



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ (ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ,
ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ, ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ)

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
“ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ”

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Μελέτη συγκέντρωσης ραδονίου σε ιδιωτικά ή/και δημόσια
κτήρια στην ανατολική (πεδινή) περιοχή του Ν. Χανίων

ΧΑΤΖΗΛΙΑΣ ΙΩΣΗΦ
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ε. Μανούτσογλου	Καθηγητής (Επιβλέπων)
Ν. Καλλίθρακας-Κοντός	Καθηγητής
Κ. Ποτηριάδης	Δρ., Ειδικός Λειτουργός Επιστήμονας βαθμίδας Α΄, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας

Χανιά, Μάρτιος 2019

Η έγκριση της παρούσας Μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, δεν σημαίνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202).

Αφιέρωση

Μελέτη συγκέντρωσης ραδονίου σε ιδιωτικά ή/και δημόσια κτήρια στην ανατολική (πεδινή) περιοχή του ν. Χανίων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ομάδα Παρακολούθησης Ραδιενέργειας του Περιβάλλοντος (Radioactivity Environmental Monitoring – REM group) του Ενωμένου Κέντρου Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, στο πλαίσιο της θεσμικής επιστημονικής υποστήριξης, άρχισε να χαρτογραφεί το 2005 το ραδιενεργό αέριο ραδόνιο στους εσωτερικούς χώρους ευρωπαϊκών κατοικιών, ώστε μέσω της βάσης δεδομένων να επισημανθούν οι περιοχές με αυξημένα επίπεδα. Αν και έχουν γίνει εργασίες που εξετάζουν τις συγκεντρώσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους και στον ελληνικό χώρο, αυτές θα πρέπει να επαναλαμβάνονται χρονικά. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η συγκέντρωση ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίων-κατοικιών στην ανατολική (πεδινή) περιοχή του νομού Χανίων. Στην εργασία περιγράφονται εκτενώς μέσα από βιβλιογραφική επισκόπηση το φαινόμενο του ραδιενεργού αερίου «ραδόνιο», που αποτελεί πηγή μεγάλου ποσοστού φυσικής ακτινοβολίας που δέχεται ο άνθρωπος. Παρουσιάζονται οι πηγές προέλευσης και οι τρόποι έκλυσης και διάχυσης του, οι τεχνικές μέτρησης, οι κίνδυνοι έκθεσης, η διαδικασία απομάκρυνσης του, οι μέθοδοι μετριάσμού και πρόληψης από το εσωτερικό των κτηρίων καθώς επίσης οι ισχύοντες κανονισμοί στην Ελλάδα και το εξωτερικό, και τα αποτελέσματα μετρήσεων από διάφορες πόλεις της Ελλάδας. Περιγράφονται επίσης τα γεωλογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης αλλά και στενής πεδινής/ανατολικής περιοχής μελέτης. Στα πλαίσια της έρευνας αυτής, οι μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου πραγματοποιήθηκαν με χρήση παθητικών ανιχνευτών καταγραφής ιχών (CR-39). Η διάθεση των ανιχνευτών και η επεξεργασία τους έγιναν από το τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας. Τέλος, παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκέντρωσης για τους χώρους που επιλέχθηκαν και μέσω αυτών απώτερος στόχος της έρευνας είναι αφενός η εκτίμηση του κινδύνου στους χώρους μέσω του υπολογισμού της ενεργούς δόσης ακτινοβολίας (E_{eff}) και αφετέρου ο εντοπισμός των παραμέτρων που συμβάλλουν στα μετρημένα επίπεδα ραδονίου στο εσωτερικό των κτηρίων της εξεταζόμενης περιοχής, στοιχεία και δεδομένα που οδηγούν στην εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων.

Λέξεις-κλειδιά: συγκέντρωση ραδονίου, ραδόνιο εσωτερικών χώρων κτιρίων, ανιχνευτές CR-39, παθητικοί ανιχνευτές, ενεργητικοί ανιχνευτές, κανονισμοί ραδονίου.

Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της εργασίας έλαβα σημαντικότερη βοήθεια και νιώθω την ανάγκη να εκφράσω τις **ευχαριστίες** μου. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας μου Καθηγητή της Σχολής Ορυκτών Πόρων του Π.Κ, **κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου**, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, αναθέτοντάς μου το θέμα και παρέχοντάς μου πολύτιμη βοήθεια για την ολοκλήρωσή του. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω και για την συμπαράστασή του στη διασφάλιση των μέσων για την διεξαγωγή της εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω επίσης στον Καθηγητή **κ. Καλλίθρακα-Κόντο** για την δική του πολύτιμη βοήθεια και στήριξη σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας καθώς και στον ειδικό λειτουργό επιστήμονα **κ. Κ. Ποτηριάδη**. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω και να αφιερώσω την εργασία αυτή στους γονείς μου και στην οικογένειά μου (Δέσποινα και Πετράκο) για την αμέριστη συμπαράστασή τους για την εκπόνησή της.

“Study of radon concentration in private and/or public buildings in the eastern (lowland) region of the Chania Prefecture”

Abstract

The Radioactivity Environmental Monitoring Group (REM group) of the European Commission's Joint Research Center, due to institutional scientific support, began to search radioactive radon gas in the interior of European homes in 2005, so that through the database the highly risk areas could be mentioned. Although this work has already been done to indoors radon concentrations in Greece, it should be repeated in time. In the present study, radon concentration in residential buildings is examined in the eastern-(lowland) area of the prefecture of Chania. This study describes extensively, through a bibliographic overview, the phenomenon of radioactive gas "radon", which is a natural source of radiation that man receives in high percentage. Particularly, are presented radon natural sources, methods of air release and diffusion, measurement techniques, exposure hazards, removal procedures, methods for mitigation and prevention of buildings interior, as well as the applicable regulations in Greece and abroad, and measurement results from several cities in Greece. The geological and geomorphological characteristics of the flat / eastern investigated area are also described. Radon concentration measurements were performed using passive Solid State Nuclear Track Detectors (CR-39). The grant of the detectors and their processing was done by the Environmental Radiation Control Department of the Hellenic Atomic Energy Commission. The results of indoor radon concentration measurements for the selected areas are presented in detail. Radon concentrations results are used to estimate the risk in these buildings by calculating active radiation dose (E_{eff}). Searching the parameters contributing to measured radon levels and active doses, data leads to the final conclusions.

Keywords: radon concentration, indoor building radon, CR-39 detectors, passive detectors, active detectors, radon regulations.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
Abstract	iii
Πίνακας Περιεχομένων	iv
Κατάλογος Πινάκων	vi
Κατάλογος Εικόνων	vii
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1 Περιγραφή του προβλήματος	1
1.2 Αντικείμενο έρευνας.....	2
1.3 Δομή της μεταπτυχιακής διατριβής	3
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	1
2.1 Ραδόνιο (Γενικά).....	1
2.2 Πηγές Ραδονίου	5
2.2.1 Έδαφος και Οικοδομικά Υλικά	5
2.2.2 Ατμοσφαιρικός αέρας	12
2.2.3 Φυσικό αέριο	13
2.2.4 Επιφανειακά & Υπόγεια Ύδατα	13
2.3 Επιπτώσεις του Ραδονίου στον άνθρωπο	15
2.4 Εκτίμηση του κινδύνου έκθεσης σε ραδόνιο.....	19
2.4.1 Αβεβαιότητες στην εκτίμηση κινδύνου από την έκθεση σε ραδόνιο	22
2.5 Ραδόνιο στους εσωτερικούς χώρους.....	25
2.6 Διαδικασία απομάκρυνσης ραδονίου από εσωτερικούς χώρους.....	40
2.7 Τεχνικές μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους	41
2.7.1 Τεχνικές μέτρησης με ενεργητικούς ανιχνευτές.....	43
2.7.2 Τεχνικές μέτρησης με παθητικούς ανιχνευτές	45
2.7.3 Ο ανιχνευτής πυρηνικών ιχνών CR-39	55
2.8 Κανονισμοί & Συστάσεις για την έκθεση σε Ραδόνιο εσωτερικών χώρων	57
2.8.1 Επιτροπή Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων	58
2.8.2 Συμβούλιο Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	58
2.8.3 Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας	59
2.8.4 Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας	60

