



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΤΙΚΗΣ ΥΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συγκεντρώσεις Ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα

Όνοματεπώνυμο Φοιτήτριας: Βασιλική - Αθηνά Τυρολόγου

A.M.: pch19679187

Επιβλέπων: Ιωάννης Παπαδάς, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΤΙΚΗΣ ΥΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συγκεντρώσεις Ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα

Όνοματεπώνυμο Φοιτήτριας: Βασιλική - Αθηνά Τυρολόγου

A.M.: pch19679187

Επιβλέπων: Ιωάννης Παπαδάς, Επίκουρος Καθηγητής

Η εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του ΠΠΣ για την λήψη του πτυχίου της Κατεύθυνσης Δημόσιας Υγείας του Τμήματος Δημόσιας και Κοινωνικής Υγείας της Σχολής Δημόσιας Υγείας, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

ΑΘΗΝΑ, 2024

Πνευματικά δικαιώματα Copyright © Βασιλική - Αθηνά Τυρολόγου, 2024

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Δημόσιας και Κοινωνικής Υγείας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής δε δηλώνει απαραίτητως την αποδοχή των απόψεων της συγγραφέα.

Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια που προσφέρθηκε στην εκπόνησή της αναγνωρίζεται και αναφέρεται στο κείμενο. Επιπλέον, αναφέρονται όλες οι βιβλιογραφικές πηγές που αξιοποιήθηκαν, πρωτογενείς και δευτερογενείς, είτε η συμβολή τους παρατίθεται επακριβώς ως απόσπασμα είτε ως παράφραση.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΤΙΚΗΣ ΥΓΕΙΑΣ

Thesis

Radon concentrations in subway systems

Student name and surname: Vasiliki – Athina Tyrologou

Registration Number: pch19679187

Supervisor name and surname: Ioannis Papadas, Assistant Professor

ATHENS, 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΤΙΚΗΣ ΥΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συγκεντρώσεις Ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<i>Α/α</i>	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΑΠΑΔΑΣ	ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
2	ΕΥΔΟΚΙΑ ΒΑΣΣΑΛΟΥ	ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ	
3	ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΕΣΑΝΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΔΙΠ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Τυρολόγου Βασιλική - Αθηνά του Αλεξάνδρου με αριθμό μητρώου ρch19679187 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Δημόσιας Υγείας του Τμήματος Δημόσιας και Κοινοτικής Υγείας, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

Τυρολόγου Βασιλική - Αθηνά

Περίληψη

Η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου εσωτερικών χώρων αποτελεί συχνό φαινόμενο, το οποίο μπορεί να επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Τα επίπεδα ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούνται από μεγάλο μέρος του πληθυσμού και χαρακτηρίζονται από κακή ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων και περιορισμένη ανακύκλωση αέρα, παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον από πλευράς της δημόσιας υγείας. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βιβλιογραφική αναζήτηση των συγκεντρώσεων ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα, η τήρηση ή μη των επιτρεπτών ορίων έκθεσης, οι παράγοντες που επηρεάζουν την συγκέντρωση ραδονίου στους χώρους αυτούς και τα προτεινόμενα διορθωτικά μέτρα. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της συστηματικής ανασκόπησης, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες PRISMA, στην μηχανή αναζήτησης Scopus για τα έτη 2009-2024 και αφορούσε έρευνα σε παγκόσμια κλίμακα. Στην παρούσα συστηματική ανασκόπηση περιλαμβάνονται συνολικά 10 μελέτες από διαφορετικές χώρες, που περιέχουν καταγραφές συγκεντρώσεων ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά συστήματα. Μόνο στην περίπτωση του μετρό του Σάο Παολο στην Βραζιλία, η μέση συγκέντρωση ραδονίου των $805 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, ξεπέρασε το ανώτατο όριο των $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, ενώ όλες οι τιμές της ετήσιας ενεργού δόσης (annual effective dose) που υπολογίστηκαν βρίσκονταν εντός του ορίου των 4 mSv. Οι κύριοι παράγοντες οι οποίοι φαίνεται να επηρεάζουν την συγκέντρωση ραδονίου στους χώρους του μετρό περιλαμβάνουν την σύσταση του εδάφους και των πετρωμάτων, τα δομικά υλικά, την αποτελεσματικότητα του εξαερισμού και τους δομικούς παράγοντες, όπως το βάθος της εκσκαφής και το έτος κατασκευής. Για τον περιορισμό των επιπέδων ραδονίου συνιστάται κυρίως η χρήση ισχυρών συστημάτων εξαερισμού και η εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού αέρα υψηλής απόδοσης, τα οποία θα φιλτράρουν τον ρυπασμένο με ραδόνιο αέρα. Η μελέτη αυτή απέδειξε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για την επιτήρηση των επιπέδων ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά συστήματα, αλλά η περαιτέρω μελέτη τους είναι απαραίτητη, ειδικότερα σε περιοχές όπου δεν έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις συγκεντρώσεων ραδονίου, με σκοπό την αποτελεσματικότερη αξιολόγηση των επιπτώσεων στην υγεία των εργαζομένων και των επιβατών, καθώς και την λήψη αποτελεσματικών διορθωτικών μέτρων και πολιτικών δημόσιας υγείας.

Λέξεις-Κλειδιά: ραδόνιο, ακτινοβολία, ραδιενεργός ρύπανση, ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων, υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα, μετρό

Abstract

Exposure to high indoor radon concentrations is very common and can impose serious effects on human health. Radon levels in underground railway networks, which are used by a large part of the population and are characterized by poor indoor air quality and low air renewal rate, are of great public health concern. The aim of this study is to review the literature on radon concentrations in underground railway networks, define whether the permissible exposure limits are met and identify the factors influencing radon concentrations in subway systems and the proposed control measures. The study was conducted using the systematic review method, in accordance with the PRISMA guidelines, assessing papers from the search engine Scopus for the years 2009-2024 and researching on a global scale. A total of 10 papers from different countries containing records of radon concentrations in underground railway systems are included in this systematic review. Only in the case of the São Paulo subway in Brazil, the average radon concentration of $805 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ exceeded the upper limit of $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, while all calculated annual effective dose values were within the proposed limit of 4 mSv. The main factors that appear to influence radon concentrations in subway systems include soil and rock composition, building materials, the effectiveness of ventilation and structural factors, such as depth of excavation and year of construction. To limit radon levels, the use of strong ventilation systems and the installation of high-efficiency air purification systems that filter radon-contaminated air are recommended. This study has demonstrated the interest of the scientific community in monitoring radon levels in underground railway systems, but further study is needed, particularly in areas where radon concentrations have not been measured, in order to assess more effectively the health effects on workers and passengers and to develop effective control measures and public health policies.

Keywords: radon, radiation, radioactive pollution, indoor air quality, subway system, metro

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	7
Abstract	8
Πίνακας Περιεχομένων	9
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ–ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	12
Κεφάλαιο 1. Ραδιενεργός Ρύπανση	12
1.1 Ποιότητα Αέρα Εσωτερικών χώρων	12
1.2. Ακτινοβολία και Φυσική Ακτινοβολία	14
1.3 Ρύπανση από Ραδόνιο.....	16
1.4 Έκθεση σε Φυσική Ραδιενέργεια και Ραδόνιο.....	18
Κεφάλαιο 2. Ραδόνιο και Δημόσια Υγεία	21
2.1 Επιδημιολογική επιτήρηση ραδονίου	21
2.2 Γεωγραφική Κατανομή Ραδονίου	23
2.3 Επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία	26
Κεφάλαιο 3. Έλεγχος έκθεσης σε ραδόνιο.....	33
3.1 Νομοθεσία και Ανώτατα όρια έκθεσης.....	33
3.2 Μέτρηση έκθεσης	35
3.3 Περιοριστικά Μέτρα και Μέσα Ατομικής Προστασίας	37
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	40
Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία	40
Κεφάλαιο 5. Ανάλυση δεδομένων και Αποτελέσματα.....	43
5.1 Μεθοδολογία Ερευνών	43
5.2 Αποτελέσματα συγκεντρώσεων ραδονίου	46
5.3 Αποτελέσματα έκθεσης σε ραδόνιο	48
Κεφάλαιο 6. Συζήτηση και Συμπεράσματα	50
6.1 Συζήτηση.....	50
6.2 Συμπεράσματα - Μελλοντικές προοπτικές.....	58
Βιβλιογραφία.....	60
Ξενόγλωσση	60
Ελληνική.....	63

Εισαγωγή:

Η ποιότητα του αέρα εσωτερικών χώρων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την προάσπιση της Δημόσιας Υγείας, καθώς η ατμοσφαιρική ρύπανση εσωτερικών χώρων αποτελεί σοβαρή απειλή για την υγεία του πληθυσμού. Ειδικότερα, η ραδιενεργός ρύπανση εσωτερικών χώρων, όπως η εκπομπή ραδονίου, αποτελεί σημαντική ανησυχία. Η υπερβολική έκθεση στην ακτινοβολία μπορεί να βλάψει τους ζωντανούς ιστούς και τα όργανα, επιφέροντας σοβαρές επιπτώσεις σε αυτά.

Το ραδόνιο είναι ένα άχρωμο, άοσμο και άγευστο ραδιενεργό αέριο, το οποίο απελευθερώνεται από βραχώδη υλικά και περνάει στον αέρα μέσα από το έδαφος. Στην συνέχεια τείνει να αραιώνεται στον αέρα, οπότε σε εξωτερικούς χώρους το ραδόνιο δεν αποτελεί κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Σε εσωτερικούς χώρους, όμως, είναι επικίνδυνο σε υψηλές συγκεντρώσεις άνω των $150 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, αλλά ακόμη και σε μέτριες συγκεντρώσεις των $100\text{-}150 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, δεδομένου ότι η παρατεταμένη έκθεση μέσω εισπνοής αυξάνει σημαντικά τον κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα.

Οι δυσμενείς αυτές επιπτώσεις του ραδονίου στην ανθρώπινη υγεία έχουν δημιουργήσει την ανάγκη της επιδημιολογικής του επιτήρησης, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η αξιολόγηση του επιπέδου της έκθεσης του πληθυσμού, η ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ της έκθεσης σε ραδόνιο και των πιθανών επιπτώσεων στην υγεία, καθώς και η εξέταση της αποτελεσματικότητας των μέτρων πρόληψης και προστασίας που λαμβάνονται. Με βάση τα αποτελέσματα της επιδημιολογικής επιτήρησης, ποικίλοι διεθνείς οργανισμοί, όπως ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, αλλά και κυβερνήσεις έχουν θεσπίσει ανώτατα επιτρεπτά όρια έκθεσης σε συγκεντρώσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους.

Οι υπόγειοι σταθμοί του μετρό είναι εσωτερικοί χώροι που επηρεάζονται εύκολα από την ύπαρξη ραδονίου, καθώς αποτελούν κλειστά περιβάλλοντα με περιορισμένη ανακύκλωση αέρα. Έτσι, σε αυτές τις περιοχές ενδέχεται να παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. Η παρουσία διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων στα υπόγεια σιδηροδρομικά συστήματα έχει μελετηθεί στο παρελθόν. Η γνώση των επιπέδων και των κατανομών ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα είναι απαραίτητη, επειδή η υγεία και ασφάλεια των επιβατών, αλλά και των εργαζομένων συνδέεται άμεσα με αυτή.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βιβλιογραφική αναζήτηση των συγκεντρώσεων ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα, με την μέθοδο της συστηματικής ανασκόπησης. Τα ερευνητικά ερωτήματα τα οποία κλήθηκαν να απαντηθούν αφορούν τις τιμές των συγκεντρώσεων ραδονίου στους χώρους των υπογείων σιδηροδρομικών

δικτύων ανά τον κόσμο, την τήρηση ή μη των επιτρεπτών ορίων, όπως αυτά ορίζονται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO) και την Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP), τους παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζουν την συγκέντρωση ραδονίου στους χώρους αυτούς, καθώς και τα προτεινόμενα διορθωτικά μέτρα για την προστασία του πληθυσμού, όπου κρίνονται απαραίτητα.

Στο πρώτο κεφάλαιο, αναλύονται οι έννοιες και η σημασία της ποιότητας και της ρύπανσης του αέρα εσωτερικών χώρων, της ακτινοβολίας και των μορφών της. Περιγράφονται οι ιδιότητες του ραδονίου, οι οδοί έκθεσης σε αυτό και οι παράγοντες που επηρεάζουν την συγκέντρωσή του.

Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην σύνδεση του ραδονίου με την Δημόσια Υγεία. Αναλύει τον σκοπό της επιδημιολογικής επιτήρησής του, την γεωγραφική του κατανομή στην Ευρώπη και την Ελλάδα και τις επιδράσεις του στη ανθρώπινη υγεία, συμπεριλαμβανομένων των πεδίων όπου η έρευνα είναι ακόμη ελλιπής.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την εθνική νομοθεσία πάνω στο επίπεδο αναφοράς ραδονίου και τις συστάσεις διεθνών οργανισμών για τα ανώτατα όρια συγκεντρώσεων. Επιπλέον, αναλύει την διαδικασία μέτρησης της ανθρώπινης έκθεσης σε ραδόνιο και τα κατάλληλα περιοριστικά μέτρα που πρέπει να εφαρμόζονται σε περίπτωση μη τήρησης των καθορισμένων ορίων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται επεξήγηση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε κατά την διαδικασία της συστηματικής ανασκόπησης. Συγκεκριμένα, ορίζονται τα ερευνητικά ερωτήματα, ο τρόπος αναζήτησης και επιλογής των άρθρων, τα κριτήρια ένταξης και τα κριτήρια αποκλεισμού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα δεδομένα από τα άρθρα που αξιολογήθηκαν κατά την συστηματική ανασκόπηση και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτά αναφορικά με τη συγκέντρωση ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται συζήτηση σχετικά με τα αποτελέσματα της ανασκόπησης και αναφέρονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές προοπτικές.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ–ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1. Ραδιενεργός Ρύπανση

1.1 Ποιότητα Αέρα Εσωτερικών χώρων

Οι συνθήκες του εσωτερικού περιβάλλοντος συμβάλλουν σημαντικά στην ανθρώπινη υγεία, καθώς οι περισσότεροι άνθρωποι περνούν περίπου το 90% του χρόνου τους σε εσωτερικούς χώρους, κυρίως στο σπίτι ή στον χώρο εργασίας τους. Η ρύπανση του αέρα εσωτερικών χώρων ευθύνεται για το θάνατο 3,8 εκατομμυρίων ανθρώπων ετησίως. Επομένως, η ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων ρύπων σε εσωτερικούς χώρους καθώς και οι βασικές στρατηγικές για τον έλεγχο και την ενίσχυση της Ποιότητας του Αέρα Εσωτερικών Χώρων (*Indoor Air Quality – IAQ*) θεωρούνται απαραίτητες.

Η *Ποιότητα Αέρα Εσωτερικών Χώρων (Indoor Air Quality – IAQ)* είναι η ποιότητα του αέρα μέσα και γύρω από κτίρια και άλλες δομικές κατασκευές, ειδικά καθώς σχετίζεται με την υγεία και την ευημερία των ενοίκων του κτιρίου. Οι κύριες παράμετροι για την αξιολόγηση του IAQ περιλαμβάνουν τις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων, τη θερμοκρασία, την ροή αέρα, την σχετική υγρασία, το φως και τον θόρυβο.

Η *Ρύπανση Αέρα Εσωτερικών Χώρων (Indoor Air Pollution - IAP)* αναφέρεται στην ύπαρξη ρύπων, όπως πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), αιωρούμενα σωματίδια (PM), ανόργανες ενώσεις, χημικές ουσίες και βιολογικούς παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να εμφανίσουν αρνητικές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. Προκαλείται συνήθως από ένα σύνθετο ανομοιογενές μείγμα αιωρούμενων σωματιδίων διαφορετικής διαμέτρου και διαφόρων αέριων συστατικών που διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις πηγές, τους ρυθμούς εκπομπών και τις συνθήκες αερισμού που επικρατούν.

Πολλοί ρυπαντές αέρα εσωτερικών χώρων έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στο IAQ και την ανθρώπινη υγεία. Ορισμένοι από αυτούς μπορεί να υπάρχουν τόσο σε εσωτερικό όσο και σε εξωτερικό περιβάλλον, ενώ άλλοι προέρχονται αποκλειστικά από το εξωτερικό περιβάλλον. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι εσωτερικών χώρων μπορούν να ταξινομηθούν σε οργανικούς, ανόργανους, βιολογικούς και ραδιενεργούς.

Κυριότεροι ρυπαντές εσωτερικών χώρων αποτελούν τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matters – PM), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile organic compounds - VOCs), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το όζον (O_3), το διοξείδιο του θείου (SO_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), τα βαρέα μέταλλα, τα αερολύματα, το ραδόνιο (Rn), τα εντομοκτόνα και οι βιολογικοί ρυπαντές (Tran et al., 2020).

Τα υπόγεια σιδηροδρομικά συστήματα αποτελούν βασικό μέσο δημόσιας μεταφοράς σε πολλές μεγάλες πόλεις παγκοσμίως και άνθρωποι διαφόρων ηλικιών, από παιδιά έως ηλικιωμένους, χρησιμοποιούν σε καθημερινή βάση τα συγκεκριμένα δίκτυα. Οι υπόγειοι σταθμοί του μετρό είναι εσωτερικοί χώροι που επηρεάζονται εύκολα από την ύπαρξη ρυπαντών αέρα εσωτερικού χώρου, όπως το ραδόνιο, καθώς αποτελούν κλειστά περιβάλλοντα με περιορισμένη ανακύκλωση αέρα. Έτσι, σε αυτές τις περιοχές ενδέχεται να δημιουργείται κακής ποιότητας IAQ. Η παρουσία διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων στα συστήματα μεταφοράς του μετρό έχει μελετηθεί στο παρελθόν. Η γνώση των επιπέδων και των κατανομών ραδονίου στο μετρό είναι απαραίτητη, επειδή η υγεία και η ευημερία των επιβατών συνδέονται άμεσα με αυτή (Hwang et al., 2018).

1.2. Ακτινοβολία και Φυσική Ακτινοβολία

Η ακτινοβολία είναι η εκπομπή ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή κινούμενων υποατομικών σωματιδίων. Η φυσική ακτινοβολία προέρχεται από πολλά φυσικά ραδιενεργά υλικά που βρίσκονται στο έδαφος, το νερό, τον αέρα, αλλά και μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Οι άνθρωποι στην καθημερινότητά τους μέσω της εισπνοής, της κατάποσης και της δερματικής επαφής δέχονται διάφορες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ιονίζουσας και μη.

Η έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να προέλθει από φυσικές πηγές (π.χ. ραδόνιο στα σπίτια), να είναι προγραμματισμένη (ιατρική, επαγγελματική έκθεση) ή να προκληθεί από τυχαίες καταστάσεις (π.χ. ατύχημα). Η έκθεση μπορεί να είναι εξωτερική (με ή χωρίς μόλυνση δέρματος, μαλλιών, ρούχων), εσωτερική (εισπνοή, κατάποση ή μέσω μολυσμένου τραύματος) ή συνδυασμός και των δύο. Η υπερβολική έκθεση στην ακτινοβολία μπορεί να βλάψει τους ζωντανούς ιστούς και τα όργανα, ανάλογα με την ποσότητα της λαμβανόμενης ακτινοβολίας (δόση). Συγκεκριμένα, η έκταση της πιθανής ζημιάς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- i) το είδος της ακτινοβολίας
- ii) την ευαισθησία των προσβεβλημένων ιστών και οργάνων
- iii) την οδό και τη διάρκεια της έκθεσης
- iv) τα εμπλεκόμενα ραδιενεργά ισότοπα
- v) τα ατομικά χαρακτηριστικά του εκτεθειμένου ατόμου (όπως ηλικία, φύλο και υποκείμενη κατάσταση υγείας)

Ο κίνδυνος εμφάνισης δυσμενών επιπτώσεων στην υγεία εξαρτάται από τη δόση ακτινοβολίας. Όσο υψηλότερη είναι η δόση, τόσο υψηλότερος είναι και ο κίνδυνος εμφάνισης ανεπιθύμητων ενεργειών. Εάν η δόση ακτινοβολίας είναι χαμηλή ή χορηγηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, ο κίνδυνος είναι σημαντικά μικρότερος, επειδή η βλάβη στα κύτταρα μπορεί να επιδιορθωθεί από τον ίδιο τον οργανισμό (WHO, 2023b).

