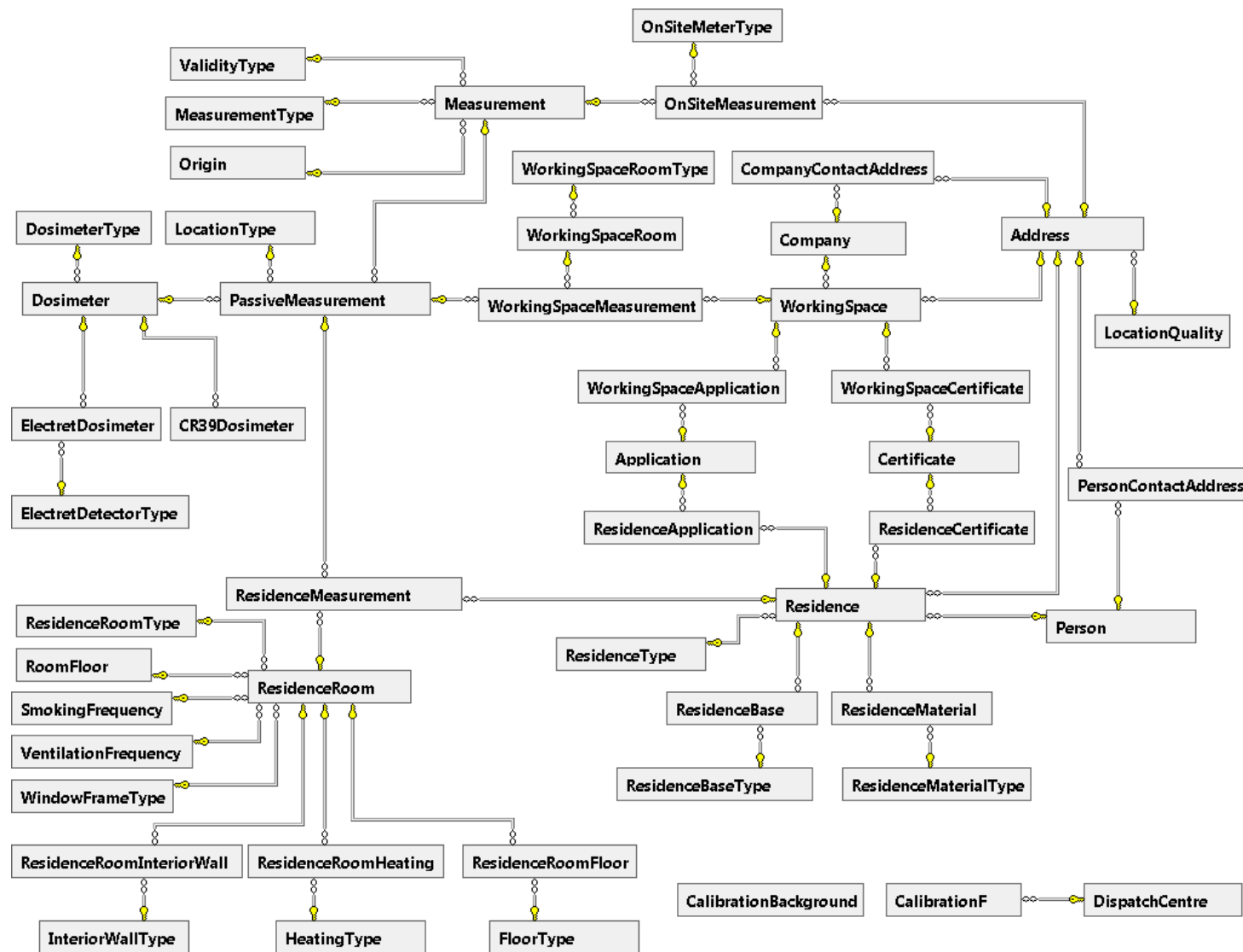
Οι πληροφορίες αυτές ενσωματώνονται αυτόματα στις εξισώσεις υπολογισμού της συγκέντρωσης ραδονίου κατά την ανάλυση των μετρητικών δεδομένων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαχείριση χρηστών και των αντίστοιχων δικαιωμάτων πρόσβασης πραγματοποιείται εκτός του συστήματος διαχείρισης της βάσης δεδομένων ραδονίου. Τέλος, η εισαγωγή παραμετρικών δεδομένων στους βοηθητικούς πίνακες, μπορεί να γίνει επικουρικά και για στοιχεία που υπάρχει η γνώση, αλλά σε κάθε περίπτωση οι βοηθητικοί πίνακες μπορούν να ενημερώνονται χειροκίνητα μέσα από DBMS.

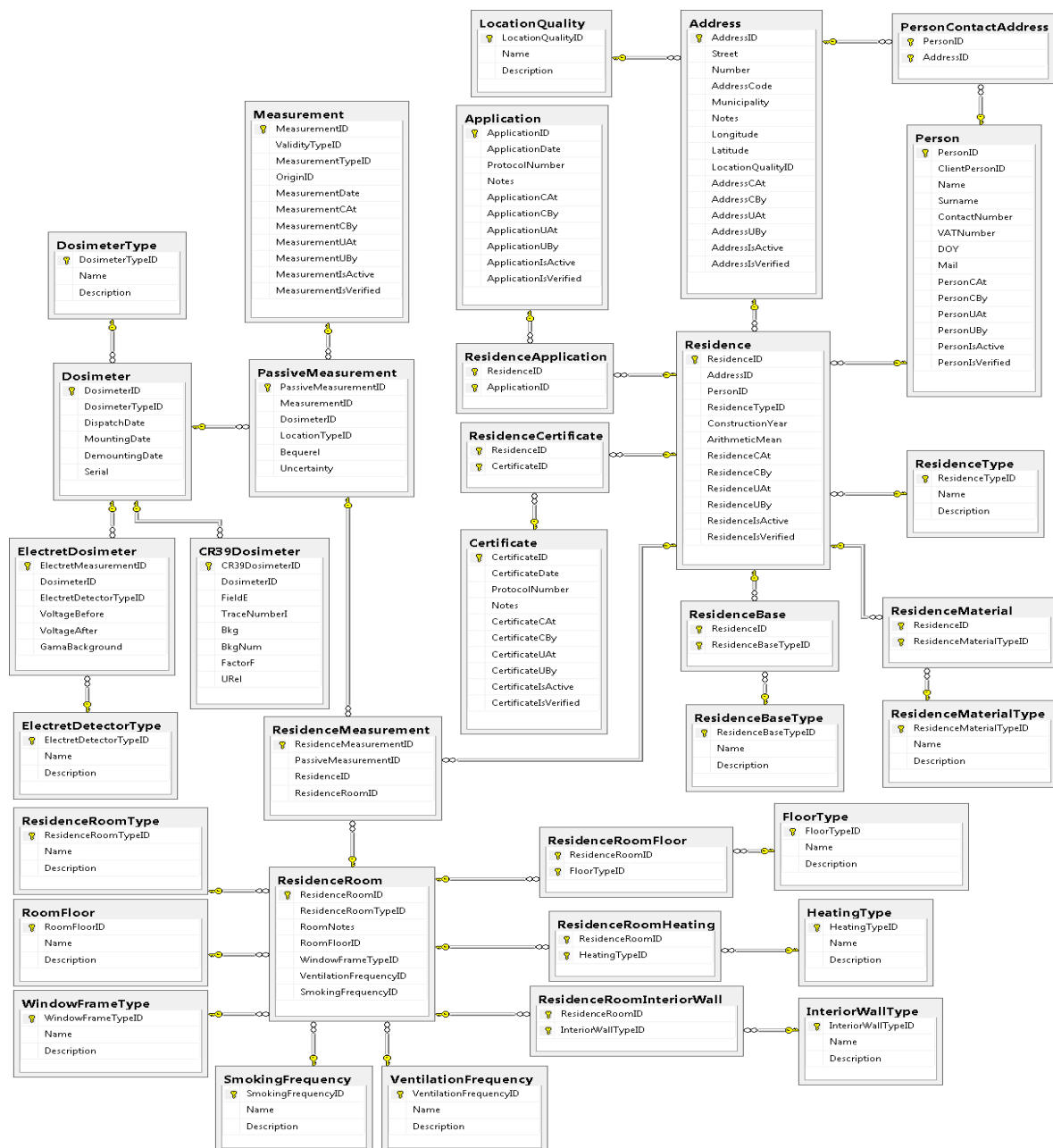
5.6. Σχεσιακό διάγραμμα

Ακολουθεί το συνολικό σχεσιακό διάγραμμα της εφαρμογής (Σχήμα 14) και στη συνέχεια η περιγραφή των πινάκων οντοτήτων και συσχετίσεων για τις κατοικίες και τους χώρους εργασίας (Σχήματα 15 & 16).

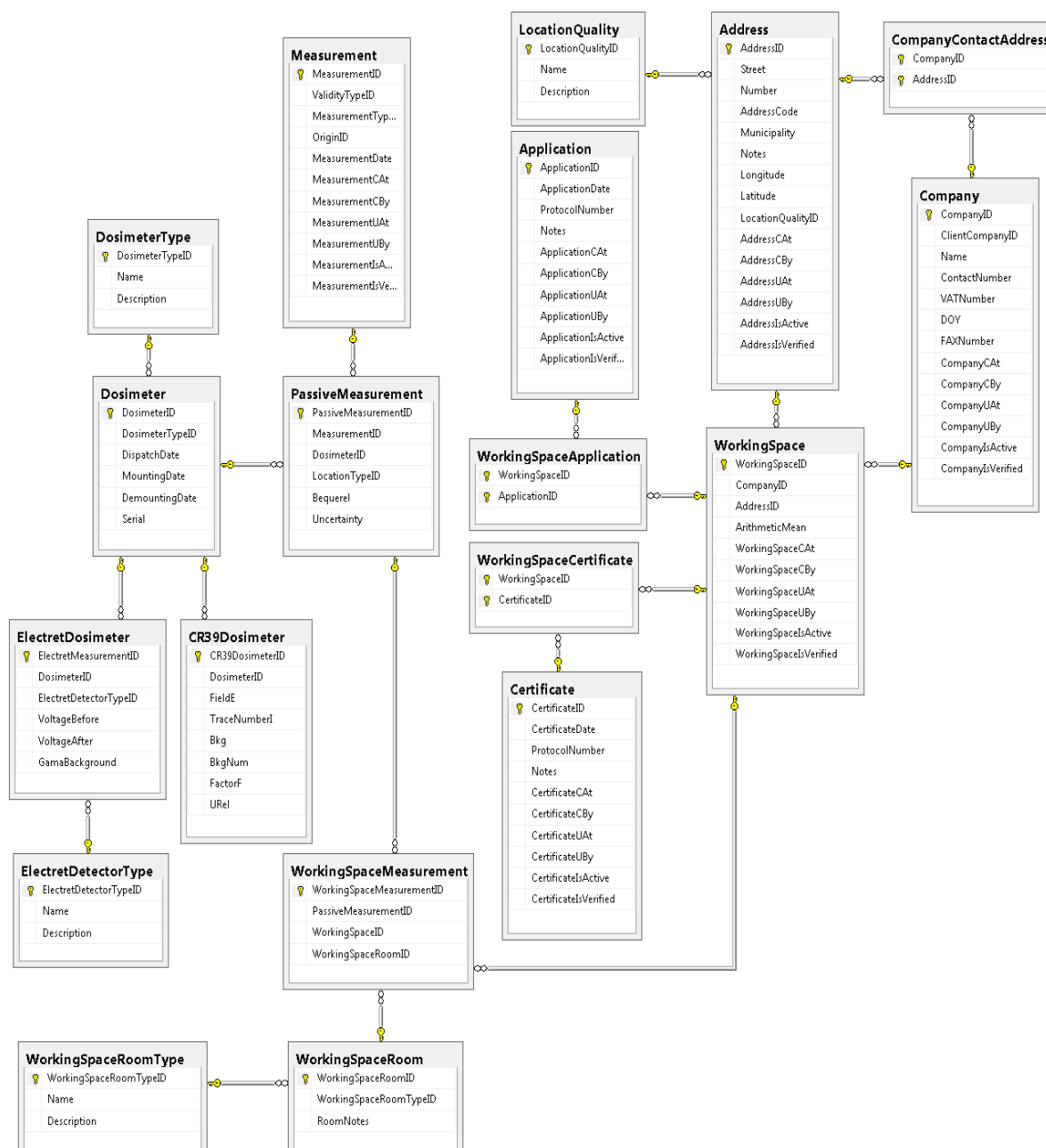
Η βάση δεδομένων διασυνδέεται με την πλατφόρμα Power BI για την οπτικοποίηση των δεδομένων.