2.8.5	Εθνικές νομοθεσίες & συστάσεις για τον έλεγχο έναντι έκθεσης σε ραδόνιο..	61
2.9	Ραδόνιο στους χώρους εργασίας και στις κατοικίες στην Ελλάδα.....	69
2.10	Πρόληψη και μετριασμός του ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίων	81
2.10.1	Πρόληψη έναντι ραδονίου σε νέες δομές.....	81
2.10.2	Μετριασμός ραδονίου σε υφιστάμενες κατοικίες	85
Κεφάλαιο 3: Περιγραφή της περιοχής μελέτης: περιοχής ν. Χανίων.....		90
3.1	Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά περιοχής Ν. Χανίων.....	90
3.2	Γεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής ν. Χανίων.....	91
3.2.1	Γεωλογική επισκόπηση - γεωλογικό περίγραμμα της Κρήτης	91
3.2.2	Γεωλογικό περίγραμμα της ευρύτερης περιοχής μελέτης (Ανατολική περιοχή)	95
3.3	Κλιματολογικά χαρακτηριστικά περιοχής ν. Χανίων	100
3.3.1	Γενικά κλιματολογικά χαρακτηριστικά της Κρήτης	100
3.3.2	Κλιματολογικά χαρακτηριστικά του Νομού Χανίων	101
Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία συλλογής δεδομένων & πληροφοριών		103
4.1	Εξοπλισμός.....	103
4.2	Διαδικασία μετρήσεων.....	105
4.3	Επεξεργασία μετρήσεων	105
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα		108
5.1	Γεωγραφικός προσδιορισμός θέσεων ανιχνευτών.....	108
5.2	Αποτελέσματα μετρήσεων	111
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.....		116
6.1	Παρατηρήσεις και συμπεράσματα.....	116
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	117
Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία - Αναφορές.....		118

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1.1: Ατομικές, φυσικές & χημικές ιδιότητες ραδονίου (^{222}Rn). (Πηγή: Baskaran, 2016, p. 4).....	1
Πίνακας 2.1.2: Πυρηνικές & φυσικές ιδιότητες των ^{222}Rn , ^{220}Rn & ^{219}Rn . (Baskaran, 2016, p. 4)	3
Πίνακας 2.3.1: Δυνητική Ενέργεια Ακτινοβολίας-α ανά άτομο, για τα 4 βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου (Πηγή: ICRP65, 1993, p. 3)	16
Πίνακας 2.5.1: Αριθμητικός & γεωμετρικός μέσος των συγκεντρώσεων ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών σε 25 κράτη-μέλη της Ε.Ε. (Πηγή: UNSCEAR, 2000, p. 133; WHO, 2007, p. 22-23).....	35
Πίνακας 2.5.2: Περιοχές με μεγαλύτερη συσσώρευση ραδονίου στην Ελλάδα (Bq/m ³). (Πηγή: http://www.keelpno.gr/Portals/0/Αρχεία/ΚΕΠΠΧ/Ραδόνιο.pdf)	36
Πίνακας 2.5.3: Μέσες τιμές συγκεντρώσεων ραδονίου στον αέρα των κατοικιών, ανά Περιφερειακή Ενότητα της Ελλάδος (Πηγή: https://eeae.gr/χάρτης-ραδονίου)	38
Πίνακας 2.7.2.1: Κυριότερα χαρακτηριστικά παθητικών & ενεργητικών ανιχνευτών ραδονίου και θυγατρικών του. (Πηγή: Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 98).	52
Πίνακας 2.8.5.1: Συνιστώμενα επίπεδα ανάληψης δράσης για υφιστάμενες κατοικίες & κατοικίες υπό κατασκευή, ανά μεμονωμένη χώρα. (Πηγή: WHO, 2007, p. 12-13).....	63
Πίνακας 2.8.5.2: Επίπεδα στόχων συγκεντρώσεων ραδονίου σε υφιστάμενα κτήρια έπειτα από μετρίασμό, και σε νέα κτήρια λόγω πρόληψης. (Πηγή: WHO, 2007, p. 15).....	65
Πίνακας 2.8.5.3: Επίπεδα αναφοράς αερίου ραδονίου σε υπόγειους χώρους εργασίας σε μονάδες συγκέντρωσης ραδονίου. (Πηγή: ERRICCA2, 2005, p. 9)	67
Πίνακας 2.10.1.1: Επιλογές ελέγχου ραδονίου για μια νέα κατασκευή. (Πηγή: WHO, 2009, p. 43)	81
Πίνακας 2.10.2.1: Συνήθεις τεχνικές μετρίασης ραδονίου, απόδοση και κόστη. (Πηγή: WHO, 2009, p. 51).....	86
Πίνακας 13 :Τιμές ενεργής δόσης ακτινοβολίας στους χώρους που έγιναν οι μετρήσεις σύμφωνα με την εξίσωση 1	114
Πίνακας 14: Όρια ασφαλείας για την ακτινοβολία ραδονίου (I.C.R.P.,2014 και WHO,2009)	114