Με εξαίρεση τα πιθανά πυρηνικά ατυχήματα μεγάλης κλίμακας, η φυσική ιονίζουσα ακτινοβολία θεωρείται η σημαντικότερη πηγή ακτινοβολίας που λαμβάνει ο παγκόσμιος πληθυσμός. Ο ανθρώπινος πληθυσμός εκτίθεται συνεχώς σε ιονίζουσα ακτινοβολία από διάφορες φυσικές πηγές που μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις κοσμικές ακτίνες υψηλής ενέργειας που προσπίπτουν στην ατμόσφαιρα της Γης, που

εκλύουν δευτερεύουσα ακτινοβολία (κοσμική συμβολή) και τα ραδιενεργά νουκλεΐδια που δημιουργήθηκαν κατά το σχηματισμό της Γης και εξακολουθούν να υπάρχουν στον φλοιό της (επίγεια συμβολή). Η επίγεια συμβολή αποτελείται κυρίως από τα ραδιονουκλεΐδια των αλυσίδων διάσπασης του ουρανίου και του θορίου μαζί με το ραδιενεργό κάλιο.

Τα φυσικά ραδιονουκλεΐδια, τόσο τα επίγεια όσο και τα κοσμικά, μεταναστεύουν στο περιβάλλον μέσω των παρακάτω οδών: αέρας, νερό, πετρώματα, έδαφος και τροφική αλυσίδα. Τα ραδιονουκλεΐδια μπορούν στη συνέχεια να εισέλθουν στο ανθρώπινο σώμα μέσω της κατάποσης (τροφή και πόσιμο νερό) και της εισπνοής προκαλώντας τη λεγόμενη εσωτερική έκθεση. Η εξωτερική έκθεση οφείλεται σε κοσμική ακτινοβολία και ακτινοβολία από επίγεια ραδιονουκλεΐδια που υπάρχουν στο έδαφος, τα πετρώματα και τα οικοδομικά υλικά. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το ραδόνιο είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας συμβολής στην ανθρώπινη έκθεση σε ακτινοβολία ([EU Science Hub, 2024](#)).

Η ραδιενέργεια είναι ένα φυσικό φαινόμενο μέσω του οποίου τα ασταθή ισότοπα ορισμένων χημικών στοιχείων μπορούν να χάσουν ενέργεια και να μετατραπούν σε άλλα πιο σταθερά ισότοπα. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εκπομπή ακτινοβολίας με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ακτίνες X και ακτίνες γάμμα) ή σωματιδίων (α , β και νετρόνια). Αυτός ο τύπος ακτινοβολίας ονομάζεται ιονίζουσα επειδή όταν διεισδύει στην ύλη, τείνει να έλκει ηλεκτρόνια από τα γύρω άτομα μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως ιονισμός. Στην περίπτωση που το υλικό είναι βιολογικός ιστός με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, ο ιονισμός των μορίων του νερού μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ελευθέρων ριζών, που έχουν υψηλή χημική δραστηριότητα και να αλλοιώσει σημαντικά μόρια που αποτελούν μέρος των ιστών των ζωντανών οργανισμών. Μεταξύ αυτών των αλλαγών μπορούν να συμπεριληφθούν χημικές αλλαγές στο DNA, το βασικό οργανικό μόριο των κυττάρων του ανθρώπινου σώματος. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να οδηγήσουν στην εμφάνιση βιολογικών επιδράσεων, συμπεριλαμβανομένης της ανώμαλης ανάπτυξης των κυττάρων και μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο σοβαρές ανάλογα με τη δόση ακτινοβολίας που λαμβάνεται. Τα τρία τέταρτα της ραδιενέργειας στο περιβάλλον προέρχονται από τα φυσικά στοιχεία. Υπό αυτή την έννοια, το ραδόνιο είναι η μεγαλύτερη πηγή φυσικής ραδιενέργειας και η συγκέντρωση αυτού και των ισότοπων του στο πόσιμο νερό ή στον εσωτερικό αέρα των κτιρίων πρέπει να αξιολογηθεί ([Rizo-Maestre et al., 2018](#)).

1.3 Ρύπανση από Ραδόνιο

Το ραδόνιο είναι ένα άχρωμο και άοσμο ευγενές αέριο, με τέσσερα γνωστά φυσικά ισότοπα, εκ των οποίων σημαντικότερο για την υγεία είναι το Rn-222, με χρόνο ημιζωής 3,82 ημέρες. Το ραδόνιο προέρχεται από την αλυσίδα αντιδράσεων εξόρυξης του ουρανίου (U-238), πηγάζοντας άμεσα από την αντίδραση του ραδίου (Ra-226) και η ραδιενεργότητά του αποτελεί χαρακτηριστικό στοιχείο του. Το ραδόνιο διασπάται σε περαιτέρω ραδιενεργά στοιχεία, έως ένα σταθερό ισότοπο του μολύβδου, Pb-206. Ανάμεσα στα προϊόντα διάσπασής του περιλαμβάνονται τα α και β ραδιενεργά ισότοπα, τα οποία όταν συνδυάζονται με σκόνη και αεροζόλ που υπάρχουν στον αέρα, μπορούν να εισπνευστούν και να εισέλθουν στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα, όπου αποτελούν σημαντική πηγή ραδιενεργούς έκθεσης.

Τα σωματίδια α αποτελούνται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, έτσι έχουν τη δομή πυρήνα του Ηλίου (He) και έχουν την ικανότητα να προκαλέσουν μεταβολές στο DNA που βρίσκεται στα κύτταρα των ζωντανών οργανισμών. Αυτή η ακτινοβολία έχει μικρή εμβέλεια και εμποδίζεται από το ανθρώπινο δέρμα, αλλά έχει καρκινογόνο δράση αν εισέλθει στο σώμα, κυρίως στο αναπνευστικό σύστημα. Τα σωματίδια β και γ διεισδύουν βαθύτερα στο σώμα και μπορούν να μεταβάλουν το γενετικό υλικό, οδηγώντας στην ανάπτυξη κακοηθών όγκων.

Το ραδόνιο είναι εξαιρετικά κινητικό αέριο και μπορεί να μεταφερθεί τόσο στον φλοιό της γης όσο και στον αέρα. Οι συγκεντρώσεις του ραδονίου μετρούνται σε Becquerels (Bq) ανά κυβικό μέτρο αέρα. Ένα Becquerel εκφράζει μια διάσπαση ανά δευτερόλεπτο, που αποτελεί μια πολύ μικρή μονάδα. Επομένως χρησιμοποιείται για την μέτρησή του και η μονάδα Curie (Ci) ($1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$). Η δόση ιονίζουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από το σώμα εκφράζεται σε μονάδες gray (Gy), όπου ένα Gy αντιστοιχεί στην ενέργεια ενός joule που απορροφάται από ένα κιλό σωματικού βάρους (J/kg) (Grzywa-Celińska et al., 2020).

Ως φυσικό ραδιενεργό υλικό, το ραδόνιο υπάρχει παντού στον αέρα σε διάφορες συγκεντρώσεις και εκτιμάται ότι συμβάλλει στο ήμισυ περίπου της μέσης ετήσιας φυσικής ακτινοβολίας υποβάθρου (background radiation). Το ραδόνιο και τα προϊόντα διάσπασής του μπορούν να εισέλθουν στο ανθρώπινο σώμα κατά την εισπνοή ή την κατάποση. Το μεγαλύτερο μέρος του εισπνεόμενου ραδονίου εκπνέεται. Ωστόσο, μια μικρή ποσότητα ραδονίου και τα ισότοπά του μπορεί να παραμείνουν στους πνεύμονες, να υποστούν ραδιενεργή διάσπαση με αποτέλεσμα την εκπομπή σωματιδίων α , οδηγώντας σε βλάβη των πνευμόνων (Kang et al., 2019).

Το ελάχιστο επίπεδο ραδονίου εσωτερικών χώρων, κάτω από $50 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, θεωρείται ασφαλές. Το χαμηλό επίπεδο, που κυμαίνεται μεταξύ $50\text{-}100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, θεωρείται αποδεκτό και απαιτεί τακτική παρακολούθηση και πιθανά προληπτικά μέτρα. Το μέτριο επίπεδο, μεταξύ $100\text{-}150 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, απαιτεί προσοχή και εφαρμογή περιοριστικών μέτρων. Το επίπεδο κινδύνου, άνω των $150 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, απαιτεί άμεση δράση για την μόνιμη αντιμετώπιση του προβλήματος ([Airthings, 2023](#)).

Σε εξωτερικούς χώρους, το ραδόνιο αραιώνεται γρήγορα σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, οπότε δεν αποτελεί κίνδυνο. Το μέσο επίπεδο ραδονίου σε εξωτερικούς χώρους κυμαίνεται από $5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ έως $15 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις είναι υψηλότερες σε εσωτερικούς χώρους και σε χώρους με ελάχιστο αερισμό, με τα υψηλότερα επίπεδα να παρατηρούνται σε μέρη όπως ορυχεία, σπήλαια και εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού. Σε κτίρια όπως σπίτια, σχολεία και γραφεία, τα επίπεδα μπορεί να ποικίλλουν σημαντικά από $10 \text{ Bq}/\text{m}^3$ έως και άνω των $10000 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Δεδομένων των ιδιοτήτων του ραδονίου, οι ένοικοι τέτοιων κτιρίων θα μπορούσαν εν αγνοία τους να ζουν ή να εργάζονται σε πολύ υψηλά επίπεδα ραδονίου ([WHO, 2023a](#)).

1.4 Έκθεση σε Φυσική Ραδιενέργεια και Ραδόνιο

Οι εξορύξεις σε ορυχεία λαμβάνουν χώρα εδώ και χιλιάδες χρόνια, με τους Αιγύπτιους να εξορύσσουν χρυσό πριν από 4.000 χρόνια. Το ζήτημα του υψηλού ποσοστού θνησιμότητας μεταξύ των ανθρακωρύχων στην κεντρική Ευρώπη αναγνωρίστηκε πριν από τον 17ο αιώνα. Στα τέλη του 19ου αιώνα η κύρια αιτία αναγνωρίστηκε ως μια ασθένεια του πνεύμονα, η οποία αργότερα αποδείχθηκε πως είναι καρκίνος. Προτάθηκε για πρώτη φορά το 1924 ότι αυτή η μορφή καρκίνου θα μπορούσε να αποδοθεί στην έκθεση στο ραδόνιο (ICRP, 2018).

Για τους περισσότερους ανθρώπους, η σημαντικότερη έκθεση σε ραδόνιο συμβαίνει στο σπίτι, όπου οι άνθρωποι περνούν μεγάλο μέρος του χρόνου τους, αν και οι εσωτερικοί χώροι εργασίας μπορεί επίσης να αποτελούν πηγή έκθεσης. Η συγκέντρωση ραδονίου στα κτίρια εξαρτάται από:

- i) την τοπική γεωλογία (για παράδειγμα την περιεκτικότητα σε ουράνιο και τη διαπερατότητα του υποκείμενου εδάφους και των πετρωμάτων)
- ii) τις διαθέσιμες οδούς για τη διέλευση του ραδονίου από το έδαφος στο κτίριο
- iii) την εκπνοή ραδονίου από τα δομικά υλικά
- iv) το ρυθμό ανανέωσης του αέρα, ο οποίος εξαρτάται από την κατασκευή και την αεροστεγανότητα του κτιρίου και τις συνθήκες αερισμού των ενοίκων

Οι συγκεντρώσεις ραδονίου ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ γειτονικών κτιρίων, καθώς και εντός ενός κτιρίου από ημέρα σε ημέρα και από ώρα σε ώρα. Λόγω αυτών των διακυμάνσεων, είναι προτιμότερο να εκτιμάται η μέση ετήσια συγκέντρωση ραδονίου στον εσωτερικό αέρα με μετρήσεις για τουλάχιστον 3 μήνες. Τα επίπεδα ραδονίου σε κατοικίες μπορούν να μετρηθούν με φθινό και απλό τρόπο μέσω μικρών παθητικών ανιχνευτών. Οι μετρήσεις πρέπει να βασίζονται σε αξιόπιστα πρωτόκολλα, ώστε να διασφαλίζεται η συνοχή και η αξιοπιστία των δεδομένων. Οι βραχυχρόνιες δοκιμές ραδονίου μπορούν να είναι χρήσιμες κατά τη λήψη αποφάσεων σε καταστάσεις ευαίσθητου χρόνου, όπως οι πωλήσεις κατοικιών ή ο έλεγχος της αποτελεσματικότητας των εργασιών μετριασμού του ραδονίου (WHO, 2023a).

Οι κυριότεροι οδοί έκθεσης του ανθρώπου σε ραδόνιο είναι ο αέρας, το νερό και τα δομικά υλικά, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 1 και την Εικόνα 2. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου στον αέρα εσωτερικών χώρων τείνουν να διαφέρουν ανάμεσα σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, ακόμη και ανάμεσα σε μεμονωμένα κτίρια, λόγω των

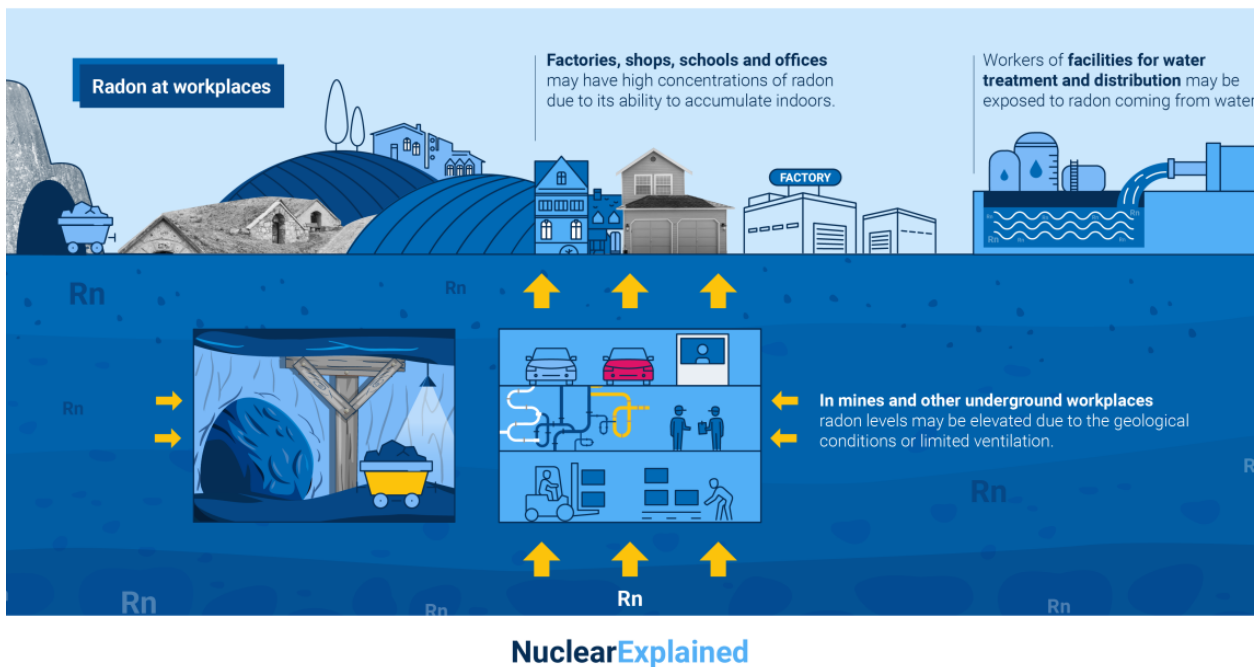
διακυμάνσεων στο κλίμα, τα δομικά υλικά, τον εξαερισμό, τις συνήθειες των κατοίκων και, κυρίως, την γεωλογία. Αφού απελευθερωθεί το ραδόνιο μέσω του εδάφους, διαλύεται στον αέρα πριν εισέλθει στα κτίρια. Ορισμένοι τύποι πετρωμάτων, όπως γρανίτες, μιγματίτες και άργιλοι είναι ιδιαίτερα πλούσιοι σε ουράνιο και ράδιο, τα οποία εκλύονται σε ραδόνιο και αποτελούν την κύρια πηγή ραδονίου στον εσωτερικό αέρα. Το ραδόνιο μπορεί να εισέρχεται στα κτίρια μέσω ρωγμών στο δάπεδο, κενών στην κατασκευή, παραθύρων, αποχετεύσεων ή χώρων γύρω από καλώδια και σωλήνες. Το ραδόνιο δεν αραιώνεται τόσο γρήγορα στον εσωτερικό αέρα όσο στον εξωτερικό και τείνει να συσσωρεύεται στους κλειστούς χώρους των κτιρίων, αποτελώντας σημαντική πηγή έκθεσης σε ραδιενέργεια.

Το ραδόνιο μπορεί να διαλυθεί και να συσσωρευτεί σε νερό που προέρχεται από υπόγειες πηγές, όπως αντλίες νερού ή γεωτρήσεις που πραγματοποιούνται σε περιοχές πλούσιες σε ουράνιο. Το ραδόνιο που περιέχεται στο νερό μπορεί να απελευθερωθεί στον αέρα κατά τη χρήση του νερού, όπως κατά το ντους ή το πλύσιμο ρούχων. Το νερό συνήθως αποτελεί λιγότερη σημαντική πηγή έκθεσης στο ραδόνιο συγκριτικά με αυτό που εκλύεται από το έδαφος.

Τα περισσότερα κατασκευαστικά υλικά εκλύουν αμελητέες ποσότητες ραδονίου, όμως ορισμένα υλικά μπορούν να αποτελέσουν σημαντικές πηγές έκθεσης στο ραδόνιο. Τέτοια υλικά τείνουν να συνδυάζουν υψηλά επίπεδα Ραδίου-226 και υψηλή πορότητα, που επιτρέπει στο ραδόνιο να απελευθερωθεί. Μερικά από αυτά είναι το σκυρόδεμα εμπλουτισμένο με άργιλο, ο φωσφόγυψος και ο ιταλικός τόφος. Η χρήση υλικών από παραπροϊόντα της εξόρυξης του ουρανίου σε θεμέλια κτιρίων μπορεί επίσης να συμβάλει στη συγκέντρωση σημαντικών ποσοτήτων ραδονίου σε εσωτερικό χώρο (IAEA, 2023).