Σχήμα 14.Συνολικό σχεδιακό διάγραμμα



Σχήμα 15. Σχεσιακό διάγραμμα με αποκλειστικά τις εμπλεκόμενες οντότητες/συσχετίσεις για τις κατοικίες.



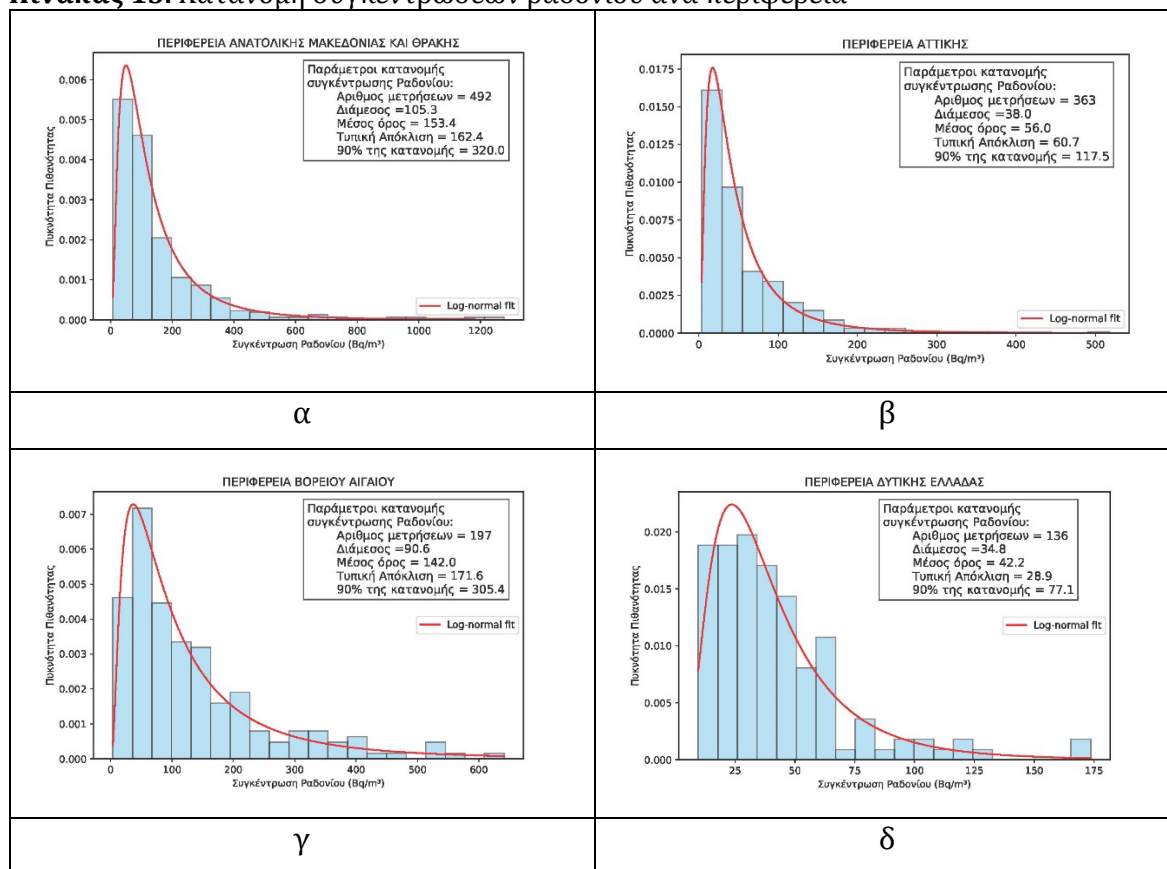
Σχήμα 16. Σχεσιακό διάγραμμα με αποκλειστικά τις εμπλεκόμενες οντότητες/συσχετίσεις για τους χώρους εργασίας

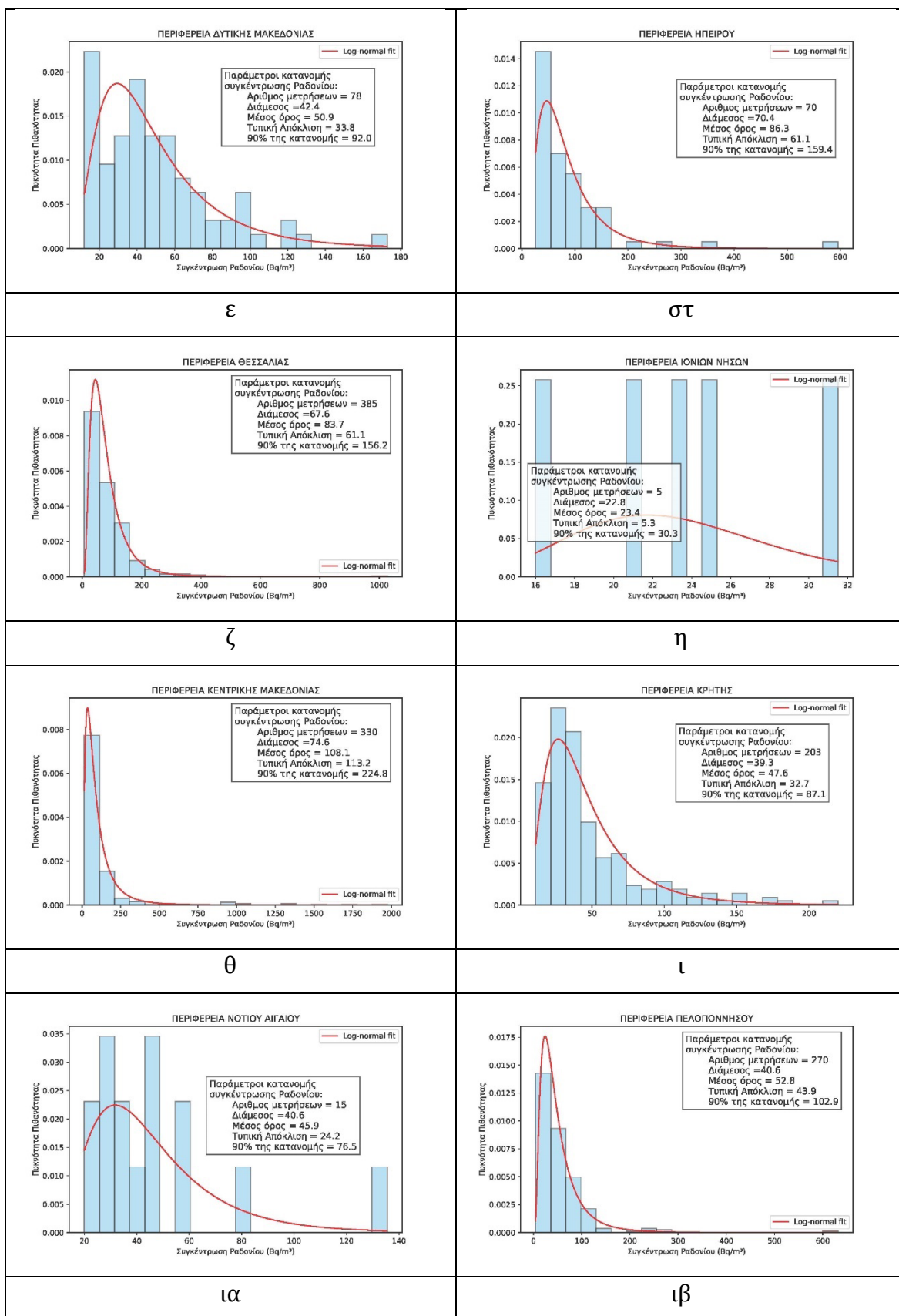
Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα

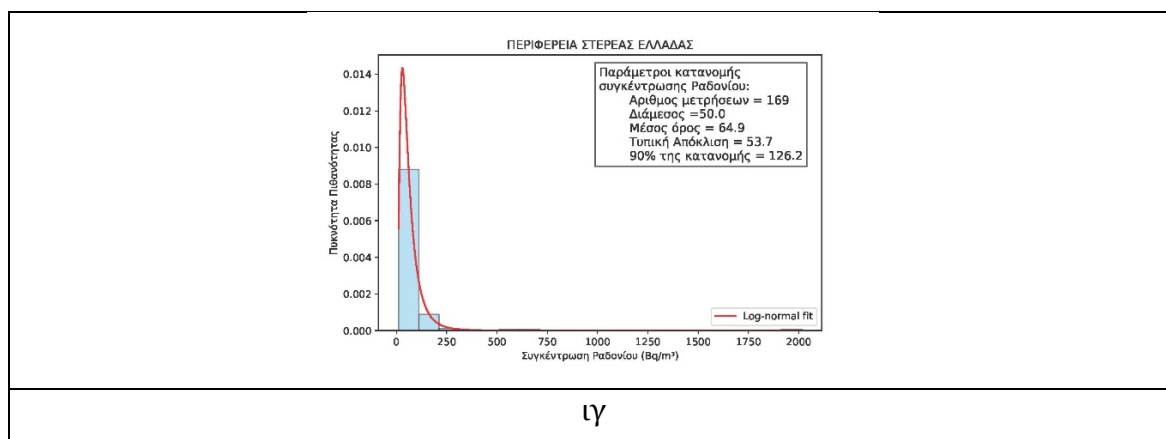
6.1. Κατανομή των συγκεντρώσεων ραδονίου στον ελλαδικό χώρο

Η βάση έδωσε τη δυνατότητα να προσδιοριστεί η υφιστάμενη κατάσταση της συγκέντρωσης του ραδονίου στον ελλαδικό χώρο τόσο στην επικράτεια όσο και ανά περιφερειακή ενότητα και να υπολογιστούν οι αντίστοιχες στατιστικές παράμετροι της κάθε κατανομής (Διάμεσος, Μέσος όρος, Τυπική Απόκλιση, 90% της κατανομής). Στον Πίνακα 13 παρουσιάζεται η κατανομή της συγκέντρωσης ραδονίου ανά περιφέρεια και στον Πίνακα 14 ανακεφαλαιώνονται οι κύριες στατιστικές παράμετροι ανά περιφέρεια. Για να παραχθούν οι ακόλουθοι πίνακες χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις της ΕΕΑΕ καθώς και μετρήσεις μεγάλου χρόνου σε κατοικίες προηγούμενης μελέτης [69] η οποία κάλυπτε κυρίως την Πελοπόννησο και την Κρήτη.