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Χάρτης επικινδυνότητας 15 ευρωπαϊκών χωρών, πιθανότητας υπέρβασης συγκέντρωσης ραδονίου των 400 Bq/m ³ του αριθμητικού μέσου σε εσωτερικούς χώρους (από <i>Dubois et al., 2010</i>).....	2
Εικόνα 2: Σειρές Διάσπασης των Α) ²³⁸ U, Β) ²³⁵ U και Γ) ²³² Th. (http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/Decay%20Chains.html)	2
Εικόνα 3: Μηχανισμοί απορροής & εκποής ραδονίου από το έδαφος ή τοίχους κτηρίων. (Πηγή: <i>Στούλος, 1998, σ. 3</i>).....	7
Εικόνα 4: Συμπεριφορά ραδονίου & προϊόντων διάσπασής του σε εσωτερικούς χώρους. (Πηγή: <i>Στούλος, 1998, σ. 8</i>).....	27
Εικόνα 5: Κυριότερες οδοί εισόδου ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίου, Α έως Κ. (Πηγή: <i>Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 81</i>)	32
Εικόνα 6: Αριθμητικός Μέσος (Bq/m ³) σε πλέγμα κελιών 10 x 10 km μακροχρόνιας συγκέντρωσης ραδονίου σε ισόγειους χώρους. (Πηγή: <i>Tollefsen et al., 2014</i>).....	36
Εικόνα 7: Χάρτης ραδονίου Δημοτικών Ενοτήτων Νομού Χανίων. (Πηγή: https://eeae.gr/χάρτης-ραδονίου)	37
Εικόνα 8: Χάρτης ραδονίου Περιφερειακών Ενοτήτων Ελλάδος. (Πηγή: https://eeae.gr/χάρτης-ραδονίου)	38
Εικόνα 9: Αναπαράσταση επιφάνειας SSNTD έπειτα από χημική διάβρωση για χρονικό διάστημα t. (Πηγή: <i>Πατήρης, 2009, σ. 106</i>).....	47
Εικόνα 10: Αναπαράσταση φάσεων που διέρχεται το σχήμα του ίχνους κατά τη χημική χάραξη του ανιχνευτή. (Πηγή: <i>Πατήρης, 2009, σ. 107</i>)	48
Εικόνα 11: Ανοιγμένο δοχείο ενεργού ξυλάνθρακα (αριστερά) & κλειστό δοχείο ενεργού ξυλάνθρακα (δεξιά). (Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/239815223_fig1_Figure-1-Photograph-showing-two-activated-charcoal-canisters-The-opened-canister-shows).....	51
Εικόνα 12: Ανιχνευτής ηλεκτρίσιμων υλικών (electret) ε-PERM. (Πηγή: http://evgpot.weebly.com/piepsilon943rhoalphamualpha-1.html)	52
Εικόνα 13: Χημικός τύπος μονομερούς δις-αλλυλοανθρακικής διαιθυλενογλυκόλης. (Πηγή: <i>Πατήρης, 2009, σ. 137</i>).....	55
Εικόνα 14: Σχεδιάγραμμα μεταξύ συγκέντρωσης ραδονίου σε α) εργασιακούς χώρους και β) κατοικίες σε σχέση με την στάθμη ορόφου (υπόγειο, ισόγειο, 1 ^{ος} όροφος κλπ).....	79