Εικόνα 1. Απεικόνιση οδών έκθεσης σε ραδόνιο σε κατοικίες και εργασιακά περιβάλλοντα (IAEA, 2023)



Εικόνα 2. Απεικόνιση οδών έκθεσης σε ραδόνιο σε εργασιακά περιβάλλοντα (IAEA, 2023)

Κεφάλαιο 2. Ραδόνιο και Δημόσια Υγεία

2.1 Επιδημιολογική επιτήρηση ραδονίου

Η επιδημιολογική επιτήρηση του ραδονίου αποτελεί ουσιαστικό μέρος της προσπάθειας για κατανόηση και σωστή αντιμετώπιση των κινδύνων που σχετίζονται με την έκθεση σε αυτό. Μέσω της επιδημιολογικής επιτήρησης, επιτυγχάνεται η αξιολόγηση του επιπέδου της έκθεσης του πληθυσμού, η παρακολούθηση της εξέλιξης της κατάστασης και η αναγνώριση τυχόν τάσεων στις περιοχές με υψηλότερα επίπεδα ραδονίου. Η συλλογή δεδομένων μέσω της επιδημιολογικής παρακολούθησης επιτρέπει επίσης την ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ της έκθεσης σε ραδόνιο και των πιθανών επιπτώσεων στην υγεία, καθώς και την εξέταση της αποτελεσματικότητας των μέτρων πρόληψης και προστασίας που λαμβάνονται. Με βάση τα αποτελέσματα της επιδημιολογικής επιτήρησης, μπορούν να αναπτυχθούν πολιτικές και προγράμματα δράσης για τη μείωση της έκθεσης στο ραδόνιο και την προστασία της δημόσιας υγείας.

Οι επιδημιολογικές μελέτες ραδονίου είναι εξαιρετικά περίπλοκες, καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό τους. Είναι πολύ δαπανηρό και συχνά αδύνατο να σχεδιαστεί μια μελέτη που να λαμβάνει υπόψη όλους τους σχετικούς παράγοντες. Οι σημαντικότεροι από τους σχετικούς παράγοντες αναλύονται παρακάτω:

i) Κινητικότητα: οι άνθρωποι μετακινούνται πολύ κατά τη διάρκεια της ζωής τους, οπότε είναι πρακτικά αδύνατο να ελεγχθεί κάθε σπίτι στο οποίο έχει ζήσει και κάθε χώρος εργασίας στον οποίο έχει εργαστεί ένα άτομο.

ii) Αλλαγές στο κτίριο: με την πάροδο του χρόνου, τα παλαιότερα κτίρια συχνά καταστρέφονται ή ανακατασκευάζονται, οπότε οι μετρήσεις ραδονίου θα είναι ανύπαρκτες ή θα παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις. Το επίπεδο ραδονίου ενός κτιρίου μπορεί να αλλάξει, να αυξηθεί ή να μειωθεί, με την πάροδο του χρόνου, εάν εγκατασταθούν νέα συστήματα εξαερισμού, εάν οι συνήθειες των ενοίκων είναι σημαντικά διαφορετικές ή εάν τα θεμέλια μετατοπιστούν ή εμφανιστούν ρωγμές.

iii) Ανακριβή δεδομένα: συχνά η πλειοψηφία των περιπτώσεων καρκίνου του πνεύμονα (άτομα) που μελετώνται είναι αποβιώσαντες ή πολύ άρρωστοι για να τους πάρουν συνέντευξη οι ερευνητές. Αυτό απαιτεί την λήψη δεδομένων από δεύτερο χέρι, τα οποία μπορεί να μην είναι τόσο ακριβή.

iv) *Ιστορικό καπνίσματος*: το ιστορικό χρήσης καπνού μπορεί να αποτελέσει συγχυτικό παράγοντα, ιδιαίτερα στην μελέτη της σύνδεσης μεταξύ της έκθεσης σε ραδόνιο και της εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα.

v) *Άλλοι παράγοντες*: άλλοι ενδεχομένως συγχυτικοί παράγοντες, εκτός από τις διακυμάνσεις στις συνήθειες καπνίσματος, περιλαμβάνουν τη γενετική του ατόμου, τον τρόπο ζωής, την έκθεση σε άλλες καρκινογόνες ουσίες και τις προτιμήσεις θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού του σπιτιού (US EPA, 2023).

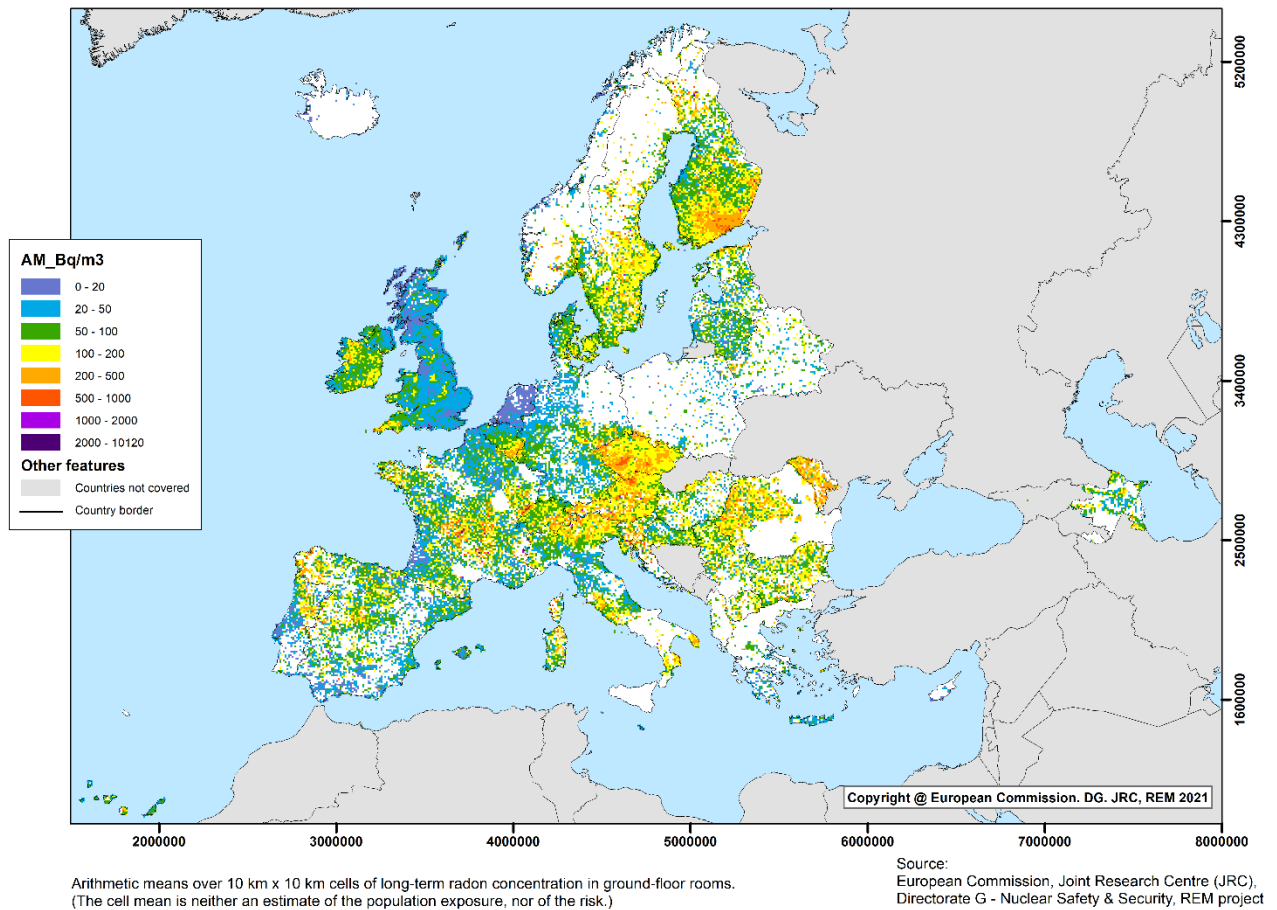
2.2 Γεωγραφική Κατανομή Ραδονίου

Η κατανομή των συγκεντρώσεων ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους σε όλη την Ευρώπη αντικατοπτρίζει την υποκείμενη γεωλογία, με υψηλές συγκεντρώσεις σε εσωτερικούς χώρους σε περιοχές με ορισμένους τύπους πετρωμάτων, όπως γρανίτη. Οι κλιματικοί και ορισμένοι ανθρωπογενείς παράγοντες συμβάλλουν επίσης στις συγκεντρώσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, αλλά η χωρική κατανομή τους δεν είναι ακόμη σαφής. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου αυξάνονται επίσης με το βάθος, γεγονός που συμβάλλει στα υψηλά επίπεδα επαγγελματικής έκθεσης σε ορισμένους τύπους εξορυκτικών δραστηριοτήτων και στις υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου στο έδαφος και στους χαμηλότερους ορόφους, καθώς και στα υπόγεια των κατοικιών. Δεν υπάρχουν αξιόπιστα στοιχεία σχετικά με τις τάσεις των συγκεντρώσεων ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους με την πάροδο του χρόνου, αν και ορισμένες μελέτες υποδηλώνουν ότι η βελτίωση της μόνωσης των κατοικιών μπορεί στην πραγματικότητα να μειώσει τον αερισμό και να αυξήσει την αεροστεγανότητα των κτιρίων, αυξάνοντας έτσι τις συγκεντρώσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, με αποτέλεσμα τα παλαιότερα κτίρια να έχουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους (EEA, 2022).

Ορισμένες περιοχές που είναι γνωστές για τα υψηλά επίπεδα εσωτερικού ραδονίου στην Ευρώπη περιλαμβάνουν περιοχές με υψηλά επίπεδα γρανιτικού υποστρώματος, όπως οι Άλπεις, τα Καρπάθια Όρη, και τα Σκανδιναβικά Όρη. Περιοχές με υψηλά επίπεδα ουρανίου στο έδαφος, όπως τμήματα της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης παρουσιάζουν επίσης υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. Αντίστοιχα, περιοχές με χαμηλότερα επίπεδα εσωτερικού ραδονίου περιλαμβάνουν κυρίως παράκτιες περιοχές, όπως μέρη της Ολλανδίας, της Δανίας και του Βελγίου. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι οι διακυμάνσεις στα επίπεδα εσωτερικού ραδονίου μπορεί να προκύπτουν ακόμα και εντός σχετικά μικρών γεωγραφικών περιοχών λόγω διαφορών στην κατασκευή κτιρίων, τον αερισμό και άλλους παράγοντες (Pantelić et al., 2018).

Το Κοινό Κέντρο Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής επιτηρεί και συντονίζει την καταγραφή της συγκέντρωσης ραδονίου εσωτερικών χώρων σε όλη την Ευρώπη. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του ευρωπαϊκού χάρτη ραδονίου εσωτερικών χώρων (Εικόνα 3), ο οποίος αναφέρει τους αριθμητικούς μέσους όρους της ετήσιας συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Ο χάρτης ενημερώνεται διαρκώς και σε ακανόνιστα χρονικά διαστήματα, καθώς νέα δεδομένα ραδονίου εσωτερικών χώρων φθάνουν στο Κοινό Κέντρο Ερευνών από τις συμμετέχουσες χώρες (Joint Research Centre, 2020).

European Indoor Radon Map, November 2021



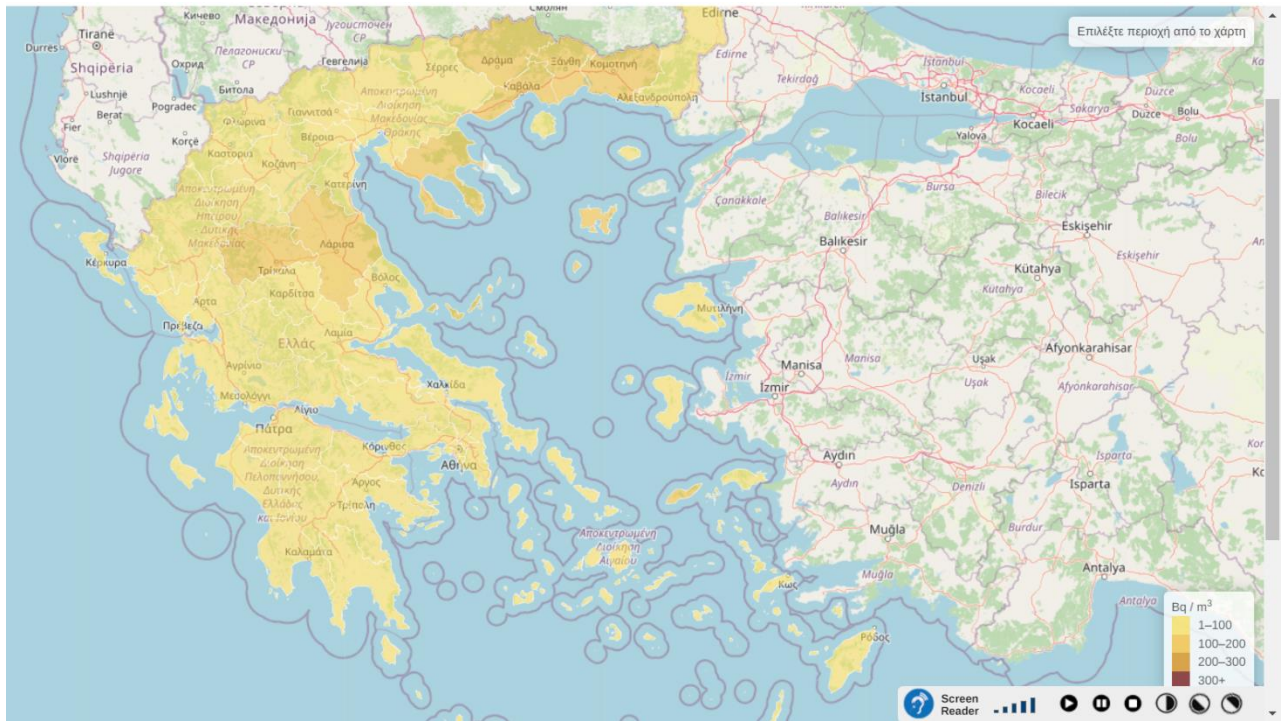
Εικόνα 3. Ευρωπαϊκός χάρτης ραδονίου εσωτερικών χώρων (Joint Research Centre, 2020)

Στην Ελλάδα το ραδόνιο ευθύνεται για το ένα τρίτο της συνολικής έκθεσης του πληθυσμού σε ιοντίζουσα ακτινοβολία. Η συντονισμένη προσπάθεια καταγραφής των συγκεντρώσεων ραδονίου στον εσωτερικό αέρα κατοικιών σε όλη τη χώρα (εθνική επισκόπηση ραδονίου) ξεκίνησε από την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) το 2010 στο πλαίσιο του έργου «ΠΡΙΣΜΑ» με τη συνεργασία των αρχών τοπικής αυτοδιοίκησης.

Πρόκειται για ένα μακροπρόθεσμο σχέδιο χαρτογράφησης των συγκεντρώσεων ραδονίου σε κατοικίες σε όλη την Ελλάδα, το οποίο βρίσκεται σε εξέλιξη ως και σήμερα. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου που μετρώνται σε κατοικίες, δειγματοληπτικά, σε όλη τη χώρα, καταχωρούνται στην εθνική βάση ραδονίου που έχει δημιουργήσει η ΕΕΑΕ ώστε

να είναι δυνατή η εκτίμηση της ετήσιας έκθεσης του πληθυσμού και πραγματοποιούνται με την συμβολή των δήμων (ΕΕΑΕ, 2024).

Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4, υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου φαίνεται να έχουν παρατηρηθεί στην Κεντρική και Βόρεια Ελλάδα, σε τμήματα της Θεσσαλίας, της Μακεδονίας και της Θράκης. Παρ' όλα αυτά, οι συγκεντρώσεις εσωτερικού ραδονίου μπορεί να διαφέρουν ακόμα και σε μικρές γεωγραφικές περιοχές ανάλογα με τις τοπικές γεωλογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες (ΕΕΑΕ, 2023). Η ΕΕΑΕ έχει αναλάβει επίσης την σύνταξη του Εθνικού Σχεδίου Δράσης για την αντιμετώπιση των μακροπρόθεσμων κινδύνων από την έκθεση στο Ραδόνιο (ΕΣΧΕΔΡΑ). Το σχέδιο ΕΣΧΕΔΡΑ, που συντάχθηκε το 2020, περιλαμβάνει δράσεις για ένα χρονικό διάστημα 10 ετών από την ημερομηνία έγκρισής του που στοχεύουν στον περιορισμό της έκθεσης του ελληνικού πληθυσμού στο ραδόνιο. Η δημιουργία του εθνικού χάρτη ραδονίου έχει συμπεριληφθεί στο σχέδιο ΕΣΧΕΔΡΑ ως μία από τις επιμέρους δράσεις του (ΕΕΑΕ, 2024).



Εικόνα 4. Εθνικός Χάρτης Ραδονίου (ΕΕΑΕ, 2023)

2.3 Επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία

Σε πολύ υψηλές δόσεις, η ακτινοβολία μπορεί να βλάψει τη λειτουργία των ιστών και των οργάνων και να προκαλέσει οξείες επιδράσεις όπως ναυτία και έμετο, ερυθρότητα του δέρματος, τριχόπτωση, οξύ σύνδρομο ακτινοβολίας, τοπικούς τραυματισμούς από ακτινοβολία (επίσης γνωστά ως εγκαύματα από ακτινοβολία) ή ακόμα και θάνατο.

Τα παιδιά είναι πιο πιθανό να αναπτύξουν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε ακτινοβολία. Τα σώματα των νεότερων ανθρώπων, αντιθέτως με αυτά των ενηλίκων, μεγαλώνουν και αναπτύσσονται διαρκώς, έχουν περισσότερα κύτταρα που διαιρούνται ανά πάσα στιγμή και είναι πιο ευαίσθητα στην ακτινοβολία και ευάλωτα σε βλάβες, που μπορεί να οδηγήσουν σε ανάπτυξη καρκίνου στο μέλλον. Τα παιδιά έχουν επίσης μεγαλύτερο μέσο προσδόκιμο ζωής, επομένως υπάρχει περισσότερος χρόνος για να αναπτυχθούν και να εκδηλωθούν καρκινώματα, γι' αυτό και είναι ιδιαίτερα σημαντικό τα παιδιά να ακολουθούν τις οδηγίες σχετικά με τα προστατευτικά μέτρα και να αναζητούν άμεση ιατρική βοήθεια.

Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (π.χ. πυρηνικό ατύχημα), οι πρώτοι ανταποκριτές και οι εργαζόμενοι στις πληγείσες εγκαταστάσεις (π.χ. εργαζόμενοι σε πυρηνικούς σταθμούς) διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο να εκτεθούν σε υψηλές δόσεις ιοντίζουσας ακτινοβολίας σε βαθμό πρόκλησης οξείων επιπτώσεων. Ο γενικός πληθυσμός, ωστόσο, δεν είναι πιθανό να εκτεθεί σε δόσεις αρκετά υψηλές ώστε να προκληθούν τα προαναφερόμενα αποτελέσματα. Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, οι άνθρωποι θα πρέπει να ακολουθούν πληροφορίες από τις τοπικές αρχές και να συμμορφώνονται με επείγουσες προστατευτικές ενέργειες για να μειώσουν τον κίνδυνο έκθεσής τους (WHO, 2023b).

Σύμφωνα με τον International Agency for Research on Cancer (IARC), το ραδόνιο και τα προϊόντα διάσπασής του ταξινομούνται ως καρκινογόνο στοιχείο Ομάδας 1 για τον άνθρωπο (Hamilton, 1987). Το ραδόνιο και τα προϊόντα διάσπασής του εισέρχονται στους πνεύμονες και στο στομάχι μέσω των διαδικασιών εισπνοής και κατάποσης. Από εκεί μπορούν να μεταφερθούν σε άλλα όργανα μέσω σωματικών υγρών και να ακτινοβολούν τους ιστούς κατά τη διάρκεια των διεργασιών ραδιενεργής αποσύνθεσής τους. Οι ιστοί ακτινοβολούνται από σωματίδια α που εκπέμπονται από τα αντίστοιχα ραδιονουκλεΐδια της αλυσίδας διάσπασης του ραδονίου και είναι επιρρεπείς σε βιολογικές βλάβες.