Πίνακας 13. Κατανομή συγκεντρώσεων ραδονίου ανά περιφέρεια







Πίνακας 14. Κύριες στατιστικές παράμετροι ανά περιφέρεια

Περιφέρεια	Πληθυσμός	Μετρημένες κατοικίες	Διάμεσος	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	90% της κατανομής
Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης	562,201	492	105.3	153.4	162.4	320
Αττικής	3,814,064	363	38	56	60.7	117.5
Βορείου Αιγαίου	194,943	197	90.6	142	171.6	305.4
Δυτικής Ελλάδας	648,220	136	34.8	42.2	28.9	77.1
Δυτικής Μακεδονίας	254,595	78	42.4	50.9	33.8	92
Ηπείρου	319,991	70	70.4	86.3	61.1	159.4
Θεσσαλίας	688,255	385	67.7	83.7	61.1	156.2
Ιονίων Νήσων	204,532	5	22.8	23.4	5.3	30.3
Κεντρικής Μακεδονίας	1,795,669	330	74.6	108.1	113.2	224.8
Κρήτης	624,408	203	39.3	47.6	32.7	87.1
Νοτίου Αιγαίου	327,820	15	40.6	45.9	24.2	76.5
Πελοποννήσου	539,535	270	40.6	52.8	43.9	102.9
Στερεάς Ελλάδας	508,254	169	50	64.9	53.7	126.2

Παρατηρώντας τα δεδομένα των μετρήσεων ραδονίου ανά περιφέρεια, μπορούμε να καταλήξουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Σημαντική διακύμανση μεταξύ των περιφερειών: Υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις συγκεντρώσεις ραδονίου μεταξύ των περιφερειών. Η Ανατολική Μακεδονία και Θράκη (διάμεσος: 105.3 Bq/m³) και το Βόρειο Αιγαίο (διάμεσος: 90.6 Bq/m³) εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές, ενώ το Ιόνιο (διάμεσος: 22.8 Bq/m³) και η Δυτική Ελλάδα (διάμεσος: 34.8 Bq/m³) τις χαμηλότερες.
- Υψηλές συγκεντρώσεις στις περιφέρειες Βορείου Αιγαίου και Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης: Αυτές οι περιφέρειες παρουσιάζουν όχι μόνο την υψηλότερη διάμεσο τιμή, αλλά και μια πολύ μεγάλη τιμή για το 90% της κατανομής. Αυτό σημαίνει ότι ένα σημαντικό ποσοστό των κατοικιών εκεί ξεπερνά το όριο των 300 Bq/m³ που έχει τεθεί ως όριο για την εφαρμογή μέτρων.
- Υψηλές μέσες τιμές σε σχέση με τη διάμεσο: Για τις περισσότερες περιφέρειες, ο μέσος όρος είναι σημαντικά υψηλότερος από τη διάμεσο. Αυτό είναι συνέπεια του ότι η κατανομή των συγκεντρώσεων ραδονίου ακολουθεί την λογαριθμοκανονική κατανομή.
- Σημαντική διακύμανση εντός των περιφερειών: Η τυπική απόκλιση είναι πολύ υψηλή, ιδιαίτερα στις περιφέρειες με υψηλές μέσες τιμές. Για παράδειγμα, στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη η τυπική απόκλιση είναι 162.4, υποδεικνύοντας ότι οι τιμές ραδονίου διαφέρουν πολύ μέσα στην ίδια περιφέρεια.

Για την εκτίμηση της έκθεσης του συνολικού πληθυσμού της Ελλάδας στο ραδόνιο, υπολογίστηκε η σταθμισμένη μέση τιμή της συγκέντρωσης ραδονίου, βασιζόμενη στις μέσες τιμές που μετρήθηκαν ανά περιφέρεια και στο μέγεθος του πληθυσμού κάθε περιφέρειας, σύμφωνα με την Απογραφή Πληθυσμού-Κατοικιών 2021 της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ). Για να υπολογιστεί η σταθμισμένη μέση τιμή συγκέντρωσης ραδονίου για το σύνολο της επικράτειας από τις μέσες τιμές ραδονίου ανά περιφέρεια, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

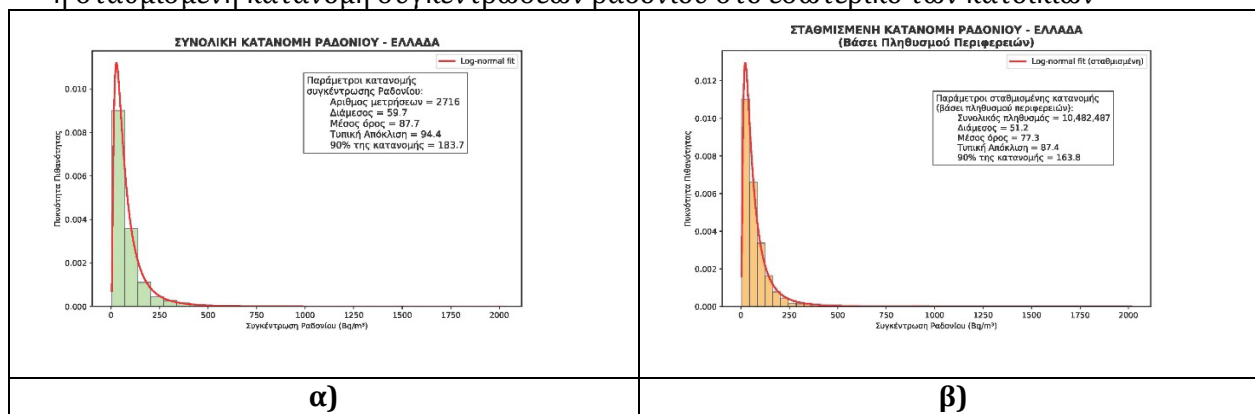
$$M_{weighted} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

όπου

- M_i : η μέση συγκέντρωση ραδονίου στην i -οστή περιφέρεια (σε Bq/m^3)
- P_i : ο πληθυσμός της i -οστής περιφέρειας
- n : το πλήθος των περιφερειών (13)

Ο υπολογισμός έδειξε ότι η σταθμισμένη μέση τιμή συγκέντρωσης ραδονίου είναι $77.3 Bq/m^3$, τιμή χαμηλότερη από τον απλό μέσο όρο του συνόλου των μετρήσεων ($87.7 Bq/m^3$). Αυτό οφείλεται στο σχετικά μεγαλύτερο πλήθος μετρήσεων που έγιναν στις περιφέρειες με αυξημένη μέση συγκέντρωση, όπως η Ανατολική Μακεδονία και Θράκη. Ο διάμεσος της σταθμισμένης κατανομής συγκέντρωσης ραδονίου στο εσωτερικό των κατοικιών είναι $51.2 Bq/m^3$ (πίνακας 15).

Πίνακας 15. (α) Η κατανομή των μετρήσεων συγκέντρωσης ραδονίου σε όλη τη χώρα και (β) η σταθμισμένη κατανομή συγκεντρώσεων ραδονίου στο εσωτερικό των κατοικιών



6.2. Συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδονίου και της χρονολογίας της κατοικίας

Μεταξύ των δεδομένων που αποθηκεύτηκαν στη βάση ραδονίου είναι και το έτος κατασκευής της κατοικίας. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο, αποστέλλονται δύο ανιχνευτές σε κάθε εθελοντή. Οι ανιχνευτές πρέπει να τοποθετούνται στον ισόγειο όροφο για διάστημα 6 έως 12 μηνών, σε δύο διαφορετικούς χώρους, κατά προτίμηση στο σαλόνι και το υπνοδωμάτιο. Μαζί με τους ανιχνευτές αποστέλλεται ερωτηματολόγιο, μέσω του οποίου συλλέγονται δεδομένα σχετικά με: τεχνικές κατασκευής του κτιρίου, έτος κατασκευής, οικοδομικά υλικά, ενεργειακή κλάση, όροφος, τρόπος και συχνότητα αερισμού, καθώς και συνήθειες καπνίσματος.

Η διοικητική δομή της Ελλάδας περιλαμβάνει τρεις βαθμίδες: τις 7 Αποκεντρωμένες Διοικήσεις, τις 13 Περιφέρειες και τους 332 Δήμους. Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης επιλέχθηκαν τρεις Αποκεντρωμένες Διοικήσεις και παρουσιάζεται η διακύμανση της συγκέντρωσης ραδονίου σε καθεμία από αυτές. Ο Χάρτης 1 απεικονίζει τις περιοχές αυτές:



1. Αποκεντρωμένη Διοίκηση Μακεδονίας και Θράκης,
2. Αποκεντρωμένη Διοίκηση Θεσσαλίας και Στερεάς Ελλάδας,
3. Αποκεντρωμένη Διοίκηση Αττικής.

Χάρτης 1. Απεικόνιση των Αποκεντρωμένων Διοικήσεων που μετρήθηκαν

Στο πλαίσιο της εθνικής έρευνας, στην Αττική, πραγματοποιήθηκαν 500 μετρήσεις σε κατοικίες, ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι 164, καθώς για τις υπόλοιπες δεν υπήρχε διαθέσιμη πληροφορία για το έτος κατασκευής. Στη Θεσσαλία και τη Στερεά Ελλάδα διανεμήθηκαν 900 ανιχνευτές σε τυχαία επιλεγμένους πολίτες από τις τοπικές αρχές, με ποσοστό επιστροφής 55%, και συνεπώς η ανάλυση βασίστηκε σε 315 κατοικίες. Στη Μακεδονία και Θράκη η μελέτη είναι ακόμη σε εξέλιξη, οπότε η παρούσα ανάλυση βασίστηκε σε 388 κατοικίες από τις μεγαλύτερες πόλεις.

Ο Πίνακας 16 παρουσιάζει τον αριθμό μετρήσεων ανά χρονική περίοδο σε κάθε διοικητική περιοχή, καθώς και μια γενική εκτίμηση για όλη τη χώρα. Ο Πίνακας 17 παρουσιάζει τα αντίστοιχα εύρη συγκέντρωσης ραδονίου.

Πίνακας 16. Αριθμός μετρήσεων ανά χρονική περίοδο σε κάθε Αποκεντρωμένη Διοίκηση

Περιοχή	<1960	1960–1969	1970–1979	1980–1989	1990–1999	>2000
Αττική	16	10	30	29	36	43
Θεσσαλία & Στερεά Ελλάδα	35	30	55	74	52	77
Μακεδονία & Θράκη	36	27	50	58	57	87
Ελλάδα	97	84	150	194	175	256

Πίνακας 17. Εύρος συγκέντρωσης ραδονίου (Bq/m^3) ανά χρονική περίοδο και περιοχή

Περιοχή	<1960	1960–1969	1970–1979	1980–1989	1990–1999	>2000
Αττική	22–165	9–132	12–65	7–143	12–192	9–175
Θεσσαλία & Στερεά Ελλάδα	21–270	17–389	12–206	13–319	17–197	19–375
Μακεδονία & Θράκη	30–454	36–650	17–358	11–370	26–231	28–376
Ελλάδα	21–454	9–650	10–925	7–370	12–288	7–1973

Οι κατοικίες που κατασκευάστηκαν πριν από το 1960 και μετά το 2000 ομαδοποιήθηκαν, λόγω ανεπαρκούς αριθμού μετρήσεων. Υπολογίστηκε η αριθμητική μέση τιμή και το αντίστοιχο διάστημα εμπιστοσύνης για κάθε ομάδα.

Για τη στατιστική ανάλυση, ορίστηκαν τρεις ομάδες ανάλογα με το έτος κατασκευής,

(α) Προ του 1970

(β) Από 1970 έως 2000

(γ) Μετά το 2000

και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος t-test, για να διαπιστωθεί αν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων.

Όλα τα διαγράμματα (Σχήμα 17) καταδεικνύουν ότι οι κατοικίες που κατασκευάστηκαν πριν το 1970 παρουσιάζουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου. Η τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου παρουσιάζει σημαντική μείωση έως τη δεκαετία του 1970, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τον στατιστικό έλεγχο t-test

μεταξύ των ομάδων (α) και (β), για επίπεδο σημαντικότητας 5%. Τα αποτελέσματα των ελέγχων t-test παρουσιάζονται στον Πίνακα 18.