Εικόνα 15: Τμήμα του γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:500.000. με κίτρινες και πράσινες αποχρώσεις οι λεκάνες του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς αντίστοιχα (Μπορνόβας et al., 1983).....	92
Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση της λιθοστρωματογραφίας της Κρήτης, με τις μεγαλύτερες ομάδες σχηματισμών του Νεογενούς και το προνεογενές υπόβαθρο (αδιαίρετο). Παρουσιάζεται η μεταξύ τους σχέση όσο αναφορά τη κατακόρυφη και οριζόντια θέση αλλά και την αλληλοπαρεμβολή τους (Meulenkamp, 1979)	95
Εικόνα 17: Απόσπασμα από τον Γενικό Γεωλογικός Χάρτη Ελλάδος, Νήσος Κρήτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών υπό κλίμακα 1: 200.000 (Creutzburg, 1977).....	97
Εικόνα 18: Υπόμνημα γενικού Γεωλογικού Χάρτη Ελλάδος, Νήσος Κρήτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών (Creutzburg, 1977).	98
Εικόνα 19.....	99
Εικόνα 20: Παθητικός ανιχνευτής πυρηνικών ιχνών CR-39 που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.	104
Εικόνα 21: Στιγμιότυπα από ίχνη διασπάσεων ραδονίου σε διαφορετικές μεγεθυντικές αναλύσεις (Νικολόπουλος,2000).....	106
Εικόνα 22: Τυπική εικόνα ιχνών διάσπασης ραδονίου σε μετρητή CR-39.	107
Εικόνα 23: Εικόνα γεωγραφικού προσδιορισμού θέσεων ανιχνευτών μέσω πλατφόρμας google earth.	108

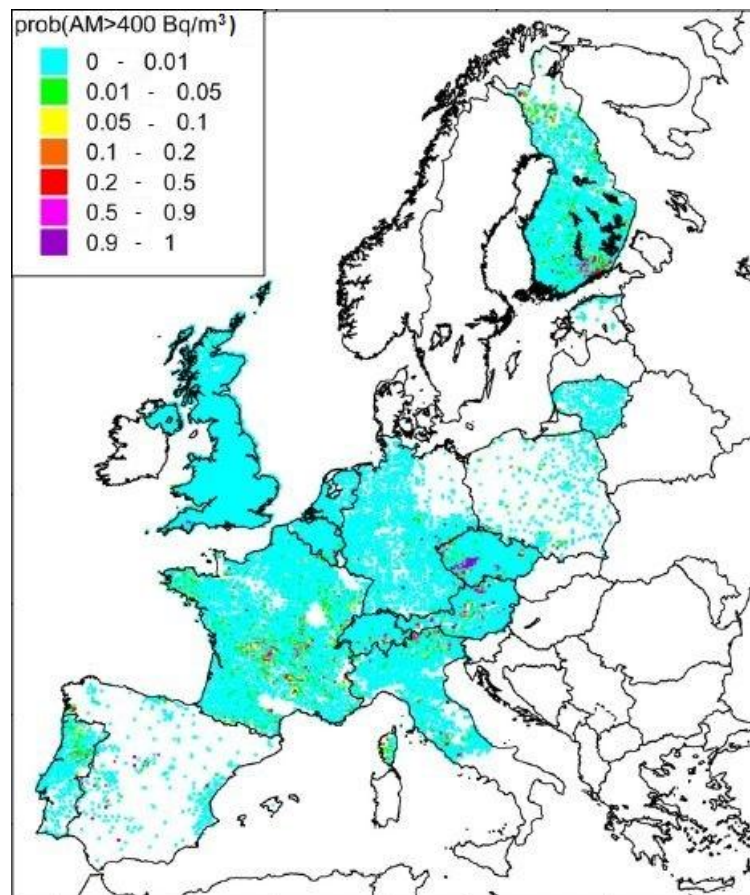
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Εδώ και αρκετά χρόνια, η προσοχή πολλών επιστημόνων παγκοσμίως εστίασε στο ζήτημα της έκθεσης των εσωτερικών χώρων κτηρίων σε ραδόνιο, τα επίπεδα των οποίων είναι γενικά αυστηρώς συνδεδεμένα με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής. Η μεταβλητότητα της έκθεσης σε ραδόνιο φαίνεται να επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, μερικοί από τους οποίους είναι η γεωλογία και το κλίμα, η θερμοκρασία του εδάφους και η διαπερατότητα αυτού, το ποσοστό υγρασίας, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού ενός κτηρίου και του εξωτερικού χώρου, οι διακυμάνσεις στην πίεση του αέρα, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τις δομικές κατασκευές, ο βαθμός εξαερισμού ενός κτηρίου, καθώς και ο τρόπος ζωής των κατοίκων. Επιπλέον, διάφορες μελέτες έχουν δείξει σημαντική μεταβλητότητα στα επίπεδα ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, σε ημερήσια αλλά και εποχιακή βάση (Gillmore *et al.*, 2005; Bossew and Lettner, 2007; De Francesco *et al.*, 2010; Mostafa *et al.*, 2015). Η κύρια ανησυχία σχετικά με την παρουσία του ραδονίου και των θυγατρικών του στο εσωτερικό κτηρίων αφορά τις άμεσες επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, καθώς δύνανται να προκαλέσουν καρκίνο του πνεύμονα (ICRP65, 1993, p. 43).