Τα σωματίδια α που εκπέμπονται έχουν βάθος διείσδυσης ιστού 48-71 μm , με αποτέλεσμα να προκαλούν σημαντικές βλάβες στο DNA των κυττάρων σε αυτές τις μικρές αποστάσεις. Δεν επηρεάζονται όλα τα όργανα εξίσου από την ίδια ποσότητα

έκθεσης σε ακτινοβολία, αλλά η έκταση της βλάβης εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις του ραδονίου, τον χρόνο έκθεσης στην ακτινοβολία, τη διαλυτότητα του ραδονίου στους ιστούς ή τα όργανα του σώματος, την ευαισθησία των οργάνων, την ηλικία των ατόμων, καθώς και το φύλο τους. Διαπιστώθηκε ότι το ραδόνιο ευθύνεται για περισσότερο από το 55% της συνολικής δόσης ακτινοβολίας σε κύτταρα του αναπνευστικού συστήματος. Ενώ τα κύτταρα είναι ικανά να αυτοεπιδιορθώνουν το DNA, η επαναλαμβανόμενη βλάβη στο DNA μπορεί να οδηγήσει σε μεταλλάξεις και να προκαλέσει ανεξέλεγκτη κυτταρική ανάπτυξη.

Τα προβλήματα καρκινογόνου κινδύνου για την υγεία που σχετίζονται με την έκθεση στο ραδόνιο ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1930 κατά τη διάρκεια ερευνών σχετικά με το γιατί οι μισοί ανθρακωρύχοι ουρανίου στα Ore Mountains στην Τσεχοσλοβακία πέθαναν από καρκίνο του πνεύμονα. Αυτό εγκαθίδρυσε την σημασία του προσδιορισμού του ραδονίου και της μέτρησης των επιπέδων του στο φυσικό περιβάλλον για την παρακολούθηση της ανθρώπινης υγείας και ασφάλειας. Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου του πνεύμονα μετά από μακροχρόνια επαγγελματική έκθεση σε ραδόνιο έχει παρατηρηθεί μεταξύ των ανθρακωρύχων ουρανίου σε πολλές χώρες (Das, 2021).

Παρακάτω αναλύονται οι αρνητικές επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει η έκθεση σε ραδόνιο στην ανθρώπινη υγεία.

i) Καρκίνος του πνεύμονα

Αφού το ραδόνιο και τα προϊόντα αποδόμησής του εισπνευστούν στους πνεύμονες, απορροφώνται από τα κύτταρα των βρογχικών αεραγωγών και εναποτίθενται στο αναπνευστικό επιθήλιο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, μπορούν να ακτινοβολούν τους βρογχικούς ιστούς των πνευμόνων εκπέμποντας ακτινοβολίες α και να διαταράσσουν το DNA των βρογχικών ιστών. Η βλάβη του DNA έχει τη δυνατότητα να είναι ένα βήμα σε μια αλυσίδα γεγονότων που μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη καρκίνου του πνεύμονα. Για τη μακροχρόνια έκθεση στο ραδόνιο, ο σχετικός κίνδυνος καρκίνου του πνεύμονα μπορεί να αυξηθεί κατά 16% ανά $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ συγκέντρωσης ραδονίου.

Το ραδόνιο στα υπόγεια ύδατα σχετίζεται επίσης με τη συχνότητα εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα. Συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι το 89% των περιπτώσεων καρκίνου του πνεύμονα που προκαλούνται από την έκθεση σε ραδόνιο, σχετίζονται με ραδόνιο που απελευθερώνεται στον εσωτερικό αέρα από νερό με υψηλή συγκέντρωση ραδονίου. Επίσης παρατηρείται ότι η επίπτωση νόσων του αναπνευστικού υπερβαίνει το μέσο όρο σε ορισμένες κατοικημένες περιοχές όπου το επίπεδο ραδονίου είναι υψηλό. Η έκθεση σε

ραδόνιο προκαλεί το 3–14% όλων των καρκίνων του πνεύμονα παγκοσμίως, ανάλογα με το μέσο επίπεδο ραδονίου και τον επιπολασμό του καπνίσματος σε κάθε χώρα.

Επιπρόσθετα, οι καπνιστές εκτιμάται ότι διατρέχουν 25 φορές μεγαλύτερο κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα από το ραδόνιο σε σχέση με τους μη καπνιστές. Η συνεργατική επίδραση της εισπνοής αερίου ραδονίου και του καπνίσματος μπορεί να ενισχύσει αποτελεσματικά τον κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα. Το ραδόνιο αναγνωρίζεται ως η πρώτη αιτία καρκίνου του πνεύμονα μεταξύ των μη καπνιστών και είναι η δεύτερη πιο σημαντική αιτία καρκίνου του πνεύμονα μετά το κάπνισμα (Grzywa-Celińska et al., 2020).

ii) Άλλες παθήσεις του αναπνευστικού συστήματος

Η έκθεση στο ραδόνιο μπορεί να προκαλέσει εκτός από καρκίνο του πνεύμονα και άλλες κακοήθειες και μη κακοήθειες αναπνευστικές παθήσεις. Σε μελέτες έχει εντοπιστεί υπέρβαση της θνησιμότητας από μη καρκινικές ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος, όπως άσθμα, βρογχίτιδα, πνευμοκονίωση, εμφύσημα, πνευμονική ίνωση, διάμεση πνευμονοπάθεια και φυματίωση. Η χρήση καπνού και η εισπνοή σκόνης είναι πιθανοί παράγοντες αύξησης της θνησιμότητας από μη καρκινικές αναπνευστικές παθήσεις. Μελέτες έχουν δείξει ότι η έκθεση στο ραδόνιο σχετίζεται με αυξημένο κίνδυνο θανάτου από χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια (ΧΑΠ).

iii) Καρκίνος και παθήσεις του δέρματος

Το αερομεταφερόμενο ραδόνιο μπορεί να επικαθίσει στο ανθρώπινο δέρμα μέσω ηλεκτροστατικής έλξης. Το προσβεβλημένο δέρμα στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ικανό να σταματήσει τις ακτινοβολίες α ή να απορροφήσει ακίνδυνα την ενέργεια διάσπασης. Όμως, όπου το δέρμα είναι λεπτό, όπως στο πρόσωπο και στο λαιμό, οι ακτινοβολίες α μπορούν να φτάσουν στα ευαίσθητα κύτταρα κάτω από την επιδερμίδα. Έτσι, όταν ένα άτομο περνά μεγάλο χρονικό διάστημα σε ατμόσφαιρα που περιέχει ραδόνιο, το δέρμα μπορεί να λάβει μια σημαντική ποσότητα δόσεων ακτινοβολίας α .

Ο καρκίνος του δέρματος, όπως το βασικοκυτταρικό καρκίνωμα (BCC), έχει παρατηρηθεί σε δείγμα ανθρακωρύχων ουρανίου εκτεθειμένων στα προϊόντα αποικοδόμησης του ραδονίου. Ενώ μια θετική σχέση με τον κακόηθη μελανωματικό καρκίνο δέρματος που έχει βρεθεί σε ορισμένες μελέτες, δεν είναι στατιστικά σημαντική. Ορισμένες μελέτες υποδεικνύουν μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ του καρκίνου του μελανώματος και της έκθεσης σε ραδόνιο στα σπίτια. Είναι πιθανή η ύπαρξη υπαιτιότητας της έκθεσης σε ραδόνιο σε δερματικές παθήσεις, ιδίως σε περιοχές με υψηλά επίπεδα ραδονίου στο περιβάλλον, αλλά απαιτείται περαιτέρω μελέτη.

iv) Καρκίνος και παθήσεις στομάχου

Η κατάποση νερού με υψηλά επίπεδα ραδονίου είναι η κύρια διαδρομή για τη μεταφορά δόσεων ακτινοβολίας α απευθείας στο στομάχι. Μετά την κατάποση, το νερό απορροφάται στο γαστρεντερικό σύστημα που αποτελείται από το στόμα, τον οισοφάγο, το στομάχι και το έντερο. Το ραδόνιο στο νερό παραμένει στο στομάχι για αρκετά λεπτά. Μια μικρή ποσότητα του πόσιμου νερού απορροφάται από το στομάχι και το παχύ έντερο, ενώ η υπόλοιπη απορροφάται κυρίως από το λεπτό έντερο. Ευαίσθητα κύτταρα στο στομάχι εκτίθενται σε σωματίδια α που εκπέμπονται από το ραδόνιο και τα προϊόντα διάσπασής του στο νερό. Οι έρευνες δείχνουν ότι η προσβολή στο στομάχι μπορεί να είναι σημαντική, με σημαντικό κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου του στομάχου. Συγκεκριμένα εκτιμάται ότι το 11% του καρκίνου του στομάχου προκαλείται από την κατανάλωση νερού με υψηλή συγκέντρωση ραδονίου. Το γαστρεντερικό σύστημα έχει επίσης τη δυνατότητα έκθεσης στο ραδόνιο μέσω του αεραγωγού ή των πνευμονικών εκκρίσεων. Έχουν παρατηρηθεί υψηλά επίπεδα καρκίνου του στομάχου σε επιζώντες από ατομικές βόμβες και ομάδες ανθρακωρύχων. Μια μελέτη στη Σουηδία σε ανθρακωρύχους έδειξε ότι ο κίνδυνος καρκίνου του στομάχου σχετίζεται σημαντικά με τη συσσωρευμένη έκθεση στο ραδόνιο μεταξύ των ανθρακωρύχων. Μια μελέτη σε ορυχείο της Γερμανίας ανέφερε μια σημαντική θετική σχέση μεταξύ της έκθεσης στο ραδόνιο και του καρκίνου του στομάχου. Πρόσφατα, μια μελέτη που διεξήχθη στη Γαλικία, στην Ισπανία, έδειξε μια στατιστική σχέση του καρκίνου του στομάχου με το εσωτερικό ραδόνιο, κυρίως στις γυναίκες.

ν) Καρδιαγγειακές παθήσεις

Η ακτινοβολία στο αίμα και τα τοιχώματα των στεφανιαίων αρτηριών λόγω της έκθεσης στο ραδόνιο και τα προϊόντα αποσύνθεσής του μπορεί να αυξήσει τη συχνότητα εμφάνισης καρδιαγγειακών παθήσεων (cardiovascular diseases - CVDs). Μελέτες συνδέουν την θνησιμότητα από στεφανιαία νόσο με την συσσωρευμένη έκθεση σε ραδόνιο, αλλά τα στοιχεία δεν είναι επαρκή. Μια μελέτη σε πληθυσμό Καναδών ανθρακωρύχων έδειξε μια θετική, αλλά μη στατιστικά σημαντική, συσχέτιση μεταξύ του καρκίνου των στεφανιαίων αρτηριών και της έκθεσης στο ραδόνιο. Παρόμοια μελέτη σε καλλιεργητές ουρανίου στη Γερμανία δεν έδειξε σημαντική συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης στο ραδόνιο και της θνησιμότητας από καρδιαγγειακές νόσους. Παρ' όλα αυτά, παρατηρήθηκε τάση στον κίνδυνο των κυκλοφορικών νοσημάτων με την αύξηση της συσσωρευμένης έκθεσης στο ραδόνιο. Ωστόσο, αυξημένος κίνδυνος εμφάνισης κυκλοφορικών ασθενειών με αυξανόμενη αθροιστική έκθεση στο ραδόνιο έχει παρατηρηθεί μεταξύ των ανθρακωρύχων ουρανίου. Ο σχετικός κίνδυνος θνησιμότητας από οξύ έμφραγμα του μυοκαρδίου μεταξύ των ανθρακωρύχων (κατόπιν προσαρμογής για το κάπνισμα κατά τη διάρκεια της ζωής) σχετίζεται σημαντικά με αθροιστική έκθεση σε ραδόνιο. Επιπλέον, μία μελέτη υποδεικνύει 4,58% αύξηση στον κίνδυνο θνησιμότητας από συμφορητική καρδιακή ανεπάρκεια (congestive heart failure - CHF) η οποία σχετίζεται με υψηλή έκθεση σε ραδόνιο.

vi) Καρκίνος και ασθένειες του αίματος

Το ραδόνιο και τα προϊόντα διάσπασης του, καθώς μεταφέρονται στον μυελό των οστών μέσω της κυκλοφορίας του αίματος, μπορούν να μεταδώσουν υψηλές δόσεις σωματιδίων α απευθείας στους ιστούς του μυελού των οστών, ιδιαίτερα το ίδιο το ραδόνιο σε αντίθεση με τα προϊόντα αποσύνθεσής του. Η παρατεταμένη έκθεση σε ακτινοβολία α μπορεί να βλάψει τους ιστούς του μυελού των οστών και να οδηγήσει στην ανάπτυξη ορισμένων ανώριμων ή μη φυσιολογικών κυττάρων του αίματος. Τα λευκά αιμοσφαίρια επηρεάζονται σε υψηλότερο βαθμό από τα υπόλοιπα συστατικά του αίματος.

Τα εκτεθειμένα αιμοσφαίρια μπορεί να υποστούν μια κακοήθη αλλαγή που μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη λευχαιμίας, η οποία αποτελεί μορφή καρκίνου του αίματος. Άλλα είδη καρκίνου του αίματος των οποίων η εμφάνιση ενδεχομένως να συνδέεται με την έκθεση σε ραδόνιο, αν και τα στοιχεία δεν είναι επαρκή, περιλαμβάνουν το πολλαπλό μύελωμα (multiple myeloma - MTM)/πλάσματοκυτταρικό μύελωμα (plasma cell myeloma), το λέμφωμα Hodgkin (HL) και το λέμφωμα μη Hodgkin (non-Hodgkin lymphoma - NHL).

viii) Ασθένειες και καρκίνος του εγκεφάλου και του κεντρικού νευρικού συστήματος

Το κεντρικό νευρικό σύστημα (ΚΝΣ) αποτελείται από δύο μέρη, τον εγκέφαλο και τον ωτιαίο μυελό. Η συσχέτιση της έκθεσης σε ραδόνιο με την εμφάνιση όγκων στον εγκέφαλο και το υπόλοιπο ΚΝΣ διερευνάται, αλλά τα δεδομένα δεν είναι επαρκή για την υποστήριξη κάποιας συσχέτισης. Παρ' όλα αυτά, έχει παρατηρηθεί σημαντικά αυξημένος κίνδυνος παιδικών καρκίνων του εγκεφάλου και του ΚΝΣ με τα αυξανόμενα επίπεδα ραδονίου στα υπόγεια ύδατα. Ακόμη, έχει καταγραφεί σημαντική συσχέτιση θνησιμότητας από εγκεφαλοαγγειακή νόσο με την αθροιστική έκθεση σε ραδόνιο. Μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η έκθεση σε ραδόνιο σε κατοικίες ή άλλους εσωτερικούς χώρους μπορεί να συσχετιστεί με τον κίνδυνο εγκεφαλοαγγειακού ατυχήματος (Cerebrovascular accident - CVA) ή εγκεφαλικού.

ix) Καρκίνος στο πάγκρεας

Εκτιμάται ότι ένα μέρος του ραδονίου που εισέρχεται στον οργανισμό και απορροφάται στο σώμα κατανέμεται στο πάγκρεας, και αυτή η ποσότητα του ραδονίου που καταναλώνεται μπορεί να παράγει ακτινοβολία α στο πάγκρεας. Μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ του ραδονίου εσωτερικού χώρου και της συχνότητας εμφάνισης καρκίνου του παγκρέατος έχει αναφερθεί σε μελέτη ανθρακωρύχων ουρανίου στην Τσεχία, υποδηλώνοντας ότι το ραδόνιο εσωτερικού χώρου μπορεί να είναι ένας σημαντικός παράγοντας κινδύνου για τον καρκίνο του παγκρέατος. Ωστόσο, η θνητότητα από καρκίνο του παγκρέατος δεν αυξάνεται με τη διάρκεια απασχόλησης ή με τη

συσσωρευμένη έκθεση στο ραδόνιο μεταξύ αυτών των ανθρακωρύχων. Όμως, σε κάθε περίπτωση απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για ασφαλή συμπεράσματα.

x) Καρκίνος στο συκώτι

Μελέτες έχουν υποδείξει υψηλότερη επίπτωση καρκίνου στο συκώτι ανάμεσα σε ανθρακωρύχους, καθώς και την πιθανή συσχέτισή της με την έκθεση σε ραδόνιο. Το ραδόνιο εσωτερικού χώρου μπορεί, λοιπόν, να είναι ένας σημαντικός παράγοντας κινδύνου για τον καρκίνο του ήπατος.

xi) Καρκίνος της χοληδόχου κύστης

Μια αυξημένη, αλλά μη στατιστικά σημαντική, θετική συσχέτιση της έκθεσης στο ραδόνιο με την εμφάνιση καρκίνου της χοληδόχου κύστης έχει παρατηρηθεί από δύο σχετικές μελέτες.

xii) Καρκίνος των νεφρών

Τα νεφρά λειτουργούν ως φίλτρο για τα διαλυτά απόβλητα της κυκλοφορίας του αίματος, την περίσσεια νερού και άλλες ενώσεις. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας φιλτραρίσματος, το ραδόνιο και διαλυμένα στο αίμα προϊόντα του μπορούν να μεταφέρουν δόσεις ακτινοβολίας α στους νεφρούς μέσω άμεσης αλληλεπίδρασης των εκπεμπόμενων σωματιδίων α με τα κύτταρα των νεφρών. Τα υψηλά επίπεδα έκθεσης σε ραδόνιο μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα καρκινογόνες επιδράσεις στους νεφρούς και καρκίνο των νεφρών. Τα ούρα περνάνε από τους ουρητήρες και τους νεφρούς και αποθηκεύονται στην ουροδόχο κύστη, επομένως, η κύστη θεωρείται ότι εκτίθεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στην ίδια ποσότητα ακτινοβολίας. Αρκετές μελέτες έχουν υποδείξει τη σημαντική συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης στο εσωτερικό ραδόνιο και του κινδύνου εμφάνισης καρκίνου των νεφρών. Η μετα-ανάλυση αυτών υποδεικνύει ότι η συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης στο ραδόνιο και των κινδύνων καρκίνου των νεφρών μεταξύ των μελετών στην Ευρώπη είναι μερικώς θετική και σημαντική, αλλά δεν υπάρχει απόδειξη για αυξημένο κίνδυνο καρκίνου των νεφρών από άλλες επιδημιολογικές μελέτες. Η συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης στο ραδόνιο και του καρκίνου των νεφρών δεν μπορεί να εξαιρεθεί λόγω της βιολογικής της πιθανότητας.

xiii) Καρκίνος του προστάτη

Ο καρκίνος του προστάτη είναι ο πιο συχνά διαγνωσμένος τύπος καρκίνου και ο δεύτερος πιο συχνός καρκίνος στους άνδρες παγκοσμίως. Εξετάζοντας τις μέσες τιμές ραδονίου ανά πληθυσμό σε δεκατέσσερις χώρες, μια μελέτη έχει δείξει θετική συσχέτιση μεταξύ του επιπέδου ραδονίου στα σπίτια και της εμφάνισης καρκίνου του προστάτη. Άλλες μελέτες όμως, έχουν δείξει απουσία συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης και

θνησιμότητας από καρκίνο του προστάτη και έκθεσης σε ραδόνιο. Οι αποδείξεις σχετικά με τον κίνδυνο καρκίνου του προστάτη από την έκθεση στο ραδόνιο και τα παράγωγά του δεν θεωρούνται επαρκείς.

xiv) Κίνδυνος για το έμβρυο

Το ραδόνιο μπορεί να επηρεάσει το έμβρυο, με αποτέλεσμα να μειώνει την ανάπτυξή του κατά τη διάρκεια διαφορετικών σταδίων της εγκυμοσύνης των εγκύων γυναικών. Τα εκτεθειμένα στο ραδόνιο έμβρυα εκτίθενται σε αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα αργότερα στη ζωή. Επιπλέον, η έκθεση στο ραδόνιο μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή καθυστέρηση στην ανάπτυξη του εγκεφάλου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διανοητικής υστέρησης. Επίσης, συνδέεται και με την εμφάνιση τερατογενέσεων σε βρέφη.

xv) Καρκίνος του μαστού

Αυξημένη επίπτωση καρκίνου του μαστού ενδέχεται να σχετίζεται με έκθεση των ασθενών σε υψηλά επίπεδα ραδονίου. Οι ενδείξεις για τις επιπτώσεις της έκθεσης στο ραδόνιο στο μαστό και το αναπαραγωγικό σύστημα των γυναικών είναι περιορισμένες και χρήζουν περαιτέρω μελέτης.

xvi) Ανδρική στειρότητα

Τα υψηλά επίπεδα ραδονίου στα σπίτια έχουν επίδραση στην ανδρική στειρότητα, ιδιαίτερα στη δραστηριότητα του σπέρματος (Das, 2021).