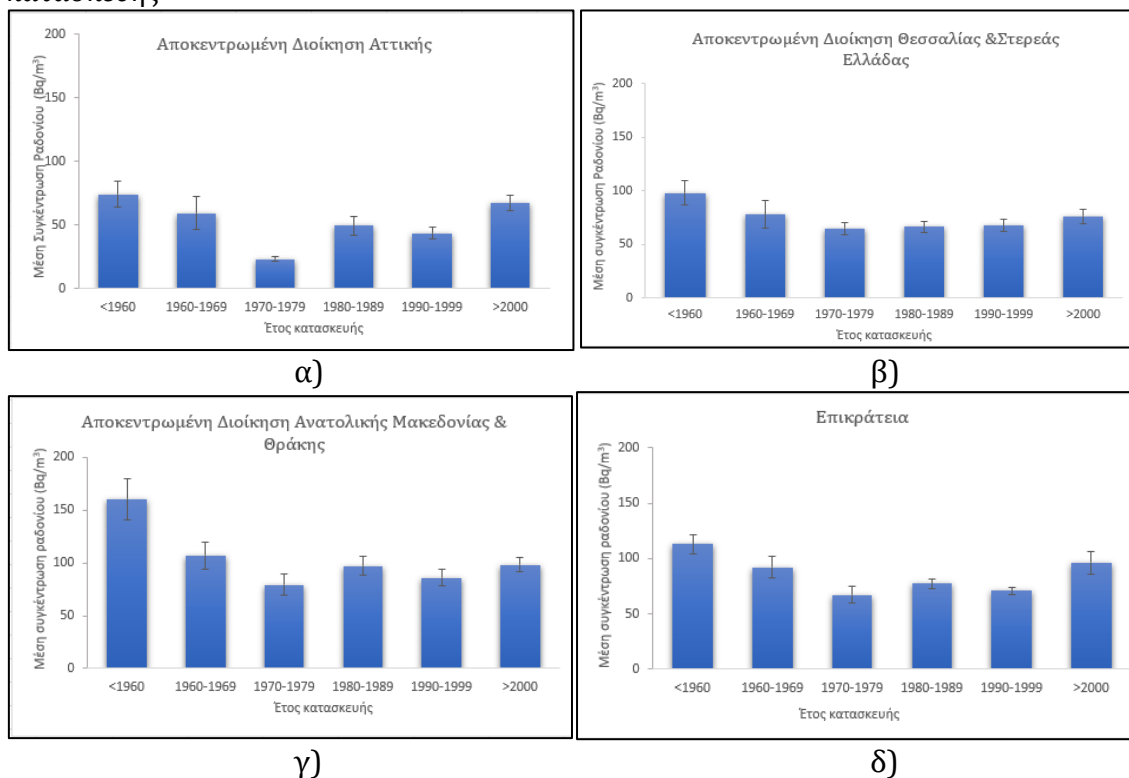
Πίνακας 18. Αποτελέσματα t-test μεταξύ χρονικών ομάδων

Περιοχή	t-test (α vs β)	t-test (β vs γ)
Αττική	0.36%	0.02%
Θεσσαλία & Στερεά Ελλάδα	1.67%	18.83%
Μακεδονία & Θράκη	0.05%	21.16%
Ελλάδα	0.003%	1.96%

Η σύγκριση των κατοικιών που κατασκευάστηκαν μεταξύ 1970 και 2000 δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές· επομένως, η μέση τιμή ραδονίου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για την εν λόγω χρονική περίοδο.

Αν και στην αγροτική Ελλάδα (δηλαδή περιοχές με πληθυσμό < 2.000 κατοίκους) οι κατοικίες μετά το 2000 δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές, στην Αττική και σε πανελλαδικό επίπεδο, παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του ραδονίου μεταξύ των ομάδων (β) και (γ), όπως αποδεικνύεται από το αντίστοιχο t-test.

Σχήμα 17. Μέση συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους σε συνάρτηση με το έτος κατασκευής



Αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου σε κατοικίες κατασκευασμένες πριν το 1970 μπορούν να αποδοθούν σε διάφορους παράγοντες, κυρίως σχετιζόμενους με τα δομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις αντίστοιχες χρονικές περιόδους.

Καταρχάς, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο τύπος θεμελίωσης και δαπέδων. Οι κατοικίες που ανεγέρθηκαν πριν τη δεκαετία του 1970 διέθεταν ξύλινα δάπεδα· οι ρωγμές και τα κενά που εμφανίζονται με την πάροδο του χρόνου, λόγω φυσικής φθοράς, ευνοούν τη μεταφορά ραδονίου από το υπέδαφος προς το εσωτερικό του κτιρίου.

Ένας δεύτερος παράγοντας σχετίζεται με τα οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των τοίχων. Στην Ελλάδα, η πλειονότητα των κατοικιών που ανεγέρθηκαν πριν το 1970, ιδιαίτερα στις αγροτικές περιοχές, ήταν κατασκευασμένες από πέτρα – υλικό που σχετίζεται με υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου. Σε αυτές τις περιοχές, παρατηρείται γενικά αυξημένη συγκέντρωση, ενώ στις νεότερες κατασκευές η μείωση γίνεται πιο απότομη.

Ένας τρίτος κρίσιμος παράγοντας είναι ο τύπος των κουφωμάτων (παραθύρων και εξωτερικών θυρών, όπως οι μπαλκονόπορτες). Τα υλικά, ο σχεδιασμός και η λειτουργία τους είναι καθοριστικά σε ό,τι αφορά τον αερισμό των εσωτερικών χώρων, καθώς συχνά αποτελούν τη μοναδική διαθέσιμη μορφή φυσικού αερισμού[70]. Οι κατοικίες που κατασκευάστηκαν έως τη δεκαετία του 1970 διέθεταν κουφώματα με μονό υαλοπίνακα ενσωματωμένο σε ξύλινο πλαίσιο. Κατά την περίοδο 1970-2000, αν και το αλουμίνιο αντικατέστησε σε μεγάλο βαθμό το ξύλο, δεν υπήρχαν πρότυπα που να ρυθμίζουν την ποιότητα και την απόδοσή τους. Στη σύγχρονη εποχή, τα συνήθη κουφώματα είναι πλέον διπλού υαλοπίνακα [71]. Επιπλέον, η ελληνική πολιτεία επιχορήγησε την αντικατάσταση παλαιών κουφωμάτων σε κατοικίες κατασκευασμένες προ του 1970, με ενεργειακά αποδοτικότερα, γεγονός που τροποποίησε σημαντικά το ποσοστό αερισμού των εσωτερικών χώρων.

Η παρατηρούμενη μείωση στη συγκέντρωση ραδονίου σε νεότερες κατοικίες, η οποία έχει επίσης τεκμηριωθεί και σε άλλες μελέτες, έχει αποδοθεί κυρίως στην πετρελαϊκή κρίση του 1974, η οποία οδήγησε σε σημαντικές αλλαγές στην προσέγγιση

ενεργειακού σχεδιασμού των κτιρίων, βελτιώνοντας τη μόνωση των δαπέδων και την ποιότητα των υλικών [72] [73].

Στην Αττική, παρατηρείται σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων ραδονίου σε κατοικίες που ανεγέρθηκαν μετά το 2000. Η αύξηση αυτή σχετίζεται με την εφαρμογή του νέου Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK). Ο νέος κανονισμός οδήγησε σε τεχνικές που αποσκοπούν στη μέγιστη δυνατή αεροστεγανότητα των κατασκευών, ώστε να επιτευχθούν υψηλότερα επίπεδα ενεργειακής απόδοσης. Η αλλαγή αυτή είχε σαφή αντίκτυπο στην τελική κατανάλωση ενέργειας των νοικοκυριών. Συγκεκριμένα, μεταξύ 2000 και 2019, η κατανάλωση ενέργειας μειώθηκε κατά 10%, από 4,6 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (Mtoe) το 2000, σε 4.1 Mtoe το 2019 [74].

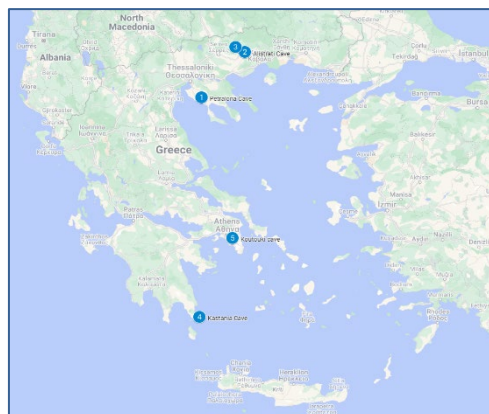
Δεδομένου ότι η Αττική φιλοξενεί περίπου το ήμισυ του πληθυσμού της Ελλάδας, τα ευρήματα της περιοχής αντανakλούν εν πολλοίς τις τάσεις που παρατηρούνται και σε άλλα μεγάλα αστικά κέντρα.

6.4. Έκθεση εργαζομένων στο ραδόνιο σε τουριστικά σπήλαια

Μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση, εντοπίστηκαν τα εν ενεργεία τουριστικά σπήλαια στον ελλαδικό χώρο και επιλέχθηκαν πέντε από αυτά. Κριτήρια επιλογής ήταν η γεωγραφική θέση σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φυσική ραδιενέργεια και η συγκέντρωση ραδονίου που έχει καταγραφεί στη βιβλιογραφία.

Τα σπήλαια που επιλέχθηκαν ήταν:

1. Σπήλαιο Πετραλώνων
2. Σπηλαίο Μααρά
3. Σπηλαίο Αλιστράτης
4. Σπήλαιο Καστανιάς
5. Σπηλαίο Κουτούκι



Χάρτης 2. Απεικόνιση σπηλαίων

Η συγκέντρωση ραδονίου σε ένα σπήλαιο επηρεάζεται από:

- τη δυνατότητα διαφυγής του ραδονίου από τα πετρώματα (pressure gradient),

- την περιεκτικότητα των πετρωμάτων σε ράδιο και
- τη συγκέντρωση υγρασίας στο υπέδαφος.

Η συγκέντρωση ραδονίου στα σπήλαια παρουσιάζει σημαντική εποχιακή διακύμανση με υψηλότερες τιμές το καλοκαίρι και χαμηλότερες τον χειμώνα σε αντίθεση με τις κατοικίες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της καμινάδας (stack effect) που παρατηρείται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στο εσωτερικό από το εξωτερικό. Για τον λόγο αυτό οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τη θερινή περίοδο.

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο, που ακολουθήθηκε για τη μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου, επαρκής αριθμός ανιχνευτών κατανεμήθηκε χωρικά εντός κάθε σπηλαίου, καλύπτοντας όλες τις περιοχές με υψηλή ανθρώπινη παρουσία. Οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου που καταγράφηκαν για κάθε σπήλαιο καθώς και το πλήθος των ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 19.

Πίνακας 19. Αριθμός ανιχνευτών και εύρος συγκέντρωσης ραδονίου

Σπήλαιο	Αριθμός ανιχνευτών	Συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m ³)
Πετραλώνων	14	70 – 3500
Μααρά	7	90 – 2425
Αλιστράτης	12	70 – 1910
Καστανιάς	6	25 – 1960
Κουτούκι	10	50 – 165

Για τον υπολογισμό της ενεργού δόσης εφαρμόστηκε ο συντελεστής δόσης που προτείνεται από την ICRP στην Έκθεση 137 (παράγραφος 12.7), ο οποίος ανέρχεται σε 6 mSv ανά $\text{mJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$, που αντιστοιχεί σε 13×10^{-6} mSv ανά $\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ [9]. Οι εργαζόμενοι που δαπανούν τον περισσότερο χρόνο εντός των σπηλαίων είναι οι ξεναγοί. Η εκτίμηση της ετήσιας ενεργού δόσης για τους εργαζόμενους αυτούς σε κάθε σπήλαιο πραγματοποιήθηκε με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$D = t_y \cdot CF \cdot \left((1 - p_c) \cdot C_o + p_c \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N C_i \right) \quad (1)$$

όπου:

- D: ετήσια ενεργός δόση (mSv/έτος)
- t_y : συνολικές ώρες εργασίας ανά έτος (ώρες)
- CF: συντελεστής μετατροπής δόσης (mSv ανά $\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)
- C_o : συγκέντρωση ραδονίου στον χώρο του εκδοτηρίου εισιτηρίων
- p_c : ποσοστό των ωρών εργασίας που πραγματοποιούνται εντός του σπηλαίου

- C_i : συγκέντρωση ραδονίου στη θέση i κατά μήκος της διαδρομής των ξεναγών
- N : πλήθος σημείων μέτρησης κατά μήκος της τουριστικής διαδρομής

Η συνολική ετήσια διάρκεια εργασίας (t_y) κάθε εργαζομένου θεωρείται ίση με 2000 ώρες. Το ποσοστό του χρόνου εργασίας που αντιστοιχεί σε δραστηριότητες εντός του κάθε σπηλαίου (p_c) παρέχεται από την αντίστοιχη διαχειριστική αρχή του σπηλαίου και παρουσιάζεται στον Πίνακα 20. Οι ξεναγοί περνούν τον υπόλοιπο χρόνο της εργασίας τους, πέραν των δραστηριοτήτων εντός του σπηλαίου, στον χώρο του εκδοτηρίου. Η τοποθέτηση των ανιχνευτών πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτονται τα σημεία στάσης κατά μήκος της διαδρομής που ακολουθούν οι ξεναγοί. Υπολογίζεται ότι ο χρόνος παραμονής των ξεναγών στο εσωτερικό του σπηλαίου κατανέμεται ομοιόμορφα στα προκαθορισμένα σημεία της διαδρομής.