Υπάρχουν πολλές μελέτες που εξετάζουν τις μετρήσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους (Groves-Kirkby *et al.*, 2006; Žunić *et al.*, 2007; Al-Jarallah *et al.*, 2008; Rahman *et al.*, 2008; Burke and Murphy, 2011; Stojanovska *et al.*, 2011; Collignan *et al.* 2016), τις **καρκινογενείς** επιδράσεις του ραδονίου (Pershagen *et al.*, 1994; Jostes, 1996; Wichmann *et al.*, 2005), άλλες επιδράσεις στην υγεία, όπως **λευχαιμία** και **χρωμοσωμικές ανωμαλίες**, λόγω έκθεσης σε ραδόνιο (Eatough and Henshaw, 1993; Stephan *et al.*, 2005).

Η ομάδα Παρακολούθησης Ραδιενέργειας του Περιβάλλοντος (Radioactivity Environmental Monitoring – REM group) του Ενωμένου Κέντρου Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, στο πλαίσιο της θεσμικής επιστημονικής υποστήριξης, άρχισε να χαρτογραφεί το 2005 το ραδόνιο στους εσωτερικούς χώρους ευρωπαϊκών κατοικιών, ώστε μέσω της βάσης δεδομένων να επισημανθούν οι περιοχές με αυξημένα επίπεδα. Από τα πρώτα στατιστικά αποτελέσματα διαμορφώθηκε και ο χάρτης κινδύνου πιθανότητας υπέρβασης των 400 Bq/m³ του αριθμητικού μέσου ραδονίου εσωτερικών χώρων που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.1.1 (Dubois *et al.*, 2010).



Εικόνα 1: Χάρτης επικινδυνότητας 15 ευρωπαϊκών χωρών, πιθανότητας υπέρβασης συγκέντρωσης ραδονίου των 400 Bq/m³ του αριθμητικού μέσου σε εσωτερικούς χώρους (από Dubois *et al.*, 2010)

Για την **Κρήτη**, οι **Βρύσες Αποκορώνου Χανίων** αποτελούν μια περιοχή στην οποία έχουν μετρηθεί αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου, ενώ στον Αγ. Βασίλειο Ρεθύμνου και σε περιοχές του νομού Ηρακλείου παρουσιάζονται υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου (Nikolopoulos *et al.*, 2002).

1.2 Αντικείμενο έρευνας

Στα πλαίσια αναζήτησης συγκεντρώσεων ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους ιδιωτικών ή/και δημοσίων κτηρίων του νομού Χανίων, πραγματοποιήθηκε μια από κοινού έρευνα για δύο περιοχές, στην ανατολική περιοχή (πεδινή) και στην δυτική περιοχή (ορεινή) του νομού Χανίων (Σημαντηράκης 2019). Οι πρώτες αυτές μελέτες είναι καθαρά ενδεικτικές των επιπέδων συγκέντρωσης του ραδονίου και σε καμία περίπτωση δεν θέλουν να υποκαταστήσουν την συστηματική μελέτη που έχει ξεκινήσει και διενεργείται από την ΕΕΑΕ. Στις δυο μελέτες αυτές, αρχικά γίνεται από κοινού η παρουσίαση γενικά του φαινομένου έκλυσης ραδονίου και των επιπτώσεων του, που αποτελεί μεγάλο ποσοστό της