Κεφάλαιο 3. Έλεγχος έκθεσης σε ραδόνιο

3.1 Νομοθεσία και Ανώτατα όρια έκθεσης

Οι αρνητικές επιπτώσεις της ανθρώπινης έκθεσης στο ραδόνιο έχουν οδηγήσει στην προσπάθεια μείωσης της συγκέντρωσης του, μέσω της θεσμοθέτησης ορίων στα επιτρεπόμενα επίπεδα ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους από διάφορες κυβερνήσεις και οργανισμούς.

Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP, 2018), οι κυβερνήσεις κάθε χώρας θα πρέπει να ορίσουν ένα εθνικό επίπεδο αναφοράς όσο το δυνατόν χαμηλότερο, στο εύλογο εφικτό, στο εύρος των 100 - 300 Bq m⁻³. Η έκθεση στο ραδόνιο στην ανώτερη τιμή αναφοράς των 300 Bq*m⁻³ αντιστοιχεί σε ανώτερη προτεινόμενη ετήσια ενεργό δόση (annual effective dose) των 4 mSv σε χώρους εργασίας και 14 mSv σε κατοικίες. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (European Commission for Atomic Energy) συνέστησε το 1990 να μην υπερβαίνονται τα 400 Bq*m⁻³ συγκέντρωσης ραδονίου σε αέρα εσωτερικών χώρων (Rizo-Maestre et al., 2018). Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO, 2009) έχει ορίσει το ανώτατο επιτρεπτό όριο συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους στα 100 Bq*m⁻³.

Η Οδηγία για τα Βασικά Πρότυπα Ασφαλείας (Basic Safety Standards Directive) εισήγαγε για πρώτη φορά νομικά δεσμευτικές απαιτήσεις για την προστασία από την έκθεση σε φυσικές πηγές ακτινοβολίας και έδωσε εντολή σε όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ να καταρτίσουν εθνικά σχέδια δράσης για το ραδόνιο, να καθορίσουν επίπεδα αναφοράς για τις συγκεντρώσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους σε κατοικίες και χώρους εργασίας και να εντοπίσουν και να οριοθετήσουν επικίνδυνες για έκθεση σε ραδόνιο περιοχές (EEA, 2022).

Στην Ελλάδα, οι ισχύοντες Κανονισμοί Ακτινοπροστασίας διαμορφώθηκαν σύμφωνα με τα ισχύοντα ευρωπαϊκά Βασικά Πρότυπα Ασφάλειας σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα διεθνών αξιολογήσεων. Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας είναι η αρμόδια αρχή για τον έλεγχο, τη ρύθμιση και την εποπτεία του τομέα πυρηνικής ενέργειας, πυρηνικής τεχνολογίας, ραδιολογίας, πυρηνικής ασφάλειας και ακτινοπροστασίας για την Ελλάδα. Το θεσμοθετημένο επίπεδο αναφοράς για κατοικίες και εσωτερικούς χώρους εργασίας είναι 300 Bq*m⁻³. Στις περιπτώσεις που η συγκέντρωση ραδονίου υπερβαίνει το επίπεδο αναφοράς, συνιστάται η λήψη μέτρων μείωσής της (ΕΛΙΝΥΑΕ, 2024).

Το 1998, ο νόμος περί αντιμετώπισης του ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους στις ΗΠΑ έθεσε ως στόχο το ανώτατο όριο συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους να αντιστοιχεί σε εκείνο του φυσικού εξωτερικού περιβάλλοντος - κοντά στα $148 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Οι συστάσεις της Environmental Protection Agency των ΗΠΑ (US EPA) αναφέρουν ότι τα σπίτια πρέπει να επισκευάζονται εάν τα επίπεδα ραδονίου υπερβαίνουν τα $148 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, λόγω των διαπιστωμένων συσχετίσεων με κινδύνους για την υγεία πέραν του ορίου αυτού. Στη Νότια Κορέα, το Κορεατικό Υπουργείο Περιβάλλοντος καθόρισε την επιτρεπόμενη συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους στο ίδιο πρότυπο των Ηνωμένων Πολιτειών: χαμηλότερη ή ίση με $148 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Τόσο τα πρότυπα των Ηνωμένων Πολιτειών όσο και της Νότιας Κορέας είναι χαμηλότερα από εκείνα που έχουν τεθεί από τον Καναδά και το Ηνωμένο Βασίλειο, που συνιστούν $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ή λιγότερο. Συνολικά, τα δυτικά κράτη, συμπεριλαμβανομένου του Καναδά και του Ηνωμένου Βασιλείου, τείνουν να επιτρέπουν ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα ραδονίου σε σύγκριση με εκείνα που καθορίζονται από τις ασιατικές χώρες, όπως η Νότια Κορέα, με εξαίρεση τις Ηνωμένες Πολιτείες.

Παρόλο που οι κανονισμοί αυτοί θέτουν ένα πρότυπο, είναι περιορισμένοι λόγω του γεγονότος ότι αφορούν κυρίως σπίτια, τα οποία ενέχουν σημαντικά μικρότερο κίνδυνο συσσώρευσης αερίου ραδονίου από ό,τι άλλοι, τυπικά υπόγειοι, χώροι. Οι κίνδυνοι που συνδέονται με την έκθεση και την εισπνοή αερίου ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους ενισχύονται περαιτέρω σε υπόγεια περιβάλλοντα, όπως σταθμοί του μετρό ή μεταλλευτικές εγκαταστάσεις. Οι αυξημένοι κίνδυνοι υπερβολικής έκθεσης στο ραδόνιο σε υπόγειους χώρους μπορούν να αποδοθούν σε πολλαπλούς παράγοντες, όπως η έκθεση σε υλικά που απελευθερώνουν ραδόνιο, οι στενοί και κλειστοί χώροι, καθώς και οι παλαιές κατασκευές. Όλοι αυτοί οι παράγοντες επιδεινώνουν, όχι μόνο την ποσότητα έκθεσης στο αέριο, αλλά και τις βλαβερές επιπτώσεις του στον ανθρώπινο οργανισμό (Kim et al., 2022).

3.2 Μέτρηση έκθεσης

Η μέτρηση των συγκεντρώσεων ραδονίου και ο υπολογισμός της ετήσιας αποτελεσματικής δόσης (annual effective dose) είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση και την αντιμετώπιση των κινδύνων που συνδέονται με την έκθεση στο ραδόνιο. Η International Commission on Radiological Protection (ICRP) παρέχει οδηγίες για αυτήν τη διαδικασία. Αρχικά, η μέτρηση των συγκεντρώσεων ραδονίου μπορεί να γίνει με δύο βασικούς τρόπους: παθητική ανίχνευση και ενεργητική ανίχνευση. Κατά την παθητική ανίχνευση, παθητικές συσκευές, όπως ανιχνευτές σωματιδίων α χρησιμοποιούνται συχνά για μακροπρόθεσμες μετρήσεις ραδονίου. Αυτές οι συσκευές τοποθετούνται σε εσωτερικό χώρο για ένα εκτεταμένο χρονικό διάστημα, συνήθως τρεις μήνες, για να καταγράψουν τα επίπεδα ραδονίου. Κατά την ενεργητική ανίχνευση ραδονίου, ενεργητικές συσκευές, όπως συνεχείς ανιχνευτές ραδονίου, παρέχουν σε πραγματικό χρόνο βραχυπρόθεσμες μετρήσεις των συγκεντρώσεων ραδονίου. Αυτοί οι ανιχνευτές χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους ανίχνευσης για να αξιολογήσουν στιγμιαία τα επίπεδα ραδονίου.

Στη συνέχεια, οι συσκευές μέτρησης πρέπει να τοποθετούνται σε σημεία με δυνητικά υψηλή συγκέντρωση ραδονίου, όπως υπόγεια ή χώρους κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι συσκευές πρέπει να τοποθετούνται σε ύψος αναπνοής σε συχνά κατειλημμένους χώρους για να αξιολογηθεί με ακρίβεια η ανθρώπινη έκθεση.

Η βαθμονόμηση, η επαναληψιμότητα των μετρήσεων και η διασφάλιση ποιότητας των συσκευών μέτρησης είναι ουσιώδεις για την εξασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων με υψηλή ακρίβεια. Η βαθμονόμηση πρέπει να πραγματοποιείται σύμφωνα με αναγνωρισμένα πρότυπα, να ελέγχεται και να επαληθεύεται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Μέτρα διασφάλισης ποιότητας, συμπεριλαμβανομένων των διπλών μετρήσεων και των μετρήσεων ελέγχου σε ουδέτερες περιοχές, βοηθούν στην διασφάλιση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των μετρήσεων.

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τις μετρήσεις αναλύονται και συγκρίνονται με καθορισμένα επίπεδα δράσης. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το annual effective dose, το οποίο είναι μια μέτρηση του συνολικού κινδύνου για την υγεία που σχετίζεται με την έκθεση στο ραδόνιο. Το annual effective dose μετριέται σε sieverts (Sv) ή millisieverts (mSv).

Για τον υπολογισμό του annual effective dose, πολλαπλασιάζεται ο κατάλληλος συντελεστής με την συγκέντρωση ραδονίου και τον χρόνο έκθεσης. Ο συντελεστής εξαρτάται από την πρόσληψη ραδονίου του ατόμου, ανάλογα με το βάρος του, τον τύπο

δραστηριότητας που εκτελεί στον χώρο, τον ρυθμό αναπνοής του και τον ρυθμό ανανέωσης του αέρα στον χώρο και βασίζεται σε επιδημιολογικά στοιχεία. Για τους περισσότερους εσωτερικούς χώρους, ο συντελεστής αντιστοιχεί σε $6,7 \times 10^{-6} \text{ mSv} / \text{Bq h m}^{-3}$.

Παράδειγμα υπολογισμού annual effective dose:

$$6.7 \times 10^{-6} \text{ mSv} / \text{Bq h m}^{-3} \times 300 \text{ Bq m}^{-3} \times 2000 \text{ h} = 4 \text{ mSv}$$

Τέλος, αν οι συγκεντρώσεις ραδονίου υπερβαίνουν τα καθορισμένα επίπεδα, εφαρμόζονται πρωτόκολλα για τη μείωση των κινδύνων έκθεσης. Οι δράσεις πρέπει να εστιάζονται στην εξάλειψη ή τη μείωση της πηγής του ραδονίου και στην αύξηση του αερισμού σε εσωτερικούς χώρους για τη μείωση της έκθεσης των ανθρώπων (ICRP, 2018).

3.3 Περιοριστικά Μέτρα και Μέσα Ατομικής Προστασίας

Το ευρωπαϊκό σχέδιο καταπολέμησης του καρκίνου (Europe's Beating Cancer Plan) υποστηρίζει τα κράτη μέλη στην εφαρμογή των απαιτήσεων για την προστασία από την ιονίζουσα ακτινοβολία, ιδιαίτερα το ραδόνιο, που προκαλεί σημαντικό αριθμό καρκίνων του πνεύμονα. Ένα από τα 12 μηνύματα του Ευρωπαϊκού Κώδικα κατά του Καρκίνου (European Code against Cancer) αναφέρει στους πολίτες: «Μάθετε εάν εκτίθεστε σε ακτινοβολία από φυσικά υψηλά επίπεδα ραδονίου στο σπίτι σας. Λάβετε μέτρα για τη μείωση των υψηλών επιπέδων ραδονίου».

Η ανακατασκευή κτιρίων με γνώμονα την ενεργειακή απόδοση, όπως η αντικατάσταση παλαιών παραθύρων με ενεργειακά αποδοτικά διπλά τζάμια, η μόνωση τοίχων και οροφών ή η αντικατάσταση παλαιών θυρών με νεότερες που προσφέρουν καλύτερη σφράγιση, μπορεί να μειώσει τον αερισμό και να αυξήσει την αεροστεγανότητα των κτιρίων, αυξάνοντας έτσι τις συγκεντρώσεις σε εσωτερικούς χώρους σε περιοχές επιρρεπείς στο ραδόνιο (EEA, 2022). Υπάρχει πληθώρα ελεγμένων, ανθεκτικών, οικονομικών και αποδοτικών μεθόδων για την πρόληψη της ρύπανσης από ραδόνιο σε νέα κτίρια και την μείωση του ραδονίου σε ήδη υπάρχοντα (WHO, 2023a).

Η πρόληψη του ραδονίου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν κατασκευάζονται νέες κατασκευές, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις. Σε πολλές χώρες της Ευρώπης, καθώς και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και την Κίνα, προστατευτικά μέτρα σε νέα κτίρια περιλαμβάνονται στους οικοδομικούς κώδικες της εκάστοτε χώρας. Μερικοί συνηθισμένοι τρόποι μείωσης των επιπέδων ραδονίου σε υπάρχοντα κτίρια περιλαμβάνουν:

- i) Αύξηση του υποδαπέδιου αερισμού
- ii) Εγκατάσταση ενός συστήματος radon sump system στο υπόγειο ή κάτω από ένα συμπαγές δάπεδο. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με τη δημιουργία μιας ζώνης αρνητικής πίεσης κάτω από τα θεμέλια του κτιρίου, εμποδίζοντας τη διαρροή ραδονίου στο εσωτερικό περιβάλλον
- iii) Αποφυγή της διέλευσης ραδονίου από το υπόγειο σε χώρους διαβίωσης
- iv) Σφράγιση δαπέδων και τοίχων
- v) Βελτίωση του αερισμού του κτιρίου

Τα παθητικά συστήματα μείωσης επικινδυνότητας, όπως είναι το radon dump system, μπορούν να μειώσουν τα επίπεδα ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους περισσότερο από 50%. Ειδικότερα, όταν προστίθενται ανεμιστήρες για καλύτερο εξαερισμό, τα επίπεδα μπορούν να μειωθούν ακόμη περισσότερο. Το ραδόνιο εσωτερικού χώρου είναι ένας παράγοντας κινδύνου που μπορεί να προληφθεί και να αντιμετωπιστεί μέσω αποτελεσματικών εθνικών πολιτικών και κανονισμών (WHO, 2023a).

Το εγχειρίδιο του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας για το ραδόνιο εσωτερικών χώρων: «Μια προοπτική δημόσιας υγείας» παρέχει προτάσεις πολιτικών μείωσης των κινδύνων για την υγεία από την έκθεση στο ραδόνιο σε κατοικίες μέσω:

- i) Της παροχής πληροφοριών σχετικά με τα επίπεδα ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους και τους σχετικούς κινδύνους για την υγεία
- ii) Της εφαρμογής ενός εθνικού προγράμματος για το ραδόνιο με στόχο τη μείωση τόσο του συνολικού κινδύνου για τον πληθυσμό όσο και του ατομικού κινδύνου για τα άτομα που ζουν σε περιβάλλοντα με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου
- iii) Του καθορισμού ενός εθνικού μέσου ετήσιου επιπέδου αναφοράς συγκέντρωσης ραδονίου σε κατοικίες στα 100 Bq/m^3 , αλλά εάν το επίπεδο αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί υπό τις επικρατούσες ειδικές συνθήκες της χώρας, το επίπεδο αναφοράς να μην υπερβαίνει τα $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
- iv) Της ανάπτυξης πρωτοκόλλων μέτρησης ραδονίου για την διασφάλιση της ποιότητας και της συνέπειας των μετρήσεων ραδονίου
- v) Της εφαρμογής της πρόληψης ραδονίου στους οικοδομικούς κώδικες για τη μείωση των επιπέδων ραδονίου στα υπό κατασκευή κτίρια, καθώς και μέσω προγραμμάτων για να διασφαλιστεί ότι τα επίπεδα είναι κάτω από τα εθνικά επίπεδα αναφοράς
- vi) Της προώθησης της εκπαίδευσης των επαγγελματιών του τομέα των κατασκευών και της παροχής οικονομικής στήριξης για την απομάκρυνση του ραδονίου από υφιστάμενα κτίρια
- vii) Της εξέτασης της συμπερίληψης του ραδονίου ως παράγοντα κινδύνου στις εθνικές στρατηγικές που αφορούν τον έλεγχο του καρκίνου, τον έλεγχο του καπνού, την ποιότητα του αέρα εσωτερικών χώρων, την μείωση κατανάλωσης ενέργειας και την ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων

Οι συστάσεις αυτές είναι σύμφωνες με τα Διεθνή Βασικά Πρότυπα Ασφάλειας (International Basic Safety Standards), τα οποία συνδιοργανώνονται από τον ΠΟΥ και άλλους διεθνείς οργανισμούς και υποστηρίζουν τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης

(2030 Agenda for Sustainable Development Goals - SDG) και συγκεκριμένα, τον στόχο 3.4 που αφορά τις μη μεταδοτικές ασθένειες (WHO, 2009).

Σύμφωνα με το US Department of Housing and Urban Development, τα Μέσα Ατομικής Προστασίας (ΜΑΠ) για την μείωση της εισπνοής ραδονίου από εργαζομένους σε χώρους με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου περιλαμβάνουν:

i) Αναπνευστικές συσκευές φιλτραρίσματος σωματιδίων, οι οποίες μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της εισπνοής ραδονίου και άλλων ραδιενεργών σωματιδίων που έχουν συγκεντρωθεί σε αιωρούμενα σωματίδια σκόνης στο περιβάλλον εργασίας.

ii) ΜΑΠ που χρησιμοποιούνται για την προστασία των εργαζομένων από άλλους ρύπους αέρα εσωτερικών χώρων, τα οποία συνήθως είναι επαρκή για την μείωση της έκθεσης στο ραδόνιο, ιδίως όταν οι εν λόγω ρύποι προκαλούν επίσης ανησυχία λόγω της έκθεσης μέσω εισπνοής. Τα ΜΑΠ που προστατεύουν επαρκώς από την αερομεταφερόμενη σκόνη αμιάντου ή πυριτίου, για παράδειγμα, είναι πιθανό να προστατεύουν και από την εισπνοή ραδιενεργών σωματιδίων. Η χρήση αναπνευστικής συσκευής φιλτραρίσματος σωματιδίων, κατάλληλης για άλλους εναέριους ρύπους μπορεί να συμβάλει στην προστασία του εργαζομένου από την εισπνοή ραδιενεργών σωματιδίων ραδονίου. Δεν συνιστάται η χρήση ΜΑΠ από άλλες ομάδες ανθρώπων, όπως κάτοικοι σπιτιών με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου ή επιβατικό κοινό υπογείων σιδηροδρομικών δικτύων (US Department of Housing and Urban Development, 2015).