Πίνακας 20. Ποσοστό του χρόνου εργασίας που πραγματοποιείται εντός του σπηλαίου

Σπήλαιο	Πετραλώνων	Μααρά	Αλιστράτης	Καστανιάς	Κουτούκι
Ποσοστό χρόνου εντός σπηλαίου (p_c)	47%	18.75%	50%	50%	50%

Οι μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε σπήλαιο παρουσιάζονται στους πίνακες 21-24. Οι αντίστοιχες εκτιμώμενες ετήσιες ενεργές δόσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 25.

Πίνακας 21. Συγκεντρώσεις ραδονίου στο Σπήλαιο Μααρά

Θέση μέτρησης	Συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m^3)
Εκδοτήριο εισιτηρίων	90 ± 6
Είσοδος	315 ± 21
Πρώτο άνοιγμα	2420 ± 160
Δεύτερο άνοιγμα	2060 ± 130
Νησί	1960 ± 130
150 μ πριν το τέλος	2080 ± 140
Τέλος	1970 ± 130

Πίνακας 22. Συγκεντρώσεις ραδονίου στο Σπήλαιο Αλιστράτης

Θέση μέτρησης	Συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m^3)
Εκδοτήριο εισιτηρίων	69 ± 4
Είσοδος	690 ± 50
Πρώτο άνοιγμα	650 ± 40
Αίθουσα Συμεωνίδα 1	730 ± 50
Αίθουσα Συμεωνίδα 2	730 ± 50
Αίθουσα Μέδουσας	720 ± 50
Διάδρομος	830 ± 50
Αίθουσα Φλόγας	1200 ± 80

Κολώνα 310	1000 ± 70
Κολώνα 375	1910 ± 120
Τελευταία κολώνα	1710 ± 110
Τέλος	650 ± 40

Πίνακας 23. Συγκεντρώσεις ραδονίου στο Σπήλαιο Καστανιάς

Θέση μέτρησης	Συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m ³)
Εκδοτήριο εισιτηρίων	25 ± 2
Είσοδος	186 ± 12
Πρώτος κόμβος διαδρομής	440 ± 40
Δεύτερος κόμβος διαδρομής	403 ± 26
Κατώτερο σημείο διαδρόμου	1960 ± 130
Τέλος	540 ± 40

Πίνακας 24. Συγκεντρώσεις ραδονίου στο Σπήλαιο Κουτούκι

Θέση μέτρησης	Συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m ³)
Εκδοτήριο εισιτηρίων	164 ± 11
Είσοδος	50 ± 3
Δεύτερη είσοδος	60 ± 4
Πρώτο άνοιγμα	122 ± 8
Χαμηλότερο σημείο	110 ± 7
Πριν τη φλόγα των Ολυμπιακών	89 ± 6
Μετά τη φλόγα των Ολυμπιακών	79 ± 5
Απαγορευμένος χώρος	68 ± 4
Φυσική είσοδος	71 ± 5
Δεύτερο άνοιγμα	79 ± 5

Πίνακας 25. Ετήσιες ενεργές δόσεις σε εργαζόμενους στα σπήλαια

Σπήλαιο	Ετήσια ενεργός δόση (mSv/έτος)
Σπήλαιο Μααρά	10.4
Σπήλαιο Αλιστράτης	13.7
Σπήλαιο Καστανιάς	9.5
Σπήλαιο Κουτούκι	3.2

Το σπήλαιο Πετραλώνων, το οποίο εμφάνισε τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ραδονίου, επιλέχθηκε για περαιτέρω μετρήσεις (Πίνακας 26) σε διαδοχικές χρονικές περιόδους που καλύπτουν ολόκληρο το έτος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις χρονικές περιόδους:

- Περίοδος Α από 30/06/2022 έως 18/10/2022 (110 ημέρες)
- Περίοδος Β από 18/10/2022 έως 06/03/2023 (139 ημέρες)
- Περίοδος Γ από 06/03/2023 έως 12/07/2023 (128 ημέρες)

Πίνακας 26. Συγκεντρώσεις ραδονίου στο Σπήλαιο Πετραλώνων

Θέση μέτρησης	Συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m ³) Περίοδος Α	Συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m ³) Περίοδος Β	Συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m ³) Περίοδος Γ
Εκδοτήριο εισιτηρίων	70 ± 5	75 ± 5	73 ± 5
Εσωτερικός κόμβος	780 ± 50	1080 ± 70	830 ± 50
Εξωτερικός κόμβος	820 ± 50	1140 ± 70	870 ± 60
Μεγάλη αίθουσα (είσοδος)	860 ± 60	1040 ± 70	820 ± 50
Μεγάλη αίθουσα (έξοδος)	860 ± 60	1170 ± 80	860 ± 60
Άβυσσος	810 ± 50	810 ± 50	1130 ± 70
Μαυσωλείο (είσοδος)	2380 ± 160	960 ± 60	550 ± 40
Μαυσωλείο (έξοδος)	1940 ± 130	890 ± 60	520 ± 30
Κώνος	710 ± 50	720 ± 50	640 ± 40
Μικρή αίθουσα (είσοδος)	890 ± 60	1850 ± 120	1140 ± 70
Μικρή αίθουσα (έξοδος)	810 ± 50	1680 ± 110	1000 ± 60
Είσοδος	2010 ± 130	1000 ± 60	670 ± 40
Διάδρομος (είσοδος)	3500 ± 230	2000 ± 130	1460 ± 100
Διάδρομος (έξοδος)	1400 ± 90	780 ± 50	670 ± 40

Βάσει του επίσημου ωραρίου εργασίας, προσδιορίστηκε ότι κατά την Περίοδο Α οι εργαζόμενοι παραμένουν εντός του σπηλαίου κατά μέσο όρο 5.6 ώρες ημερησίως, κατά την Περίοδο Β, 2 ώρες ημερησίως και κατά την Περίοδο Γ, 4 ώρες ημερησίως, με τον χρόνο εργασίας να κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ των καθορισμένων θέσεων μέτρησης. Στον Πίνακα 24 εκτιμώνται οι συνολικές ώρες εργασίας για κάθε χρονική περίοδο. Εφαρμόζοντας την εξίσωση (1), υπολογίζεται η ενεργός δόση ανά περίοδο, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται επίσης στον Πίνακα 27.

Πίνακας 27. Διάρκεια μέτρησης, χρόνος εργασίας και ετήσιες ενεργές δόσεις στο Σπήλαιο Πετραλώνων

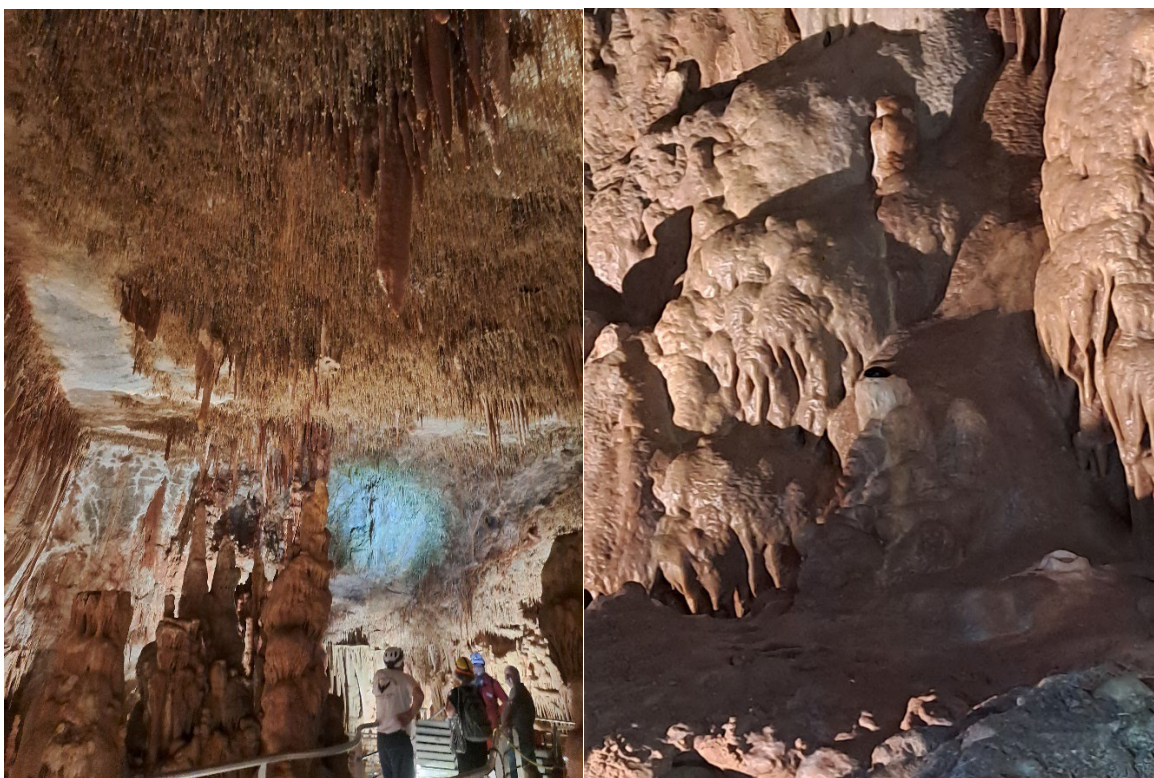
Χρονική περίοδος	Διάρκεια μέτρησης (ημέρες)	Ποσοστό χρόνου εργασίας εντός σπηλαίου (p_{ci})	Ημέρες εργασίας ανά περίοδο	Ώρες εργασίας ανά περίοδο (t_{yi})	Ενεργός δόση (mSv)
A	110	70%	73	584	7.4
B	139	25%	92	736	3.3
Γ	128	50%	85	680	4.1
Ετήσια ενεργός δόση (mSv/έτος)					14.8

Οι συγκεντρώσεις ραδονίου παρουσιάζουν αυξημένα επίπεδα κατά τη θερινή περίοδο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες εποχές του έτους (φθινόπωρο-χειμώνας) [75] [76]. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το Σπήλαιο Πετραλώνων επιβεβαιώνουν αυτή την παρατήρηση, με μέση συγκέντρωση ραδονίου 1367 Bq/m^3 κατά την Περίοδο Α (καλοκαίρι), έναντι 1170 Bq/m^3 και 860 Bq/m^3 για τις περιόδους Β και Γ (φθινόπωρο και χειμώνας), αντίστοιχα. Εάν η ετήσια ενεργός δόση για τους εργαζόμενους στο σπήλαιο Πετραλώνων υπολογιζόταν αποκλειστικά με βάση τις θερινές μετρήσεις ραδονίου (Περίοδος Α), η εκτιμώμενη ετήσια ενεργός δόση θα ανερχόταν σε 18 mSv/έτος .

Οι μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου σε κάθε σπήλαιο καταγράφουν ευρύ φάσμα τιμών. Ως εκ τούτου, απαιτείται λεπτομερής περιγραφή των συνθηκών εργασίας, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ρεαλιστική αποτίμηση της δόσης. Η εκτιμώμενη ετήσια ενεργός δόση κυμαίνεται μεταξύ 3.2 και 15.0 mSv/έτος . Από τα πέντε σπήλαια που μελετήθηκαν, τα τέσσερα υπερβαίνουν το όριο των 6 mSv που ορίζεται από τη νομοθεσία. Δεδομένου ότι η εφαρμογή διορθωτικών μέτρων δεν είναι εφικτή, τα συγκεκριμένα σπήλαια υπάγονται σε καθεστώς ρυθμιστικού ελέγχου μέσω της διαδικασίας της γνωστοποίησης.

Πραγματοποιήθηκε εμπεριστατωμένη μελέτη στο σπήλαιο Πετραλώνων, με σκοπό την αξιολόγηση της ετήσιας διακύμανσης των συγκεντρώσεων ραδονίου και την επιβεβαίωση βασικών παραδοχών που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση της ενεργού δόσης των εργαζομένων. Η ενεργός δόση στο σπήλαιο των Πετραλώνων εκτιμήθηκε

στα 15 mSv/έτος, ενώ ο υπολογισμός που βασίστηκε αποκλειστικά σε θερινές μετρήσεις απέδωσε εκτιμώμενη δόση 18 mSv/έτος. Τα αποτελέσματα της μελέτης τεκμηριώνουν ότι οι εκτιμήσεις της ενεργού δόσης, όταν βασίζονται αποκλειστικά σε μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου που πραγματοποιούνται κατά τη θερινή περίοδο, συνιστούν ρεαλιστική αλλά συντηρητικά υπερεκτιμημένη προσέγγιση της ετήσιας δόσης. Η υπερεκτίμηση αυτή δύναται να λειτουργήσει ως πρακτική και ασφαλής βάση για την έναρξη της διαδικασίας ρυθμιστικού ελέγχου, ιδίως σε περιπτώσεις όπου η συνεχής εποχική παρακολούθηση δεν είναι εφικτή. Μια τέτοια προσέγγιση διασφαλίζει ότι οι εργαζόμενοι προστατεύονται ακόμη και υπό τις δυσμενέστερες συνθήκες έκθεσης.



Σχήμα 18. Σπήλαιο Πετραλώνων



Σχήμα 19. Σπήλαιο Πετραλώνων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή είχε ως στόχο την ανάπτυξη και εφαρμογή μιας ολοκληρωμένης και καινοτόμου μεθοδολογίας για τη μελέτη της συγκέντρωσης ραδονίου σε κατοικίες και χώρους εργασίας στον ελλαδικό χώρο, με σκοπό την ενίσχυση της επιστημονικής τεκμηρίωσης και την υποστήριξη της εφαρμογής του Εθνικού Σχεδίου Δράσης για το Ραδόνιο. Η μελέτη αυτή αποτελεί την πρώτη συστηματική προσέγγιση που συνδυάζει μεγάλου εύρους μετρητικά δεδομένα, γεωγραφική ανάλυση, στατιστική επεξεργασία και εκτίμηση της ατομικής δόσης, συμβάλλοντας αποφασιστικά στην κατανόηση του φαινομένου της έκθεσης στον ελλαδικό χώρο.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται στα εξής:

✓ **Ανάπτυξη και επικύρωση μεθοδολογίας μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου**

Η μεθοδολογία για την αποτύπωση της συγκέντρωσης ραδονίου σε κλειστούς χώρους, τόσο σε κατοικίες όσο και σε εργασιακούς χώρους, βασίστηκε στη χρήση παθητικών ανιχνευτών πυρηνικών ιχνών στερεάς κατάστασης (CR-39), με διάρκεια έκθεσης τριών μηνών, σύμφωνα με διεθνή πρότυπα. Οι ανιχνευτές βαθμονομήθηκαν σε συνεργασία με το γερμανικό εργαστήριο BfS στο πλαίσιο δύο διεθνών διασυγκρίσεων, το 2021 και 2023, με εξαιρετική επίδοση και μέγιστη απόκλιση μόλις 3%. Η συνολική διαδικασία προσαρμόστηκε και βελτιστοποιήθηκε (παράμετροι χημικής διάβρωσης, υπολογισμός υποβάθρου, ψηφιακή ανάλυση εικόνας), εξασφαλίζοντας υψηλή αναπαραγωγιμότητα και ακρίβεια, επιτρέποντας την υιοθέτησή της ως πρότυπο για μελλοντικές εφαρμογές.

✓ **Δημιουργία εθνικής βάσης δεδομένων ραδονίου**

Αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα ολοκληρωμένη ψηφιακή βάση δεδομένων ραδονίου, με δυνατότητα συσχέτισης με τεχνικά, περιβαλλοντικά και δημογραφικά χαρακτηριστικά. Η βάση είναι εγκατεστημένη σε Windows Server, υποστηρίζει την εισαγωγή νέων δεδομένων, είναι δυναμικά επεκτάσιμη, πλήρως παραμετροποιήσιμη, και ενσωματώνει δυνατότητες στατιστικής επεξεργασίας και απεικόνισης μέσω

Power BI. Η πρωτοτυπία της έγκειται στη δομή, το εύρος και τη διαλειτουργικότητά της, στοιχεία που οδήγησαν στην παρουσίασή της σε επίσημη τεχνική συνάντηση της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ). Η αναγνώριση που έλαβε από τη διεθνή κοινότητα οδήγησε στην επίσημη έκφραση ενδιαφέροντος από διάφορα κράτη για μετάφραση και εφαρμογή του μοντέλου. Η εν λόγω βάση θέτει τα θεμέλια για τη διαμόρφωση αποτελεσματικής ακτινοπροστατευτικής πολιτικής, τόσο σε εθνικό όσο και σε διακρατικό επίπεδο.

✓ **Κατανομή ραδονίου στον ελλαδικό χώρο**

Η ανάλυση του μεγάλου όγκου των συλλεγμένων δεδομένων ανέδειξε για πρώτη φορά τη γεωγραφική διαφοροποίηση της συγκέντρωσης ραδονίου ανά περιφέρεια της χώρας. Η κατανομή ακολουθεί λογαριθμοκανονική μορφή, με διάμεσες τιμές μεταξύ 22–105 Bq/m³, επιβεβαιώνοντας την υψηλή χωρική μεταβλητότητα που σχετίζεται με τη γεωλογία, τη δομή του κτιριακού αποθέματος και τη χρονική περίοδο κατασκευής. Η πρωτογενής αυτή απεικόνιση αποτελεί κρίσιμο εργαλείο εντοπισμού περιοχών υψηλής προτεραιότητας και συμβάλλει στη στοχευμένη προστασία του πληθυσμού από τις στοχαστικές επιπτώσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

✓ **Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου και χρονολογίας κατασκευής**

Καταγράφηκε στατιστικά σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων ραδονίου στις κατοικίες που κατασκευάστηκαν μετά το 1970. Η σημαντικότερη διαφορά διαπιστώθηκε μεταξύ των περιόδων προ και μετά το 1970, γεγονός που αποδίδεται στις διαφοροποιήσεις των οικοδομικών υλικών και των αρχιτεκτονικών προτύπων αερισμού. Μεταξύ των περιόδων 1970–2000 και μετά το 2000 παρατηρείται σημαντική αύξηση σε αστικές περιοχές, κυρίως λόγω των αυξημένων μέτρων θερμομόνωσης και ελαχιστοποίησης του φυσικού αερισμού.

✓ **Έκθεση εργαζομένων σε τουριστικά σπήλαια**

Η εκτίμηση της ετήσιας δόσης σε εργαζόμενους πέντε τουριστικών σπηλαίων στην Ελλάδα έδειξε ότι στο 80% των περιπτώσεων υπερβαίνεται το ρυθμιστικό όριο των 6 mSv/έτος, με τις δόσεις να κυμαίνονται από 3.2 έως 15 mSv/έτος. Η ειδική μελέτη στο σπήλαιο Πετραλώνων κατέδειξε τη σημασία της εποχικότητας: οι θερινές μετρήσεις υπερεκτιμούν την ετήσια δόση κατά

περίπου 20%, αναδεικνύοντας την ανάγκη συνεχούς ή επαναλαμβανόμενης παρακολούθησης. Η μελέτη αυτή αποτελεί πρωτογενές υλικό για τη ρύθμιση της ακτινοπροστασίας σε σπήλαια, ένα πεδίο στο οποίο υπήρχε έως τώρα επιστημονικό και θεσμικό κενό στη χώρα.

Η παρούσα διατριβή μπορεί να αποτελέσει μια σημαντική συμβολή για ένα ολοκληρωμένο εθνικό πλαίσιο διαχείρισης του ραδονίου, συνδυάζοντας την επιστημονική γνώση με τις πρακτικές ανάγκες της χώρας και την ισχύουσα νομοθεσία. Η συνέχεια αυτής της έρευνας θα συμβάλει καθοριστικά στην προστασία της δημόσιας υγείας από την έκθεση στο ραδόνιο. Συγκεκριμένα:

✓ **Επέκταση γεωγραφικής κάλυψης και λεπτομερής χαρτογράφηση**

Συστηματική δειγματοληψία σε υποεκπροσωπούμενες περιοχές (ορεινές, ημιορεινές, νησιωτικές). Ανάπτυξη λεπτομερών χαρτών κινδύνου ραδονίου (radon risk maps) σε επίπεδο δήμου με χρήση γεωστατιστικών εργαλείων (GIS).

✓ **Μακροχρόνια παρακολούθηση συγκεντρώσεων και εποχιακών διακυμάνσεων**

Εφαρμογή συνεχούς παρακολούθησης σε επιλεγμένα σημεία για την κατανόηση της χρονικής διακύμανσης. Ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων πρόβλεψης βάσει εξωτερικών παραμέτρων (υγρασία, θερμοκρασία, υποπίεση κ.λπ.).

✓ **Εκτεταμένη Έρευνα σε Χώρους Εργασίας**

Εκτενέστερη διερεύνηση σε άλλους χώρους εργασίας με πιθανή υψηλή συγκέντρωση ραδονίου (π.χ. ορυχεία, υπόγειες εγκαταστάσεις).

✓ **Συσχέτιση με Δεδομένα Δημόσιας Υγείας**

Η διενέργεια επιδημιολογικών μελετών στην Ελλάδα, συσχετίζοντας τα επίπεδα ραδονίου από την αναπτυχθείσα βάση δεδομένων με επιπτώσεις στην υγεία (π.χ. καρκίνος του πνεύμονα), θα ενισχύσει την τεκμηρίωση για την ανάγκη λήψης μέτρων πολιτικής.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Kolovou, C. Potiriadis, N. Kallithrakas-Kontos, E. Manoutsoglou, and V. Giannopoulos, "Radon measurements and occupational dose assessment in Greek tourist caves," *The European Physical Journal Special Topics*, Mar. 2025, doi: 10.1140/epjs/s11734-025-01537-8.
- [2] M. Kolovou, C. Potiriadis, and N. Kallithrakas-Kontos, "A study on the correlation between indoor radon concentrations and the construction year of the dwellings," *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 232, no. 10, pp. 1625–1629, Aug. 2023, doi: 10.1140/epjs/s11734-023-00888-4.
- [3] B. D. Amiro, "Environmental Radioactivity," in *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, R. A. Meyers, Ed., New York: Academic Press, 2003, pp. 583–599. doi: 10.1016/B0-12-227410-5/00228-3.
- [4] *Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources*. 1997. Accessed: Sep. 04, 2024. [Online]. Available: <https://shop.elsevier.com/books/environmental-radioactivity-from-natural-industrial-and-military-sources/eisenbud/978-0-12-235154-9>
- [5] J. Sedlet, "Historical perspectives on environmental radioactivity measurements," vol. 54, pp. 21–22, Jan. 1987, Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: <https://inis.iaea.org/records/ck07d-04s88>
- [6] F. Bréchingnac, "1 History and Goals of Environmental Radioactivity Measurements," 2002, Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: <https://consensus.app/papers/1-history-and-goals-of-environmental-radioactivity-br%C3%A9chingnac/1d86e6ef3a2b57338178c424b030ac42/>
- [7] C. Tan, "Big Gaps and Short Bridges: A Model for Solving the Discontinuity Problem," *Answers Research Journal*, vol. 9, pp. 149–162, Jan. 2016.
- [8] S. A. Durrani and R. Ilic, *Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*. World Scientific, 1997.
- [9] N. Y. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) NY (United States), *Sources and effects of ionizing radiation UNSCEAR 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes Volume I: Sources*. United Nations (UN): UN, 2000.
- [10] W. Hoffmann, H. Arvela, J. Marsh, J. McLaughlin, S. Tokonami, and A. Röttger, *ICRU Report 88: Measurement and Reporting of Radon Exposures*. 2015.
- [11] National Research Council (US) Committee on Health Risks of Exposure to Radon (BEIR VI), *Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI*. Washington (DC): National Academies Press (US), 1999. Accessed: Jul. 30, 2025. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK233262/>
- [12] UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Ed., *Effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2006 report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume 2, Scientific Annexes C, D and E*. New York: UN, 2009. Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <https://digitallibrary.un.org/record/671062>
- [13] J. Porstendoerfer, "Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air," *Journal of Aerosol Science; (United Kingdom)*, vol. 25:2, Jan. 1994, doi: 10.1016/0021-8502(94)90077-9.
- [14] Δ. Πατήρης, "Μελέτη της συμπεριφοράς των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα," Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Φυσικής, 2009. Accessed: Jul. 22, 2025. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10442/hedi/18592>
- [15] "ICRP Publication 65," SAGE Publications Ltd. Accessed: Sep. 09, 2024. [Online]. Available: <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/icrp-publication-65/book243737>
- [16] R. G. Sextro, B. A. Moed, W. W. Nazaroff, K. L. Revzan, and A. V. Nero, "Investigations of Soil as a Source of Indoor Radon," in *Radon and Its Decay Products*, vol. 331, in ACS Symposium