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

Για την πραγματοποίηση της βιβλιογραφικής αναζήτησης των συγκεντρώσεων ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα, με την μέθοδο της συστηματικής ανασκόπησης, τέθηκαν τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

Ερευνητικό Ερώτημα 1: Ποιες είναι οι τιμές των συγκεντρώσεων ραδονίου στους χώρους των υπόγειων σιδηροδρομικών δικτύων ανά τον κόσμο;

Ερευνητικό Ερώτημα 2: Τηρούνται ή υπερβαίνονται τα επιτρεπτά όρια, όπως αυτά ορίζονται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO) και την Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP);

Ερευνητικό Ερώτημα 3: Ποιοι παράγοντες φαίνεται να επηρεάζουν την συγκέντρωση ραδονίου στους χώρους των υπογείων σιδηροδρομικών συστημάτων;

Ερευνητικό Ερώτημα 4: Ποια μέτρα αντιμετώπισης των υψηλών συγκεντρώσεων ραδονίου στα υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα προτείνονται;

Η ανασκόπηση πραγματοποιήθηκε με την αναζήτηση άρθρων στην βάση δεδομένων Scopus, η οποία επιλέχθηκε λόγω της περιεκτικότητάς της σε άρθρα από αξιόλογα επιστημονικά περιοδικά με κριτές (peer-reviewed), υψηλής απήχησης και ποικίλων ερευνητικών πεδίων, γεγονός το οποίο συνάδει με την διεπιστημονικότητα του συγκεκριμένου θέματος.

Αναζητήθηκαν άρθρα που είχαν δημοσιευτεί τα έτη 2009-2024, με σκοπό να καλυφθεί μεγάλο εύρος της βιβλιογραφίας, χωρίς όμως να συμπεριληφθούν μετρήσεις οι οποίες δεν ανταποκρίνονται πια στην πραγματικότητα λόγω α) παλαιότητας και αναξιοπιστίας των οργάνων μέτρησης, β) μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών και γ) εργασιών ανάπλασης στις δομές των υπογείων σιδηροδρόμων.

Οι λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: radon, metro, subway, underground rail και underground railway. Το query που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ακόλουθο: ALL (radon AND (metro OR "underground rail" OR subway OR "underground railway")) AND PUBYEAR > 2008 AND PUBYEAR < 2025

Για την ανασκόπηση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος PRISMA (PRISMA, 2020) και συμπληρώθηκε το αντίστοιχο checklist και διάγραμμα ροής.

Κριτήρια Ένταξης:

Τα άρθρα τα οποία συμπεριλήφθηκαν ήταν αυτά τα οποία:

- i) διερεύνησαν την ύπαρξη ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά συστήματα
- ii) περιλάμβαναν τιμές συγκεντρώσεων ραδονίου
- iii) η γλώσσα συγγραφής τους ήταν η αγγλική γλώσσα

Κριτήρια Αποκλεισμού:

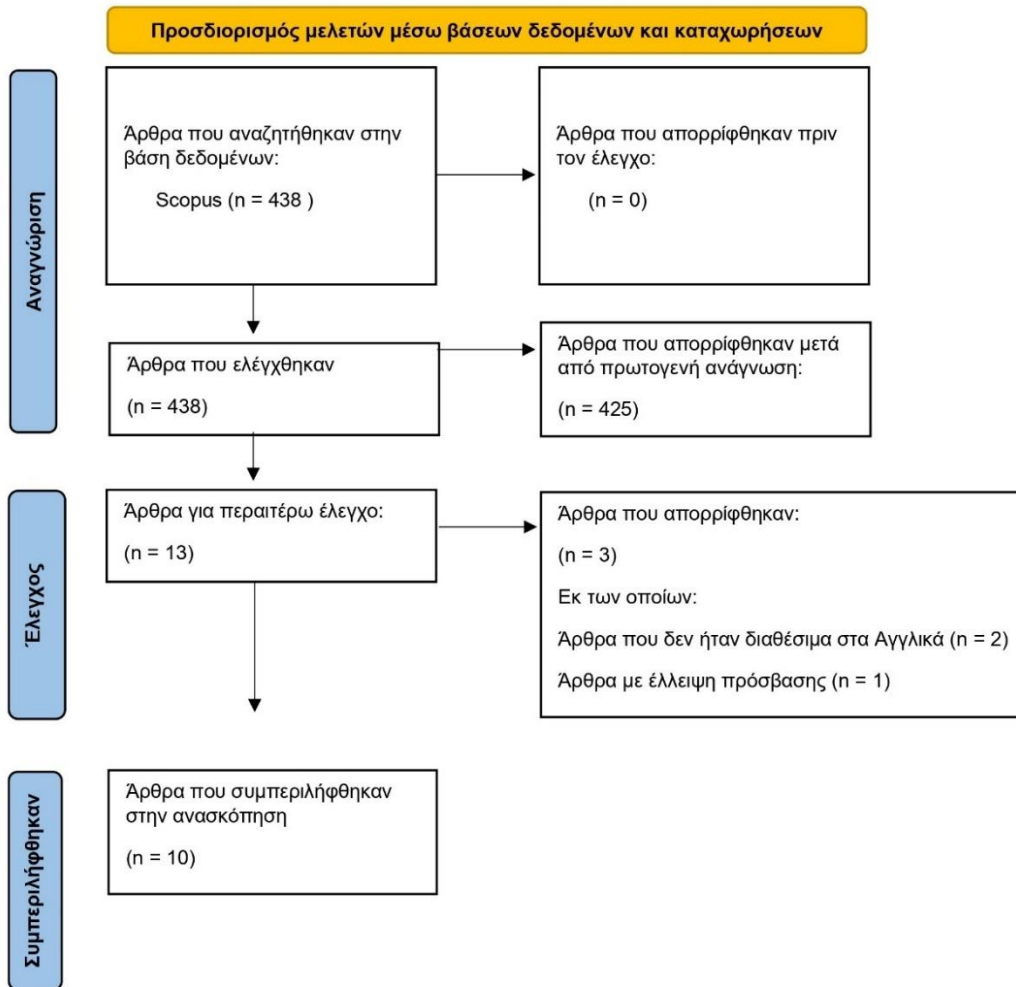
Τα άρθρα τα οποία αποκλείστηκαν ήταν αυτά τα οποία:

- i) δεν περιλάμβαναν τιμές συγκεντρώσεων ραδονίου
- ii) περιλάμβαναν τιμές συγκεντρώσεων ραδονίου σε εξωτερικούς χώρους ή εσωτερικούς χώρους εκτός των εγκαταστάσεων υπογείων σιδηροδρομικών δικτύων
- iii) η γλώσσα συγγραφής τους δεν ήταν η αγγλική γλώσσα

Αποτελέσματα Αναζήτησης:

Σύμφωνα με την αναζήτηση της βιβλιογραφίας, στην βάση δεδομένων εντοπίστηκαν συνολικά 438 άρθρα. Κανένα από αυτά δεν απορρίφθηκε πριν τον πρωταρχικό έλεγχο. Κατά την πρωτογενή ανάγνωση, ελέγχθηκαν τα 438 άρθρα από τον τίτλο και την περίληψη τους. Απορρίφθηκαν 425 άρθρα ως μη σχετικά, καθώς δεν πληρούσαν τα κριτήρια ένταξης και παρέμειναν 13 άρθρα. Από αυτά, τα 3 απορρίφθηκαν, καθώς δύο από αυτά δεν ήταν γραμμένα στην αγγλική γλώσσα, ενώ το πλήρες κείμενο ενός δεν ήταν προσβάσιμο στο κοινό. Τελικά, τα απαραίτητα κριτήρια πληρούσαν 10 άρθρα, τα οποία ελέγχθηκαν ως προς το πλήρες κείμενο τους. Στην Εικόνα 5 απεικονίζεται το Διάγραμμα Ροής-Flow Chart.

PRISMA 2020 flow diagram for new systematic reviews which included searches of databases and registers only



Εικόνα 5. Διάγραμμα ροής προσδιορισμού μελετών για την συστηματική ανασκόπηση

Κεφάλαιο 5. Ανάλυση δεδομένων και Αποτελέσματα

Ακολουθεί παρουσίαση των άρθρων τα οποία αναλύθηκαν κατά την συστηματική ανασκόπηση. Από το σύνολο των εντοπισμένων ερευνών, 5 πραγματοποιήθηκαν στην Νότια Κορέα, 1 στην Βραζιλία, 1 στην Τουρκία, 1 στην Ρουμανία, 1 στην Κίνα και 1 στην Ινδία.

5.1 Μεθοδολογία Ερευνών

Σημαντικά χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε από την εκάστοτε έρευνα παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Στοιχεία μεθοδολογίας ερευνών που συμπεριλήφθηκαν στην συστηματική ανασκόπηση

Συγγραφείς, Έτος Δημοσίευσης	Περιοχή Μελέτης	Δειγματοληψία Μετρήσεων	Διάρκεια Μετρήσεων	Αριθμός Επαναλήψε ων Μετρήσεων	Όργανο Μετρήσεων
Kim et al., 2022	Σεούλ, Νότια Κορέα	237 σταθμοί μετρό	3 μήνες	6	RADUET, Radosys Co., Ltd, Hungary
Tan et al., 2020	Πεκίνο, Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας	23 σταθμοί μετρό	24 ώρες	-	RAD-7 tester, DURRIDGE, USA
Yilmaz Alan et al., 2019	Κωνσταντινού πολη, Τουρκία	σύνολο σταθμών μετρό (71)	1 μήνας	-	Kodak films LR- 115 type II + AlphaGUARD Radon Monitor, Bertin Technologies, France

Hwang & Park, 2018	Νότια Κορέα	40 σταθμοί μετρό	48 ώρες	-	1027 Professional Continuous Radon Monitor, Sun Nuclear Corporation, USA
Hwang et. al., 2018	Σεούλ, Νότια Κορέα	100 σταθμοί μετρό	48 ώρες	-	RAD7, DurrIDGE Company Inc., USA
Deb et al., 2017	Καλκούτα, Ινδία	14 σταθμοί μετρό	10 λεπτά	≥ 5	AlphaGUARD PQ2000 PRO, Bertin Technologies, France
Yoshimura et al., 2016	Σάο Πάολο, Βραζιλία	15 σταθμοί μετρο	5 μήνες	-	LR-115 type II plastic track detector
Manea et al., 2011	Βουκουρέστι, Ρουμανία	8 σταθμοί μετρό	20 λεπτά	-	RAD 7 radon detector, DurrIDGE Company Inc., USA
Song et al., 2011	Σεούλ, Νότια Κορέα	16 σταθμοί μετρό	3 μήνες	3	RADUET, Radosys Co., Ltd, Hungary
Yoon et al., 2010	Νταεγιόν, Νότια Κορέα	σύνολο σταθμών μετρό (22)	3 μήνες	3	RadTrak, Landauer Inc., U.S.A.

Οι [Yilmaz Alan et al. \(2019\)](#) και οι [Yoon et al. \(2010\)](#) πραγματοποίησαν μετρήσεις συγκεντρώσεων ραδονίου σε όλους τους σταθμούς μετρό των περιοχών-στόχων, ενώ

στις υπόλοιπες περιπτώσεις οι μετρήσεις ήταν δειγματοληπτικές, επιλέγοντας έναν μικρότερο αριθμό σταθμών, από 8 μέχρι και 237 σταθμούς, προσαρμοσμένο στο πραγματικό πλήθος των σταθμών μετρό. Οι [Tan et al. \(2020\)](#) διενήργησαν μετρήσεις σε πολλαπλά σημεία εντός των σταθμών κατά την διάρκεια της κατασκευής νέας γραμμής του υπόγειου σιδηροδρόμου, με σκοπό την παρατήρηση τυχόν διακυμάνσεων στην συγκέντρωση του ραδονίου ανάμεσα στα στάδια κατασκευής τους. Οι μετρήσεις των [Yilmaz Alan et al. \(2019\)](#) πραγματοποιήθηκαν σε γραφεία, εκδοτήρια εισιτηρίων, πλατφόρμες και δωμάτια οδηγών. Οι [Hwang & Park \(2018\)](#) κατέγραψαν τις συγκεντρώσεις ραδονίου σε πλατφόρμες, δωμάτια αναμονής και διαδρόμους εντός των σταθμών. Οι μετρήσεις των [Yoshimura et al. \(2016\)](#) έγιναν αποκλειστικά σε γραφεία εργαζομένων εντός των υπογείων σταθμών μετρό. Οι [Song et al. \(2011\)](#) μέτρησαν τις συγκεντρώσεις ραδονίου στις εγκαταστάσεις της αστυνομίας εντός των σταθμών του υπογείου σιδηροδρόμου, ενώ οι [Yoon et al. \(2010\)](#) σε εκδοτήρια εισιτηρίων, χώρους επικύρωσης εισιτηρίων και πλατφόρμες.

Διαφορές εντοπίστηκαν στην διάρκεια των μετρήσεων και τον αριθμό επαναλήψεών τους, καθώς και στον μετρητή ο οποίος χρησιμοποιήθηκε. Οι [Kim et al. \(2022\)](#) πραγματοποίησαν μετρήσεις διάρκειας 3 μηνών, με 6 επαναλήψεις, χρησιμοποιώντας τον μετρητή RADUET (Radosys Co., Ltd, Hungary), ενώ οι [Tan et al. \(2020\)](#) πραγματοποίησαν μετρήσεις διάρκειας μόλις 24 συνεχόμενων ωρών, με την χρήση του RAD-7 tester (DURRIDGE, USA). Οι καταγραφές των [Yilmaz Alan et al. \(2019\)](#) διενεργήθηκαν επί ένα μήνα, με την χρήση δύο ειδών μετρητών: των Kodak films LR-115 type II και του AlphaGUARD Radon Monitor (Bertin Technologies, France). Οι μετρήσεις των [Hwang & Park \(2018\)](#) και των [Hwang et. al \(2018\)](#) διήρκησαν 48 ώρες και αξιοποίησαν τους μετρητές 1027 Professional Continuous Radon Monitor (Sun Nuclear Corporation, USA) και RAD7 (DurrIDGE Company Inc., USA), αντίστοιχα. Οι [Deb et al. \(2017\)](#) πραγματοποίησαν μετρήσεις των 10 λεπτών, με τουλάχιστον 5 επαναλήψεις ανά σημείο, χρησιμοποιώντας τον μετρητή ραδονίου AlphaGUARD PQ2000 PRO (Bertin Technologies, France). Οι [Yoshimura et al. \(2016\)](#) κατέγραψαν τις συγκεντρώσεις ραδονίου επί 5 μήνες μέσω ανιχνευτών LR-115 type II plastic track detector. Οι [Manea et al. \(2011\)](#) πραγματοποίησαν μετρήσεις των 20 λεπτών με τον μετρητή RAD 7 radon detector (DurrIDGE Company Inc., USA). Οι μετρήσεις συγκεντρώσεων ραδονίου των [Song et al. \(2011\)](#) και των [Yoon et al. \(2010\)](#) διήρκησαν 3 συνεχόμενους μήνες, με 3 επαναλήψεις, χρησιμοποιώντας τους ανιχνευτές RADUET (Radosys Co., Ltd, Hungary) και RadTrak (Landauer Inc., U.S.A.), αντίστοιχα.

5.2 Αποτελέσματα συγκεντρώσεων ραδονίου

Στον Πίνακα 2 αναφέρονται οι συγκεντρώσεις ραδονίου εσωτερικού αέρα των υπογείων σιδηροδρομικών δικτύων που αναλύθηκαν.

Πίνακας 2. Μετρήσεις συγκεντρώσεων ραδονίου σε έρευνες που συμπεριλήφθηκαν στην συστηματική ανασκόπηση

Συγγραφείς, Έτος Δημοσίευσης	Περιοχή Μελέτης	Μέση συγκεντρωση Rn	Ελάχιστη συγκέντρωση Rn	Μέγιστη συγκέντρωση Rn
Kim et al., 2022	Σεούλ, Νότια Κορέα	28.6 Bq*m ⁻³	9.0 Bq*m ⁻³	85.3 Bq*m ⁻³
Tan et al., 2020	Πεκίνο, Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας	84.8 Bq*m ⁻³	5.9 Bq*m ⁻³	486.2 Bq*m ⁻³
Yilmaz Alan et al., 2019	Κωνσταντινούπ ολη, Τουρκία	114.6 Bq*m ⁻³	39.5 Bq*m ⁻³	382.0 Bq*m ⁻³
Hwang & Park, 2018	Νότια Κορέα	40.7 Bq*m ⁻³	11.1 Bq*m ⁻³	85.1 Bq*m ⁻³
Hwang et. al, 2018	Σεούλ, Νότια Κορέα	25.8 ± 13.9 Bq*m ⁻³	5.5 Bq*m ⁻³	85.0 Bq*m ⁻³
Deb et al., 2017	Καλκούτα, Ινδία	23.05 ± 2.59 Bq*m ⁻³	13.5 ± 1.78 Bq*m ⁻³	47.5 ± 7.19 Bq*m ⁻³
Yoshimura et al., 2016	Σάο Πάολο, Βραζιλία	805 Bq*m ⁻³	-	-
Manea et al., 2011	Βουκουρέστι, Ρουμανία	35.0 Bq*m ⁻³	22.0 Bq*m ⁻³	53.0 Bq*m ⁻³

Song et al., 2011	Σεούλ, Νότια Κορέα	48.6 Bq*m ⁻³	18.9±2.2 Bq*m ⁻³	114±23 Bq*m ⁻³
Yoon et al., 2010	Νταεγιόν, Νότια Κορέα	34.1 ± 14.7 Bq*m ⁻³	9.4 Bq*m ⁻³	98.2 Bq*m ⁻³

Η μέση συγκέντρωση ραδονίου στους χώρους των υπογείων σιδηροδρομικών συστημάτων των περισσότερων μελετών είναι εντός του προτεινόμενου ορίου των 300 Bq*m⁻³, που ορίζουν ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO, 2009) και η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP, 2018). Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η έρευνα των Yoshimura et al. (2016) στο Σάο Πάολο, η οποία αναφέρει μέση συγκέντρωση ραδονίου ίση με 805 Bq*m⁻³, η οποία ξεπερνά σημαντικά το ανώτατο όριο.

Οι μέγιστες συγκεντρώσεις ραδονίου των χώρων των υπογείων σιδηροδρομικών συστημάτων αποτυπώνουν μεμονωμένες μετρήσεις και ενδέχεται να αντικατοπτρίζουν ακραίες τιμές. Η μέγιστη συγκέντρωση ραδονίου που κατέγραψαν οι Tan et al. (2020) στο Πεκίνο και οι Yilmaz Alan et al. (2019) στην Κωνσταντινούπολη, στα 486.2 Bq*m⁻³ και στα 382.0 Bq*m⁻³ αντίστοιχα, ξεπερνούν το προτεινόμενο όριο των 300 Bq*m⁻³.