- Series, no. 331, vol. 331. , American Chemical Society, 1987, pp. 10–29. doi: 10.1021/bk-1987-0331.ch002.
- [17] H. A. Wollenberg and A. R. Smith, “Naturally Occurring Radioelements and Terrestrial Gamma-Ray Exposure Rates: An Assessment Based on Recent Geochemical Data,” Nov. 1984, Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/3nn245hh>
 - [18] A. B. Tanner, “Radon migration in the ground: a supplementary review,” pp. 5–56, 1980, Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/publication/70044323>
 - [19] W. W. Nazaroff, B. A. Moed, R. G. Sextro, K. L. Revzan, and A. V. Nero, “Factors Influencing Soil as a Source of Indoor Radon: Framework for Assessing Radon Source Potential,” Jul. 1989, Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/60q3m1bq>
 - [20] ICRP, *ICRP Publication 60: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, 1st edition. Oxford: SAGE Publications Ltd, 1991.
 - [21] “Π.Δ. 101/2018 (ΦΕΚ 194/Α` 20.11.2018) | ΕΛΙΝΥΑΕ.” Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/pd-1012018-fek-194a-20112018>
 - [22] J.-C. Nenot, J. Brenot, D. Laurier, A. Rannou, and D. Thierry, “ICRP Publication 103 The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,” France, 978-2-7430-1120-8, 2009.
 - [23] J. Valentin, “Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model: ICRP Supporting Guidance 3 Approved by ICRP Committee 2 in October 2000,” *Annals of the ICRP*, vol. 32, no. 1, pp. 13–14, Mar. 2002, doi: 10.1016/S0146-6453(03)00011-3.
 - [24] F. Paquet *et al.*, “ICRP Publication 130: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1,” *Ann ICRP*, vol. 44, no. 2, pp. 5–188, Sep. 2015, doi: 10.1177/0146645315577539.
 - [25] S. Keith *et al.*, “Table 3-8, Reference Respiratory Values for a General Caucasian Population at Different Levels of Activity.” Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK158780/table/T17/>
 - [26] “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103,” *Ann ICRP*, vol. 37, no. 2–4, pp. 1–332, 2007, doi: 10.1016/j.icrp.2007.10.003.
 - [27] “Ιατρική Φυσική: Διαγνωστικές και Θεραπευτικές Εφαρμογές των Ακτινοβολιών, 2η Έκδοση,” Vasiliadis Medical Books. Accessed: Nov. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.vasiliadis-books.gr/shop/ιατρική-φυσική-διαγνωστικές-και-θερα/>
 - [28] *WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*. in WHO Guidelines Approved by the Guidelines Review Committee. Geneva: World Health Organization, 2009. Accessed: Sep. 04, 2024. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143216/>
 - [29] J. Gaskin, D. Coyle, J. Whyte, and D. Krewksi, “Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon,” *Environmental Health Perspectives*, vol. 126, 2018, doi: 10.1289/EHP2503.
 - [30] L. Martin Gisbert *et al.*, “Lung cancer mortality attributable to residential radon: a systematic scoping review,” *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, vol. 33, pp. 1–9, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41370-022-00506-w.
 - [31] J. D. Stanaway *et al.*, “Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017,” *The Lancet*, vol. 392, no. 10159, pp. 1923–1994, Nov. 2018, doi: 10.1016/S0140-6736(18)32225-6.
 - [32] J. M. Laughlin, J. Gutiérrez-Villanueva, and T. Perko, “Suggestions for Improvements in National Radon Control Strategies of Member States Which Were Developed as a Requirement of EU Directive 2013/59 EURATOM,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, 2022, doi: 10.3390/ijerph19073805.

- [33] D. Krewski *et al.*, "A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer," *J Toxicol Environ Health A*, vol. 69, no. 7, pp. 533–597, Apr. 2006, doi: 10.1080/15287390500260945.
- [34] C. J. L. Murray *et al.*, "Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019," *The Lancet*, vol. 396, no. 10258, pp. 1223–1249, Oct. 2020, doi: 10.1016/S0140-6736(20)30752-2.
- [35] F. Bray *et al.*, "Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries," *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, vol. 74, Apr. 2024, doi: 10.3322/caac.21834.
- [36] J. Porstendörfer, G. Butterweck, and A. Reineking, "Daily variation of the radon concentration indoors and outdoors and the influence of meteorological parameters," *Health Phys*, vol. 67, no. 3, pp. 283–287, Sep. 1994, doi: 10.1097/00004032-199409000-00011.
- [37] G. D. Belete and A. M. Shiferaw, "A Review of Studies on the Seasonal Variation of Indoor Radon-222 Concentration," *Oncology Reviews*, vol. 16, Sep. 2022, doi: 10.3389/or.2022.10570.
- [38] I. Šenitková and M. Kraus, "Seasonal and Floor Variations of Indoor Radon Concentration," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 221, Mar. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/221/1/012127.
- [39] B. Collignan and E. Powaga, "Impact of ventilation systems and energy savings in a building on the mechanisms governing the indoor radon activity concentration," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 196, pp. 268–273, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.11.023.
- [40] P. Bossew and H. Lettner, "Investigations on indoor radon in Austria, Part 1: Seasonality of indoor radon concentration.," *Journal of environmental radioactivity*, vol. 98 3, pp. 329–345, Dec. 2007, doi: 10.1016/J.JENVRAD.2007.06.006.
- [41] J. F. Rey, S. Goyette, M. Gandolla, M. Palacios, F. Barazza, and J. Goyette Pernot, "Long-Term Impacts of Weather Conditions on Indoor Radon Concentration Measurements in Switzerland," *Atmosphere*, vol. 13, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/atmos13010092.
- [42] C. Di Carlo *et al.*, "Extreme reverse seasonal variations of indoor radon concentration and possible implications on some measurement protocols and remedial strategies.," *Environmental pollution*, p. 121480, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121480.
- [43] D. Tchorz-Trzeciakiewicz and A. Solecki, "Variations of radon concentration in the atmosphere. Gamma dose rate," *Atmospheric Environment*, vol. 174, pp. 54–65, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2017.11.033.
- [44] P. Kolarž, Z. Stojanovska, Z. Curguz, and Z. Žunić, "DIURNAL AND SPATIAL VARIATIONS OF RADON CONCENTRATION AND ITS INFLUENCE ON IONIZATION OF AIR," 2020, [Online]. Available: <https://consensus.app/papers/diurnal-and-spatial-variations-of-radon-concentration-and-kolar%C5%BE-stojanovska/e00f42b87a965ab98acb26e5eaaffe9/>
- [45] L. Quindós, P. Fernández, and J. Soto, "National survey on indoor radon in Spain," *Environment International*, vol. 17, pp. 449–453, 1991, doi: 10.1016/0160-4120(91)90278-X.
- [46] P. Bossew, "Radon: exploring the log-normal mystery.," *Journal of environmental radioactivity*, vol. 101 10, pp. 826–834, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.jenvrad.2010.05.005.
- [47] R. Liza *et al.*, "Application of Statistical Methods for the Characterization of Radon Distribution in Indoor Environments: A Case Study in Lima, Peru," *Eng*, Jan. 2025, doi: 10.3390/eng6010014.
- [48] P. Vukotic *et al.*, "Radon survey in Montenegro - A base to set national radon reference and 'urgent action' level.," *Journal of environmental radioactivity*, vol. 196, pp. 232–239, 2019, doi: 10.1016/j.jenvrad.2018.02.009.
- [49] S. Antignani, G. Venoso, C. Carpentieri, and F. Bochicchio, "Analytical method for evaluating (and correcting) the impact of outdoor radon concentration on the estimates of percentage

- of dwellings exceeding reference levels.,” *Journal of environmental radioactivity*, vol. 196, pp. 264–267, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.12.021.
- [50] I. of Medicine and C. on C. D. in E. Medicine, *Environmental Medicine: Integrating a Missing Element into Medical Education*. National Academies Press, 1995.
- [51] M. D. Cort, V. Gruber, T. Tollefsen, P. Bossew, and A. Janssens, “Towards a european atlas of natural radiation: Goal, status and future perspectives,” *Radioprotection*, vol. 46, no. 6, Art. no. 6, 2011, doi: 10.1051/radiopro/20116871s.
- [52] G. Cinelli *et al.*, “Digital version of the European Atlas of natural radiation,” *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 196, pp. 240–252, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jenvrad.2018.02.008.
- [53] G. Dubois, *An overview of radon surveys in Europe*. 2005.
- [54] “ISO 11665-1:2019,” ISO. Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/76006.html>
- [55] E. P. Agency, “Guidance Notes to Local Authorities on Implementing a Radon Measurement Programme.” Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.epa.ie/publications/monitoring--assessment/radon/guidance-notes-to-local-authorities-on-implementing-a-radon-measurement-programme.php>
- [56] L. Martin-Gisbert, García ,Guadalupe, Teijeiro ,Ana, and A. and Ruano-Ravina, “Radon exposure as an occupational risk factor for lung cancer in conventional workplaces. An overview,” *Expert Review of Respiratory Medicine*, vol. 18, no. 12, pp. 1041–1046, Dec. 2024, doi: 10.1080/17476348.2024.2444363.
- [57] A. Clouvas, S. Xanthos, and M. Antonopoulos-Domis, “Pilot study of indoor radon in Greek workplaces,” *Radiat Prot Dosimetry*, vol. 124, no. 2, pp. 68–74, 2007, doi: 10.1093/rpd/nc1548.
- [58] K. Ioannides, D. Patiris, and C. Papachristodoulou, “Indoor radon concentrations in workplaces and dwellings in North-Western Greece,” *Radioprotection*, vol. 44, no. 5, Art. no. 5, 2009, doi: 10.1051/radiopro/20095035.
- [59] A. Clouvas, G. Takoudis, S. Xanthos, C. Potiriadis, and M. Kolovou, “Indoor radon measurements in areas of northern Greece with relatively high indoor radon concentrations,” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 136, no. 2, pp. 127–131, Sep. 2009, doi: 10.1093/rpd/ncp154.
- [60] A. Clouvas, S. Xanthos, and G. Takoudis, “Indoor radon levels in Greek schools,” *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 102, no. 9, pp. 881–885, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.jenvrad.2011.05.001.
- [61] A. Clouvas, S. Xanthos, M. Kolovou, C. Potiriadis, G. Takoudis, and J. Guilhot, “Follow-up study of indoor radon in Greek buildings,” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 157, no. 2, pp. 291–297, Dec. 2013, doi: 10.1093/rpd/nct133.
- [62] E. Βογιάννης, “Το ραδόνιο στα ιαματικά λουτρά,” Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Σχολή Περιβάλλοντος. Τμήμα Περιβάλλοντος. Τομέας Περιβαλλοντικής Μηχανικής και Επιστήμης, 2005. Accessed: Jul. 22, 2025. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10442/hedi/15651>
- [63] E. Vogianis, D. Nikolopoulos, A. Louizi, and C. P. Halvadakis, “Radon exposure in the thermal spas of Lesvos Island--Greece,” *Radiat Prot Dosimetry*, vol. 111, no. 1, pp. 121–127, 2004, doi: 10.1093/rpd/nch373.
- [64] E. Vogianis, D. Nikolopoulos, A. Louizi, and C. P. Halvadakis, “Radon variations during treatment in thermal spas of Lesvos Island (Greece),” *J Environ Radioact*, vol. 76, no. 3, pp. 283–294, 2004, doi: 10.1016/j.jenvrad.2003.11.009.
- [65] A. Geranios, D. Nikolopoulos, A. Louizi, and A. Karatzi, “Multiple radon survey in spa of Loutra Edipsou (Greece),” *Radiat Prot Dosimetry*, vol. 112, no. 2, pp. 251–258, 2004, doi: 10.1093/rpd/nch392.