5.3 Αποτελέσματα έκθεσης σε ραδόνιο

Στον Πίνακα 3 αποτυπώνονται το annual effective dose και το hazard quotient (HQ) από ραδόνιο υπαλλήλων και επιβατών των υπογείων σιδηροδρομικών δικτύων. Στον Πίνακα 3 αναγράφονται μόνο τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα στα ανακτημένα άρθρα, καθώς οι δείκτες αυτοί δεν έχουν υπολογιστεί σε όλες τις μελέτες.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα έκθεσης σε ραδόνιο ερευνών που συμπεριλήφθηκαν στην συστηματική ανασκόπηση

Συγγραφείς, Έτος Δημοσίευσης	Περιοχή Μελέτης	Annual effective dose (επιβατών)	Annual effective dose (υπαλλήλων)	Hazard quotient (επιβατών)
Kim et al., 2022	Σεούλ, Νότια Κορέα	-	-	-
Tan et al., 2020	Πεκίνο, Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας	-	0.65 mSv	-
Yilmaz Alan et al., 2019	Κωνσταντινούπολη, Τουρκία	0.035 - 0.34 mSv	0.12 - 2.75 mSv	-
Hwang & Park, 2018	Νότια Κορέα	-	-	0.53 Bq/kg/day
Hwang et. al, 2018	Σεούλ, Νότια Κορέα	-	-	-
Deb et al., 2017	Καλκούτα, Ινδία	-	-	-
Yoshimura et al., 2016	Σάο Πάολο, Βραζιλία	-	-	-
Manea et al., 2011	Βουκουρέστι, Ρουμανία	-	-	-
Song et al., 2011	Σεούλ, Νότια Κορέα	-	0.41 - 1.64 mSv	-

Yoon et al., 2010	Νταεγιόν, Νότια Κορέα	0.02 mSv	0.24 mSv	-
-------------------	--------------------------	----------	----------	---

Οι [Tan et al. \(2020\)](#) και οι [Song et al. \(2011\)](#) υπολόγισαν το annual effective dose των υπαλλήλων του μετρό, αλλά όχι αυτό των επιβατών. Οι [Yilmaz Alan et al. \(2019\)](#) και οι [Yoon et al. \(2010\)](#) υπολόγισαν το annual effective dose των υπαλλήλων και των επιβατών. Και στις δύο περιπτώσεις η έκθεση των επιβατών ήταν μικρότερη από αυτή των εργαζομένων. Όλες οι τιμές του annual effective dose βρίσκονταν εντός του ορίου των 4 mSv, που έχει οριστεί από την Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας ([ICRP, 2018](#)).

Οι [Hwang & Park \(2018\)](#) υπολόγισαν το hazard quotient των επιβατών και όχι αυτό των υπαλλήλων. Ο δείκτης του hazard quotient είναι μικρότερος του 1, υποδεικνύοντας μικρό κίνδυνο καρκινογένεσης οφειλόμενο στην έκθεση σε ραδόνιο στους χώρους του μετρό ([El-Araby et al., 2021](#)).

Κεφάλαιο 6. Συζήτηση και Συμπεράσματα

6.1 Συζήτηση

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για την μέτρηση των συγκεντρώσεων ραδονίου στα υπόγεια σιδηροδρομικά συστήματα είναι υψηλό. Τα υπόγεια μέσα μεταφοράς, όπως τα μετρό, αποτελούν σημαντικό μέρος της καθημερινής ζωής για εκατομμύρια ανθρώπους σε πόλεις παγκοσμίως. Η αστικοποίηση, η πυκνοκατοίκηση των ανθρώπων και η περιορισμένη αεριζόμενη επιφάνεια στα υπόγεια μέσα μεταφοράς μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένα επίπεδα ραδονίου, το οποίο αποτελεί έναν από τους κύριους φυσικούς παράγοντες έκθεσης στην ιοντίζουσα ακτινοβολία. Η μέτρηση των συγκεντρώσεων ραδονίου στα υπόγεια συστήματα μετρό επιτρέπει την αξιολόγηση του επιπέδου έκθεσης των επιβατών και των εργαζομένων σε αυτό το περιβάλλον και την ανάλυση των πιθανών πηγών του ραδονίου. Αυτό είναι κρίσιμο για τη λήψη μέτρων πρόληψης με στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας και της ασφάλειας των πολιτών, καθώς και για την ενίσχυση της κατανόησης της επίδρασης του ραδονίου στο ανθρώπινο περιβάλλον (Hwang et al., 2018).

Αρκετές διαφορές παρατηρούνται στην μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε από τις μελέτες, με κυριότερες αυτές των οργάνων μέτρησης, των σημείων δειγματοληψίας, των αριθμών δειγμάτων, της διάρκειας των μετρήσεων και των αριθμών επαναλήψεων των μετρήσεων, όπως αποτυπώθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Η χρήση του σωστού ανιχνευτή ραδονίου μπορεί να βελτιώσει σημαντικά μια μελέτη. Καταρχάς, εξασφαλίζει την ακρίβεια και επαναληψιμότητα των μετρήσεων, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο σφαλμάτων και αποκλίσεων, τα οποία είναι καίρια για την αξιοπιστία των δεδομένων και των συμπερασμάτων της μελέτης. Δεύτερον, η χρήση του κατάλληλου ανιχνευτή ραδονίου επιτρέπει τη συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων και βελτιώνει την επιστημονική αξιοπιστία της μελέτης. Έτσι, εξασφαλίζεται η συνοχή και η αξιοπιστία των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τη συνολική ανάλυση (WHO, 2009).

Στην μελέτη των Yilmaz Alan et al. (2019) χρησιμοποιήθηκαν δύο μετρητές ραδονίου για την καταγραφή της συγκέντρωσής του. Ο κύριος στόχος ήταν να προσδιοριστεί το επίπεδο ραδονίου με τη χρήση των ανιχνευτών LR-115. Οι μετρήσεις του ανιχνευτή AlphaGUARD μπορούσαν να ληφθούν μόνο για 10 λεπτά και επειδή η περίοδος αυτή είναι τόσο μικρή, είναι εμφανές από τα αποτελέσματα ότι δεν είναι δυνατή η σύγκριση των δύο αυτών μετρήσεων. Για τα αποτελέσματα της μελέτης και τον υπολογισμό του

annual effective dose χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις των ανιχνευτών LR-115. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των μελετών επηρεάζεται σημαντικά από τα όργανα μέτρησης και την σωστή χρήση αυτών.

Η μέτρηση των συγκεντρώσεων ραδονίου σε διαφορετικές περιοχές ενός κτιρίου επηρεάζει σημαντικά μια μελέτη. Αρχικά αυτό μπορεί να αποκαλύψει τυχόν ανισότητες στα επίπεδα ραδονίου μεταξύ διαφορετικών χώρων εντός των σταθμών του μετρώ, προσδίδοντας πρόσθετες πληροφορίες για τη διασπορά και τις πηγές του ραδονίου στον εσωτερικό αέρα. Επιπρόσθετα η μέτρηση σε διαφορετικές περιοχές μπορεί να αποκαλύψει πιθανές πηγές ραδονίου, όπως έδαφος, νερό ή υλικά κατασκευής, που επηρεάζουν την εσωτερική ποιότητα του αέρα. Επιπλέον, η σύγκριση των επιπέδων ραδονίου μεταξύ διαφορετικών περιοχών μπορεί να παρέχει στοιχεία για την αποτελεσματικότητα των μέτρων που λαμβάνονται για τη μείωση της έκθεσης στο ραδόνιο και την προστασία της υγείας των υπαλλήλων και των επιβατών. Συνολικά, η μέτρηση σε διαφορετικές περιοχές ενισχύει την κατανόηση του ραδονίου στο εσωτερικό περιβάλλον και την αποτελεσματικότητα των μέτρων που λαμβάνονται για τη διαχείρισή του (WHO, 2009).

Η σημασία της χρήσης του κατάλληλου μεγέθους δείγματος σε όλες τις μετρήσεις είναι ζωτικής σημασίας για την αξιοπιστία και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η χρήση ανεπαρκούς δείγματος μπορεί να οδηγήσει σε μη αντιπροσωπευτικές μετρήσεις και να επηρεάσει αρνητικά την ερμηνεία των δεδομένων. Αντίθετα, η χρήση υπερβολικά μεγάλου δείγματος μπορεί να είναι περιττή και να αυξήσει το κόστος και τον χρόνο που απαιτείται για τη μελέτη. Επομένως, η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους δείγματος είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της εγκυρότητας και της ακρίβειας των μετρήσεων, καθώς και για την αποφυγή περιττών ή ανεπαρκών πόρων που μπορεί να συνεπάγονται. Φυσικά, η μελέτη της συγκέντρωσης ραδονίου σε όλους τους σταθμούς των υπογείων σιδηροδρομικών συστημάτων, προσφέρει και πιο ακριβή αποτελέσματα (WHO, 2009).

Οι διαφορές στη διάρκεια και την επανάληψη των διαφορετικών μελετών σχετικά με τις συγκεντρώσεις ραδονίου υπόγεια αντικατοπτρίζουν την ποικιλία στις προσεγγίσεις και τους στόχους των ερευνών. Ορισμένες μελέτες πραγματοποιούνται σε μικρά χρονικά διαστήματα, ενώ άλλες διεξάγονται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα προκειμένου να κατανοηθούν οι μακροπρόθεσμες τάσεις. Επιπλέον, η επανάληψη των μετρήσεων μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το επίπεδο ενδιαφέροντος και τις ανάγκες της μελέτης. Ορισμένες μελέτες επιδιώκουν πιο συχνές μετρήσεις για την παρακολούθηση των αλλαγών στον χρόνο, ενώ άλλες εστιάζουν σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις για την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης έκθεσης σε ραδόνιο.

Διαφορές παρουσιάζονται επίσης στον τρόπο ανάλυσης των αποτελεσμάτων των ερευνών που αναλύθηκαν. Το γεγονός αυτό μπορεί ενδεχομένως να αποδοθεί στον

διαφορετικό σκοπό των ερευνών. Οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τους Kim et al. (2022), Tan et al. (2020), Yilmaz Alan et al. (2019), Song et al. (2011) και Yoon et al. (2010) εστίαζαν αποκλειστικά στην μέτρηση των συγκεντρώσεων ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά συστήματα, οι έρευνες που πραγματοποιήθηκαν από τους Deb et al. (2017), Yoshimura et al. (2016) και Manea et al. (2011) στόχευαν στην μέτρηση των συγκεντρώσεων ραδονίου τόσο σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα, όσο και σε άλλους χώρους (όπως υπόγεια κατοικιών), η έρευνα των Hwang et. al (2018), εστίασε στην μέτρηση των συγκεντρώσεων ραδονίου, αλλά και άλλων ρύπων, όπως τα οξειδία του αζώτου (NO_x) σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα, ενώ οι Hwang & Park (2018) κατέγραψαν τις συγκεντρώσεις ραδονίου, αλλά και άλλων ρύπων, όπως τα αιρούμενα σωματίδια με διάμετρο ως 10 μm (PM_{10}) τόσο σε σταθμούς μετρό, όσο και σε υπόγειους χώρους στάθμευσης.

Η μέθοδος αξιολόγησης των κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία διαφέρει επίσης από μελέτη σε μελέτη, με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη η συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων ερευνών. Οι περισσότεροι συγγραφείς αξιολόγησαν τους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία μέσω του υπολογισμού του annual effective dose, ενώ οι Hwang & Park (2018) πραγματοποίησαν την αξιολόγηση μέσω του υπολογισμού του Hazard Quotient. Το annual effective dose και το Hazard Quotient του ραδονίου είναι δύο μετρήσεις που δεν μπορούν να συγκριθούν, καθώς αξιολογούν διαφορετικές πτυχές αυτού του κινδύνου. Το annual effective dose αναφέρεται στην ακτινοβολία που λαμβάνει ένα άτομο κατά τη διάρκεια ενός έτους από την έκθεση στο αέριο ραδόνιο, ενώ το HQ αξιολογεί τον πιθανό κίνδυνο μη-καρκινογόνων επιπτώσεων (όπως αναπνευστικά προβλήματα) που συνδέονται με την έκθεση στο αέριο ραδόνιο (Lecomte et al., 2014).

Οι τιμές του annual effective dose των ερευνών που αναλύθηκαν παρουσιάζουν διαφορές, συγκεκριμένα:

- i) Οι συγκεντρώσεις αερίου ραδονίου διαφέρουν ανάμεσα στις διαφορετικές περιοχές.
- ii) Κάθε επιστημονική ομάδα χρησιμοποίησε διαφορετικό δείκτη μάζας σώματος των ατόμων που εκτίθενται στο ραδόνιο, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της ποικιλομορφίας του μέσου βάρους ανά τις χώρες.
- iii) Ο μέσος χρόνος έκθεσης των ατόμων στο ραδόνιο δεν ήταν ο ίδιος, καθώς οι ερευνητές υπολόγισαν διαφορετικό χρόνο παραμονής στους χώρους του κάθε υπόγειου σιδηροδρομικού συστήματος.
- iv) Διαφορετικοί πληθυσμοί στόχοι ορίστηκαν από τους συγγραφείς των άρθρων. Ορισμένοι υπολόγισαν το annual effective dose των επιβατών, ενώ άλλοι υπολόγισαν το annual effective dose των εργαζομένων στους χώρους των μετρό, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερο χρόνο έκθεσης.

Οι Hwang et. al (2018) και οι Yoon et al. (2010) παρατήρησαν διακύμανση στη συγκέντρωση ραδονίου εντός των σταθμών, την οποία συνέδεσαν με τις εποχές του χρόνου, χωρίς όμως τα συμπεράσματά τους να συμπίπτουν εμφανώς. Σύμφωνα με τους Hwang et. al (2018), τα επίπεδα ραδονίου στο μετρό της Σεούλ διέφεραν σημαντικά μεταξύ των μηνών. Το υψηλότερο επίπεδο καταγράφηκε τον Μάιο, ακολουθούμενο από τον Ιούνιο, τον Σεπτέμβριο, τον Ιούλιο και τον Αύγουστο με φθίνουσα σειρά. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τους χειμερινούς μήνες, ενώ οι συγγραφείς αναφέρουν πως για τα βόρειες χώρες, το επίπεδο ραδονίου είναι συνήθως υψηλότερο το χειμώνα και χαμηλότερο το καλοκαίρι. Η έρευνα των Yoon et al. (2010) στη Νταεγιόν της Νότιας Κορέας επιβεβαιώνει πως κατέγραψε λίγο υψηλότερες συγκεντρώσεις το φθινόπωρο και τον χειμώνα από τις άλλες εποχές. Την παρατήρηση αυτή αποδίδουν στις διαφορές του ρυθμού ανανέωσης μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού αέρα ανά εποχή, οι οποίες οφείλονται στο πρόγραμμα εξαερισμού των σταθμών ανάλογα με τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, οι διαφορές μπορούν να αγνοηθούν επειδή ήταν μικρές.

Οι Kim et al. (2022), Hwang & Park (2018), Hwang et. al (2018), Deb et al. (2017), Manea et al. (2011) και Yoon et al. (2010) αποδίδουν εν μέρη τις υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου στα υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα στην σύσταση του εδάφους και των πετρωμάτων της περιοχής. Οι περιοχές με εδάφη ή πετρώματα που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις φυσικών ραδιενεργών ουσιών είναι πιθανό να έχουν υψηλότερα επίπεδα ραδονίου. Ως εκ τούτου, η γνώση των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής μπορεί να είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση και τον έλεγχο των επιπέδων ραδονίου στα υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα. Οι σταθμοί του μετρό που βρίσκονται μέσα σε γρανιτικό υπόβαθρο παρουσιάζουν σχετικά υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου. Όχι μόνο η θεμελίωση μιας υπόγειας εγκατάστασης, αλλά και η φύση του εδάφους και των πετρωμάτων στην περιοχή συμβάλλουν στον καθορισμό της πιθανότητας συσσώρευσης επικίνδυνων επιπέδων αερίου ραδονίου στο εσωτερικό της (Kim et al., 2022). Η Σεούλ βρίσκεται σε γρανιτικό υπόβαθρο, με υψηλότερες συγκεντρώσεις ουρανίου και ραδονίου από άλλες περιοχές της Νότιας Κορέας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της συγκέντρωσης ραδονίου στους σταθμούς μετρό της Σεούλ, υποστηρίζουν την παραδοχή ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να υπάρχουν υψηλά επίπεδα ραδονίου σε υπόγειες πλατφόρμες σταθμών που εδρεύουν σε περιοχές με γρανίτη σε σύγκριση με εκείνες που εδρεύουν σε περιοχές χωρίς γρανίτη (Hwang & Park, 2018). Κατά την μελέτη των Yoon et al. (2010) στην Νταεγιόν οι συγκεντρώσεις ραδονίου αναμενόταν να είναι υψηλές επειδή οι περισσότεροι σταθμοί που μελετήθηκαν βρίσκονται σε περιοχές με γρανίτη και αποθέσεις αργίλου. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις δεν ήταν τόσο υψηλές όσο ήταν αναμενόμενο, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα παρόμοιων ερευνών.

Η υπόγεια εκπομπή ραδονίου δεν ελέγχεται μόνο από τη λιθολογία και τη σχετική περιεκτικότητα των πετρωμάτων και του εδάφους της περιοχής σε ραδόνιο και ουράνιο,

αλλά και από δομικούς παράγοντες που διευκολύνουν την εύκολη μετανάστευση του ραδονίου από τα βαθύτερα τμήματα του φλοιού της γης (Kim et al., 2022, Manea et al., 2011). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η κύρια πηγή ραδονίου σε υπόγειους χώρους μπορεί να είναι η εκπομπή ραδονίου από τα οικοδομικά υλικά και όχι το ραδόνιο του εδάφους που προέρχεται από το ίδιο το έδαφος (Deb et al., 2017). Τα επίπεδα ραδονίου που κατέγραψαν οι Hwang et. al (2018) είναι επίσης υψηλότερα για τους σταθμούς που κατασκευάστηκαν τη δεκαετία του 1980, γεγονός που ενδεχομένως να συνδέεται με τις προαναφερθείσες παρατηρήσεις.

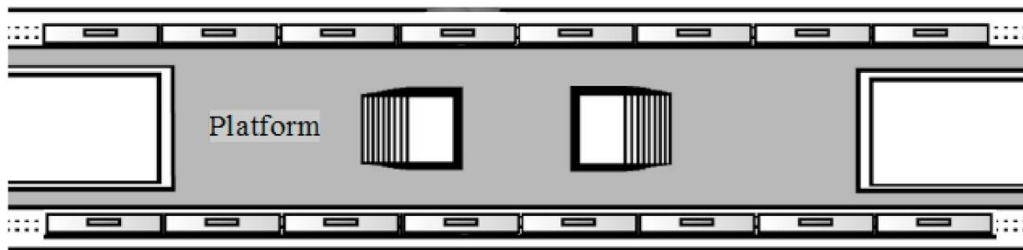
Σύμφωνα με τους των Tan et al. (2020) και Yilmaz Alan et al. (2019), όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος της εκσκαφής, τόσο μεγαλύτερη φαίνεται να είναι η συγκέντρωση ραδονίου. Οι Kim et al. (2022) επίσης αναφέρουν πως ο κίνδυνος υψηλής συγκέντρωσης εσωτερικού ραδονίου αυξάνεται όταν η υπόγεια εγκατάσταση κατασκευαστεί σε μεγάλο βάθος χωρίς κανένα μέτρο ελέγχου. Σύμφωνα με τους Hwang et. al (2018), τα επίπεδα ραδονίου στους σταθμούς μετρό αυξάνονται προοδευτικά σε βάθη από 8 έως 20 m.