- [66] D. Nikolopoulos, E. Vogianis, E. Petraki, A. Zisos, and A. Louizi, "Investigation of the exposure to radon and progeny in the thermal spas of Loutraki (Attica-Greece): Results from measurements and modelling," *Science of The Total Environment*, vol. 408, no. 3, pp. 495–504, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.09.057.
- [67] H. Florou, K. Kehagia, A. Savidou, and G. Trabidou, "The radiological evaluation of uranium, radium and radon in metallic and thermo-metallic springs in Ikaria Island, the eastern Aegean Sea, Greece," in *Radioactivity in the Environment*, vol. 8, P. P. Povinec and J. A. Sanchez-Cabeza, Eds., in *Radionuclides in the Environment*, vol. 8, Elsevier, 2006, pp. 235–242. doi: 10.1016/S1569-4860(05)08017-4.
- [68] "IEC 61577-1:2006." Accessed: Oct. 14, 2024. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/5616>
- [69] Δ. Νικολόπουλος, "Μελέτη της έκθεσης του Ελληνικού πληθυσμού στο ραδόνιο - 222," Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). Σχολή Επιστημών Υγείας. Τμήμα Ιατρικής. Τομέας Μορφολειτουργικός. Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, 2000. Accessed: Jul. 22, 2025. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10442/hedi/11929>
- [70] P. N, "An approach to natural ventilation conditions in urban apartment block buildings in Greece based on their architectural and constructional characteristics.," Jan. 2000, Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.aivc.org/resource/approach-natural-ventilation-conditions-urban-apartment-block-buildings-greece-based-their>
- [71] N. Papamanolis, "The main constructional characteristics of contemporary urban residential buildings in Greece," *Building and Environment - BLDG ENVIRON*, vol. 40, pp. 391–398, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.06.003.
- [72] G. Kropat *et al.*, "Major influencing factors of indoor radon concentrations in Switzerland," *J Environ Radioact*, vol. 129, pp. 7–22, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.jenvrad.2013.11.010.
- [73] K. Fujimoto and T. Sanada, "Dependence of indoor radon concentration on the year of house construction," *Health Phys*, vol. 77, no. 4, pp. 410–419, Oct. 1999, doi: 10.1097/00004032-199910000-00008.
- [74] D. Mezartasoglou, "Energy Efficiency Trends and Policies in Greece," Centre for Renewable Energy Sources and Saving (CRES), Greece, Nov. 2021.
- [75] C. Dueñas, M. Fernández, S. Cañete, M. Pérez, and E. Gordo, "Seasonal variations of radon and the radiation exposure levels in Nerja cave, Spain," *Radiation Measurements*, vol. 46, pp. 1181–1186, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.radmeas.2011.06.039.
- [76] K. Rovenska and L. Thinova, "Seasonal variation of radon in the Bozkov cave," *Nukleonika*, vol. 55, no. 4, pp. 483–489, 2010, Accessed: Jun. 28, 2024. [Online]. Available: <https://3pn-gw.ocean.icm.edu.pl/articles/148713>

Παράρτημα 1

Ερωτηματολόγιο

**ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ
ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΙΕΣ**

Όνοματεπώνυμο:

Οδός: Αριθμός:

Πόλη: Τ.Κ.:

Τηλέφωνο επικοινωνίας:

Ημερομηνία έναρξης
τοποθέτησης δοσιμέτρου :

Ημερομηνία λήξης
τοποθέτησης δοσιμέτρου :

Τύπος Κατοικίας:

☐ Μονοκατοικία ☐ Κατοικία
2 ορόφων ☐ Πολυκατοικία

Υπάρχει στην κατοικία:

☐ Πυλότη ☐ Ημιυπόγειο ☐ Υπόγειο

Οικοδομικά υλικά κατασκευής κατοικίας:

☐ Τούβλα ☐ Ξύλο ☐ Πέτρα ☐ Άλλο

Έτος/δεκαετία κατασκευής της κατοικίας:

Υγνοδωμάτιο

(αφορά το δοσίμετρο που τοποθετήθηκε στο υπνοδωμάτιο - μπορείτε να σημειώνετε πάνω από μία επιλογή όπου χρειάζεται)

Κωδικός δοσιμέτρου:

Όροφος δωματίου:

☐ Ισόγειο ☐ Υπόγειο ☐ Ημιυπόγειο ☐ Όροφος:

Τύπος κουφωμάτων:

☐ Παλαιού τύπου (μη αεροστεγανά) ☐ Σύγχρονα (αεροστεγανά)

Εσωτερικοί τοίχοι:

☐ Βαφή ☐ Ξύλο ☐ Πέτρα ☐ Άλλο

Είδος θέρμανσης:

☐ Καλοριφέρ ☐ Σόμπα ☐ Κλιματιστικό ☐ Τζάκι

Είδος πατώματος:

☐ Μωσαϊκό ☐ Πλακάκια ☐ Ξύλο ☐ Μάρμαρο

Πόσο συχνά αερίζετε το δωμάτιο:

☐ Καθημερινά ☐ 2 φορές την εβδομάδα ☐ 2 φορές το μήνα ☐ Ποτέ

Καπνίζετε στο δωμάτιο;

☐ Συχνά ☐ Ποτέ ☐ Σπάνια

Καθιστικό

(αφορά το δοσίμετρο που τοποθετήθηκε στο καθιστικό - μπορείτε να σημειώνετε πάνω από μία επιλογή όπου χρειάζεται)

Κωδικός δοσιμέτρου:

Όροφος δωματίου:

☐ Ισόγειο ☐ Υπόγειο ☐ Ημιυπόγειο ☐ Όροφος:

Τύπος κουφωμάτων:

☐ Παλαιού τύπου (μη αεροστεγανά) ☐ Σύγχρονα (αεροστεγανά)

Εσωτερικοί τοίχοι:

☐ Βαφή ☐ Ξύλο ☐ Πέτρα ☐ Άλλο

Είδος θέρμανσης:

☐ Καλοριφέρ ☐ Σόμπα ☐ Κλιματιστικό ☐ Τζάκι

Είδος πατώματος:

☐ Μωσαϊκό ☐ Πλακάκια ☐ Ξύλο ☐ Μάρμαρο

Πόσο συχνά αερίζετε το δωμάτιο:

☐ Καθημερινά ☐ 2 φορές την εβδομάδα ☐ 2 φορές το μήνα ☐ Ποτέ

Καπνίζετε στο δωμάτιο;

☐ Συχνά ☐ Ποτέ ☐ Σπάνια

Στη συσκευασία που σας έχει αποστείλει η ΕΕΑΕ θα βρείτε δύο (2) δοσίμετρα μέτρησης ραδονίου και ενημερωτικό υλικό. Παρακαλούμε να διαβάσετε και να ακολουθήσετε προσεκτικά τις ακόλουθες οδηγίες:

Γενικά για τα δοσίμετρα

- Τα δοσίμετρα είναι 2 μιάρα πλαστικά ημισφαιρικά κουτιά, τυλιγμένα σε φύλλο αλουμινίου για λόγους προστασίας, τα οποία περιέχουν ένα ειδικό υλικό για την καταγραφή του ραδονίου.
- Δεδομένου ότι τα δοσίμετρα καταγράφουν συνεχώς τα επίπεδα ραδονίου, πρέπει να τα τοποθετήσετε άμεσα στα κατάλληλα σημεία.
- Η μέτρηση του ραδονίου δε θα είναι αντιπροσωπευτική σε περίπτωση που πραγματοποιούνται οικοδομικές εργασίες στην κατοικία, σε περίπτωση απουσίας σας για διάστημα μεγαλύτερο των 15 ημερών.
- Τα δοσίμετρα πρέπει να χρησιμοποιούνται αποκλειστικά και μόνο στη διεύθυνση που έχετε συμπληρώσει στην αίτησή σας.

Οδηγίες τοποθέτησης

1. Βγάλτε τα δοσίμετρα από την αλουμινένια συσκευασία τους.
2. Πάνω από κάθε δοσίμετρο υπάρχει μία άσπρη ετικέτα, στην οποία είναι σημειωμένος ο κωδικός του δοσιμέτρου. Παρακαλούμε να συμπληρώσετε δίπλα στην ένδειξη ΕΝ (ΕΝΑΡΞΗ) την ημερομηνία που τοποθετήσατε το δοσίμετρο στη θέση του.
3. Τοποθετείστε το ένα δοσίμετρο στο υπνοδωμάτιο και το άλλο στο καθιστικό, σε απόσταση περίπου 1,5 μέτρο από το έδαφος (π.χ. πάνω σε κάποιο έπιπλο). Τα δοσίμετρα δεν πρέπει να επηρεάζονται από ρεύματα αέρα, λόγω αερισμού, θέρμανσης, συσκευών κλιματισμού, από πόρτες, παράθυρα ή τζάκια. Δεν πρέπει να τοποθετούνται στην κουζίνα ή στο μπάνιο και να αποφεύγεται η απευθείας έκθεσή τους στον ήλιο ή σε υγρασία.
4. Τα δοσίμετρα πρέπει να παραμείνουν στα σημεία που τα τοποθετήσατε για περίοδο 4-6 μηνών.
5. Μετά το πέρας αυτής της περιόδου πρέπει να συμπληρώσετε δίπλα στην ένδειξη ΛΗ (ΛΗΞΗ) την ημερομηνία.
6. Για την επιστροφή των δοσιμέτρων στην ΕΕΑΕ, αφού τα τοποθετήσατε σε ελαστικό χοντρό, ταχυδρώστε τα στην ακόλουθη διεύθυνση, χρησιμοποιώντας τον προπληρωμένο φάκελο: ΕΕΑΕ, Τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος, ΤΘ 60092 Αγία Παρασκευή, 15310.

ΜΗ μετακινείτε τα δοσίμετρα από την αρχική θέση

στην οποία τα τοποθετήσατε

ΜΗΝ τοποθετείτε τα δοσίμετρα σε κλειστούς

χώρους όπως ντουλάπια, συρτάρια, κ.ά.

Τα δοσίμετρα είναι

εντελώς ακίνδυνα



ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

Το ερωτηματολόγιο

Το ερωτηματολόγιο είναι απαραίτητο να συμπληρωθεί και να επιστραφεί στην ΕΕΑΕ μαζί με τα δοσίμετρα. Οι απαντήσεις σας είναι χρήσιμες για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μέτρησης.

Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας Τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος

ΤΘ 60092
153 10 Αγ. Παρασκευή
τηλ: 210 6506777
fax: 210 6506748
e-mail: info@eeae.gr

www.eeae.gr

www.facebook.com/eeagr
www.twitter.com/eeagr

Email: info@eeae.gr