Οι Hwang & Park (2018) τονίζουν πως ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη συγκέντρωση του ραδονίου είναι οι υψηλές θερμοκρασίες σε ξηρές περιοχές λόγω της αυξημένης ανάμιξης του εσωτερικού αέρα με τον αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον. Οι Tan et al. (2020) αναφέρουν πως η συγκέντρωση ραδονίου κατά την κατασκευή του σταθμού μετρό επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία και την κινητικότητα του αέρα, παρουσιάζοντας θετική συσχέτιση με την πρώτη και αντίστροφη συσχέτιση με τη δεύτερη. Ταυτόχρονα, η συγκέντρωση επηρεάζεται από παράγοντες όπως η υγρασία και η ατμοσφαιρική πίεση. Τα υψηλά επίπεδα υγρασίας μπορούν να αυξήσουν την υγρασία του εδάφους, η οποία με τη σειρά της μπορεί να επηρεάσει τη διαπερατότητα του εδάφους και την διάχυση του αερίου ραδονίου μέσω αυτού. Οι αλλαγές στην ατμοσφαιρική πίεση μπορεί να επηρεάσουν τις διαφορές πίεσης μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, επηρεάζοντας τη διείσδυση του αερίου ραδονίου στα κτίρια. Η υψηλότερη ατμοσφαιρική πίεση έξω από το κτίριο σε σχέση με την εσωτερική πίεση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη είσοδο ραδονίου, ενώ η χαμηλότερη ατμοσφαιρική πίεση έξω μπορεί να μειώσει τη είσοδο ραδονίου.

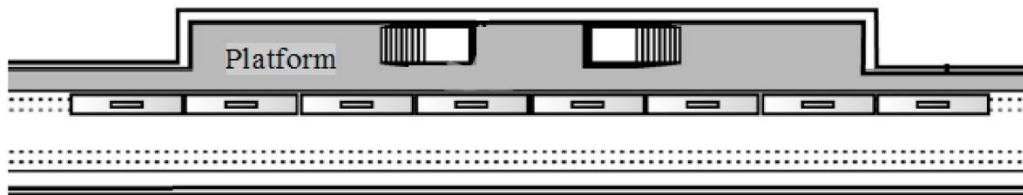
Ένας μεγάλος αριθμός άρθρων, όπως αυτά των Yoshimura et al. (2016), Yilmaz Alan et al. (2019), Manea et al. (2011) και Hwang et. al (2018) περιγράφουν την υπαιτιότητα του ανελλιπούς εξαερισμού και του χαμηλού ρυθμού ανανέωσης αέρα στην παρατήρηση υψηλών συγκεντρώσεων ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα.

Από τους Hwang et. al (2018) παρατηρήθηκε πως η μέση συγκέντρωση ραδονίου ήταν υψηλότερη στους σταθμούς με πλατφόρμες τύπου νησίδα (island type), όπου δηλαδή οι δίοδοι από τις οποίες διέρχονται οι συρμοί βρίσκονται εκατέρωθεν της πλατφόρμας. Αντιθέτως, στους σταθμούς με πλατφόρμες μονής κατεύθυνσης (one way type) και

διέλευση συρμών μόνο από την μία πλευρά της πλατφόρμας, η μέση συγκέντρωση ραδονίου είναι μικρότερη. Οι διαφορετικοί τύποι πλατφόρμας απεικονίζονται στην Εικόνα 6. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στην διαφορετική ροή του αέρα, ανάλογα με τον τύπο της αποβάθρας. Στην περίπτωση της πλατφόρμας τύπου νησίδα, συμπεραίνεται ότι το αέριο ραδόνιο εισέρχεται συχνά στις πλατφόρμες από τη σήραγγα ως αποτέλεσμα των τρένων που πλησιάζουν, όταν ανοίγουν οι πόρτες των σιδηροδρόμων και στις δύο πλευρές. Αντίθετα, μικρότερη εισροή αερίου ραδονίου στην πλατφόρμα παρατηρείται για τον τύπο πλατφόρμας μονής κατεύθυνσης, επειδή το άνοιγμα των πορτών γίνεται μόνο στη μία πλευρά.



(a) Island type



(b) One way type

Εικόνα 6. Κάτοψη πλατφόρμας τύπου νησίδα (a) και πλατφόρμας μονής κατεύθυνσης (b)

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των [Yilmaz Alan et al. \(2019\)](#), η πυκνότητα των επιβατών στους χώρους των υπόγειων σιδηροδρομικών δικτύων επηρεάζει επίσης την συγκέντρωση ραδονίου στους χώρους αυτούς, λόγω της συνεχούς παραγωγής θερμότητας και κίνησης του αέρα μέσω της αναπνοής, της εφίδρωσης και της σωματικής δραστηριότητας. Τα υψηλά επίπεδα πληρότητας του χώρου έχουν συνήθως ως αποτέλεσμα αυξημένη κυκλοφορία του εσωτερικού αέρα και ανταλλαγή με το εξωτερικό περιβάλλον, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την είσοδο ραδονίου. Η αυξημένη παρουσία επιβατών οδηγεί συχνά σε υψηλότερα επίπεδα εσωτερικών ρύπων και υγρασίας, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την μεταφορά του αέρα και κατά συνέπεια, την διασπορά του ραδονίου εντός του χώρου. Ως εκ τούτου, οι χώροι των υπόγειων σιδηροδρομικών δικτύων με υψηλή πυκνότητα επιβατών ενδέχεται να παρουσιάζουν

αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου σε σύγκριση με χώρους υπογείων σιδηροδρομικών δικτύων με χαμηλή πυκνότητα επιβατών .

Σύμφωνα με τους [Song et al. \(2011\)](#), ο χρόνος παραμονής των ατόμων στους χώρους των υπογείων σιδηροδρομικών συστημάτων επηρεάζει σημαντικά την έκθεσή τους σε ραδόνιο. Ο συνολικός χρόνος παραμονής των επιβατών στους χώρους του μετρό είναι σχεδόν ασήμαντος σε σύγκριση με τους εργαζομένους, οι οποίοι περνάνε πολλές ώρες στο περιβάλλον αυτό. Επομένως, όσον αφορά τις επιδράσεις της έκθεσης στην ραδιενέργεια στην υγεία, η μέτρηση της έκθεσης σε ραδόνιο σε υπόγειες εγκαταστάσεις πρέπει να επικεντρωθεί στους εργαζομένους και όχι στο κοινό, καθώς αυτοί διατρέχουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο.

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος μείωσης της έκθεσης σε ραδόνιο είναι η χρήση ισχυρών συστημάτων εξαερισμού. Τα συστήματα εξαερισμού βοηθούν στη διατήρηση της κυκλοφορίας του αέρα εντός του κτιρίου. Μέσω της συνεχούς ανανέωσης του αέρα και της απομάκρυνσης ρύπων, όπως το ραδόνιο, τα συστήματα εξαερισμού συμβάλλουν στη διατήρηση ενός υγιούς και ασφαλούς εσωτερικού περιβάλλοντος. Επιπλέον, η ενσωμάτωση μηχανισμών απομάκρυνσης ραδονίου μπορεί να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα του συστήματος, εξασφαλίζοντας έναν ακόμη υψηλότερο βαθμό προστασίας για τους χρήστες του χώρου ([Yilmaz Alan et al., 2019](#), [Manea et al., 2011](#), [Yoon et al., 2010](#)).

Μείωση των συγκεντρώσεων ραδονίου μπορεί να επιτευχθεί από την εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού αέρα υψηλής απόδοσης, όπως έχει αποδειχθεί από σχετικές έρευνες στο μετρό της Σεούλ ([Hwang et. al, 2018](#)). Η σωστή συντήρηση στα συστήματα εξαερισμού είναι επίσης σημαντική για την μείωση των επιπέδων ραδονίου σε υπόγειους χώρους ([Deb et al., 2017](#)).

Η εφαρμογή πλήρως αυτοματοποιημένων πορτών μεταξύ των αποβάθρων και των διόδων των συρμών για την προστασία των επιβατών από ατυχήματα και την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της ψύξης και της θέρμανσης, μπορούν να συμβάλουν επίσης στην απομόνωση της πλατφόρμας από τη σήραγγα και στην παρεμπόδιση της εισροής του ισχυρού ανέμου που περιέχει ραδόνιο από τη σήραγγα από τα τρένα που πλησιάζουν. Η επίδραση των θυρών στην αποτροπή της εισροής αερίου ραδονίου στις πλατφόρμες δοκιμάστηκε σε έναν σταθμό του μετρό της Σεούλ από το 2000 έως το 2006, με αποτέλεσμα ο ετήσιος μέσος όρος της συγκέντρωσης ραδονίου στον αέρα στις πλατφόρμες μετά την εγκατάσταση των αυτόματων θυρών να μειωθεί ([Yoon et al., 2010](#)).

Σύμφωνα με τα ευρήματα των [Song et al. \(2011\)](#), ο πλέον αποτελεσματικός τρόπος για την μείωση της έκθεσης των υπαλλήλων σε ραδόνιο είναι η μείωση των συγκεντρώσεων

ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους με την εγκατάσταση ανεμιστήρων για την καλύτερη κυκλοφορία του αέρα, σε συνδυασμό με το φιλτράρισμα του αέρα όπου αυτό χρειάζεται, με την αύξηση της κυκλοφορίας του αέρα ή με την αλλαγή του τρόπου εργασίας, ώστε να μειωθεί ο χρόνος παραμονής υπογείως.

Οι [Manea et al. \(2011\)](#) προτείνουν τα εξής γενικά μέτρα για την μείωση των επιπέδων ραδονίου σε ήδη υπάρχοντα κτίσματα: Την διασφάλιση αποτελεσματικού εξαερισμού, τη δημιουργία κοίλωσης κάτω από το κτίριο για καλύτερη ροή του αέρα, τη μόνωση των θεμελίων και των τοίχων, την τοποθέτηση μετρητών ραδονίου κάτω από το κτίριο για την καταγραφή και εποπτεία του ραδονίου, καθώς και την πλήρη ανακαίνιση του κτιρίου. Οι συγγραφείς δεν επικεντρώθηκαν σε διορθωτικά μέτρα που μπορούν να εφαρμοστούν στους χώρους του μετρό, αλλά σε όλα τα κτίσματα τα οποία εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. Τα μέτρα αυτά, αν και αποτελεσματικά στην πλειονότητα των κτισμάτων με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου σε εσωτερικού χώρους, δεν μπορούν να εφαρμοστούν στην πλειονότητά τους σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα, λόγω των θεμελιωδών διαφορών στην κατασκευή τους σε σχέση με τα κοινά κτίρια.

6.2 Συμπεράσματα - Μελλοντικές προοπτικές

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να διερευνήσει τις συγκεντρώσεις ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα. Στην εργασία διερευνήθηκαν επίσης η τήρηση ή μη των επιτρεπτών ορίων συγκεντρώσεων ραδονίου, οι παράγοντες που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις αυτές και τα προτεινόμενα διορθωτικά μέτρα για την μείωσή τους. Αποδείχτηκε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και των κυβερνήσεων για την επιτήρηση των επιπέδων ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά συστήματα, αλλά αναδείχθηκαν και ορισμένες ελλείψεις στην βιβλιογραφία.

Σύμφωνα με τα άρθρα που μελετήθηκαν, αποδεικνύεται ότι η μελέτη των επιπέδων ραδονίου των υπογείων σιδηροδρομικών δικτύων κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική, αναγκαία και ωφέλιμη για την ανάπτυξη γνώσεων σχετικά με την βέλτιστη μεθοδολογία μέτρησης των επιπέδων ραδονίου και της έκθεσης σε αυτό, τους παράγοντες που επηρεάζουν τα επίπεδα ραδονίου και τα πιο αποτελεσματικά διορθωτικά μέτρα για την προάσπιση της υγείας των εργαζομένων αλλά και των επιβατών.

Τα θέματα τα οποία αναδύονται από τα άρθρα που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν:

- i) Την ανάγκη για περισσότερες μελέτες πάνω στην συγκέντρωση ραδονίου σε υπόγειους σιδηροδρόμους, κυρίως σε περιοχές όπου δεν έχει πραγματοποιηθεί καμία μέτρηση.
- ii) Την ανάγκη για παρακολούθηση των συγκεντρώσεων ραδονίου στο μετρό της Αθήνας, αλλά και στο υπό κατασκευή μετρό της Θεσσαλονίκης, καθώς η ευρύτερη περιοχή στη βόρεια Ελλάδα χαρακτηρίζεται επιρρεπής σε ραδόνιο, λόγω των πετρωμάτων της.
- iii) Την χρησιμότητα της εφαρμογής μίας κοινής μεθοδολογίας μέτρησης των συγκεντρώσεων ραδονίου και της ανθρώπινης έκθεσης σε ραδόνιο, με σκοπό την εύκολη και αξιόπιστη συγκρισιμότητα και συσχέτιση των ερευνητικών αποτελεσμάτων.
- iv) Την θέσπιση κανονισμών και κατευθυντήριων οδηγιών σχετικά με τις μέγιστες επιτρεπτές συγκεντρώσεις ραδονίου σε υπόγεια σιδηροδρομικά δίκτυα από τις κυβερνήσεις.
- v) Την ανάπτυξη πολιτικών για τον έλεγχο του ραδονίου, θέτοντας στόχους και προτεραιότητες για την αντιμετώπιση του προβλήματος και την μέγιστη προστασία των εργαζομένων και των επιβατών.

vi) Την κατάλληλη ενημέρωση του επιβατικού κοινού και των εργαζομένων των υπογείων σιδηροδρομικών δικτύων σχετικά με τους κινδύνους της υψηλής έκθεσης σε ραδόνιο, με σκοπό την αποφυγή της υπερβολικής έκθεσης, όσο αυτό είναι δυνατό.

Βιβλιογραφία

Ξενογλώσση

Airthings. (2023). Radon levels: What do they mean? Retrieved from <https://www.airthings.com/resources/radon-levels>

Das, B. (2021). Radon induced health effects: A survey report. *Indian Journal of Science and Technology*, 14(5), 481-507.

Deb, A., Gazi, M., Bhoomik, G., Naskar, A., & Barman, C. (2017). Exposure to underground radon in and around Kolkata Municipal Corporation area: an exhaustive study. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 311, 375-384.

EEA. (2022). Radon. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-burden-of-cancer/radon>

El-Araby, E. H., Salman, K. A., & Mubarak, F. (2021). Human risk due to radon and heavy metals in soil. *Iranian Journal of Public Health*, 50(8), 1624.

EU Science Hub. (2024). Natural radiation. Retrieved from https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/natural-radiation_en

Grzywa-Celińska, A., Krusiński, A., Mazur, J., Szewczyk, K., & Kozak, K. Radon—The Element of Risk. The Impact of Radon Exposure on Human Health. *Toxics* 2020, 8, 120.

Hamilton, E. (1987). Directory of on-going research in cancer epidemiology 1986 edited by CS Muir and G. Wagner, IARC Sci. Pub. No. 80, Oxford University Press-International Agency for Research on Cancer, 1986, 817 pp. Price:£ 22.00. *Science of the Total Environment*, 66, 280-281.

Hwang, S. H., Park, J. B., & Park, W. M. (2018). Radon and NO₂ levels and related environmental factors in 100 underground subway platforms over two-year period. *Journal of environmental radioactivity*, 181, 102-108.

Hwang, S. H., & Park, W. M. (2018). Radon and PM 10 concentrations in underground parking lots and subway stations with health risks in South Korea. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 35242-35248.

IAEA. (2023). What is radon and how are we exposed to it? Retrieved from <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-radon-and-how-are-we-exposed-to-it>

ICRP. (2018). Summary of ICRP recommendations on Radon. Retrieved from <http://www.icrpaedia.org/images/f/fd/ICRPRadonSummary.pdf>

Joint Research Centre. (2020). Digital Atlas of Natural radiation. Retrieved from <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Indoor-radon-AM/Indoor-radon-concentration>

Kang, J. K., Seo, S., & Jin, Y. W. (2019). Health effects of radon exposure. *Yonsei medical journal*, 60(7), 597-603.

Kim, D., Cho, S., Mohiuddin, H., Shin, W., Lee, D., Roh, Y., & Seo, S. (2022). Spatial modeling for radon concentrations in subway stations in Seoul, Korea. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 24(1), 116-126.

Lecomte, J. F., Solomon, S., Takala, J., Jung, T., Strand, P., Murith, C., ... & Janssens, A. (2014). ICRP publication 126: radiological protection against radon exposure. *Annals of the ICRP*, 43(3), 5-73.

Manea, C., Podina, C., Crutu, G., Popescu, M., & Pordea, I. (2011). THE DISTRIBUTION OF RADON CONCENTRATION AND DEBIT GAMMA DOSE IN BUCHAREST AREA. *Analele Universitatii Bucuresti: Chimie*, 20(1).

Pantelić, G., Čeliković, I., Živanović, M., Vukanac, I., Nikolić, J., Cinelli, G., & Gruber, V. (2018). Literature review of Indoor radon surveys in Europe. *Publications Office of the European Union*.

PRISMA. (2020). Prisma Statement. Retrieved from <http://www.prisma-statement.org/PRISMAStatement/>

Rizo-Maestre, C., Chinchón Yepes, S., & Echarri-Iribarren, V. (2018). The radon gas in underground constructions. Railway Tunnel of Alicante (Spain).

Song, M. H., Chang, B. U., Kim, Y., & Cho, K. W. (2011). Radon exposure assessment for underground workers: a case of Seoul Subway Police officers in Korea. *Radiation protection dosimetry*, 147(3), 401-405.

Tan, B., Yang, G., Fu, S., & Xu, C. (2020). Study on radon concentration variation during subway construction. *Radiation Protection Dosimetry*, 191(4), 409-422.

Tran, V. V., Park, D., & Lee, Y. C. (2020). Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. *International journal of environmental research and public health*, 17(8), 2927.

US Department of Housing and Urban Development. (2015). Radon: Worker and employer guide to hazards and recommended controls. Retrieved from https://www.hud.gov/sites/documents/IEPWG_RADONWORKER_FINAL.PDF

US EPA. (2023). Describe the radon epidemiological studies? Retrieved from <https://www.epa.gov/radon/describe-radon-epidemiological-studies>

WHO. (2023a). Radon. Retrieved from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>

WHO. (2023b). Radiation and health. Retrieved from https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-and-health?gclid=Cj0KCQjwy4KqBhD0ARIsAEbCt6hgC63psBjPHQFIuRapjdzji-z7FzqC3FEXII49W2MjqkQFuJXAp0waAneqEALw_wcB

WHO. (2009). *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. World Health Organization.

Yilmaz Alan, H., Akkus, B., & Amon Susam, L. (2019). Investigation of radon concentrations of underground metro and Marmaray stations in Istanbul. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322, 291-304.

Yoon, S., Chang, B. U., Kim, Y., Byun, J. I., & Yun, J. Y. (2010). Indoor radon distribution of subway stations in a Korean major city. *Journal of environmental radioactivity*, 101(4), 304-308.

Yoshimura, E. M., Da Silva, A. A. R., dos Anjos, R. M., Umisedo, N. K., Rizzotto, M., Velasco, H., & Valladares, D. L. (2016). Radon concentration in air and external gamma dose rate: is there a correlation?. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 307, 787-792.

Ελληνική

ΕΕΑΕ. (2024). Έκθεση σε ραδόνιο. Retrieved from <https://eeae.gr/%CE%B1%CF%83%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%B1-%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%8E%CE%BD/%CE%B5%CF%80%CE%BF%CF%80%CF%84%CE%B5%CE%AF%CE%B1-%CF%81%CE%B1%CE%B4%CE%B9%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82-%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%B2%CE%AC%CE%BB%CE%BB%CE%BF%CE%BD%CF%84%CE%BF%CF%82/%CE%AD%CE%BA%CE%B8%CE%B5%CF%83%CE%B7-%CF%83%CE%B5-%CF%81%CE%B1%CE%B4%CF%8C%CE%BD%CE%B9%CE%BF>

ΕΕΑΕ. (2023). Χάρτης Ραδονίου. Retrieved from <https://eeae.gr/en/radon-map?view=radonmap>

ΕΛΙΝΥΑΕ. (2024). Ακτινοβολία. Retrieved from <https://www.elinyae.gr/themata-yae/aktinobolia>