φυσικής ακτινοβολίας που δέχεται ο άνθρωπος. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι πηγές και οι τρόποι έκλυσης ραδονίου, οι τεχνικές μέτρησης, οι κίνδυνοι έκθεσης, η διαδικασία απομάκρυνσης, οι μέθοδοι μετριασμού και πρόληψης από το εσωτερικό των κτηρίων. Γίνεται αναφορά στα γενικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά καθώς και στην γεωλογία της ευρύτερης περιοχής. Στα πλαίσια της έρευνας αυτής, οι μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου έγιναν με χρήση παθητικών ανιχνευτών καταγραφής ιχνών (CR-39). Η διάθεση των ανιχνευτών και η επεξεργασία τους έγιναν από το τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας.

Το έργο που παρουσιάζεται στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, εκτός των ανωτέρω, αφορά την ανατολική (πεδινή) περιοχή του νομού Χανίων. Γίνεται μνεία στα γεωλογικά χαρακτηριστικά αυτής, και κυρίως εξετάζεται εάν οι συγκεντρώσεις ραδονίου σε 18 εσωτερικούς χώρους της περιοχής αυτής σε ιδιωτικά ή/και δημόσια κτήρια ξεπερνούν τα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια, βάσει μακροπρόθεσμων μετρήσεων διάρκειας 3 και πλέον μηνών. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι τοποθεσίες των δοσιμέτρων, το είδος των χώρων, οι χρόνοι τοποθέτησης, και τα αποτελέσματα. Πέραν της μέτρησης της συγκέντρωσης του ραδονίου στους χώρους αυτούς κατά τους χειμερινούς μήνες, απώτερος στόχος της έρευνας είναι αφενός η εκτίμηση του κινδύνου στους χώρους μέσω του υπολογισμού της ενεργούς δόσης ακτινοβολίας (E_{eff}) και αφετέρου ο εντοπισμός των παραμέτρων που συμβάλλουν στα μετρημένα επίπεδα ραδονίου στο εσωτερικό των κτηρίων της εξεταζόμενης περιοχής και εξάγονται συμπεράσματα.

1.3 Δομή της μεταπτυχιακής διατριβής

Στο **πρώτο** (1^ο) κεφάλαιο της παρούσας διατριβής ορίζεται το πρόβλημα της συγκέντρωσης ραδονίου σε κατοικίες και χώρους εργασίας, που έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας τα τελευταία 30 περίπου χρόνια, και παρουσιάζεται ο σκοπός αυτής της εργασίας και το βασικό αντικείμενο μελέτης. Επιπλέον, πραγματοποιείται ανάλυση της δομής της παρούσας εργασίας, τονίζοντας τα σπουδαιότερα σημεία ανά κεφάλαιο.

Στο **δεύτερο** (2^ο) κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίχθηκε η παρούσα εργασία. Γίνεται μια εκτεταμένη αναφορά σχετικά με τις ιδιότητες του ραδονίου και τις πηγές προέλευσής του, τις επιπτώσεις του στον άνθρωπο, τους τρόπους εισόδου του στο εσωτερικό κτηρίων, αλλά και τη διαδικασία απομάκρυνσής του από τους εσωτερικούς χώρους, τις μεθόδους μέτρησής του, τους κανονισμούς για την έκθεση σε ραδόνιο

εσωτερικών χώρων, τα όρια συγκέντρωσής του σε εργασιακούς χώρους, και την πρόληψη είτε το μετριασμό αυτού στο εσωτερικό κτηρίων, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση παλαιότερων και πρόσφατων δημοσιευμένων εργασιών που σχετίζονται με τις προαναφερθείσες παραμέτρους και διαδικασίες, για μια ολοκληρωμένη εκτίμηση του προβλήματος της συγκέντρωσης ραδονίου εντός των κτηρίων.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο (3^ο) αποδίδονται αναλυτικά κυρίως τα γεωμορφολογικά, γεωλογικά αλλά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης στην οποία εφαρμόζονται τα δοσίμετρα μέτρησης ραδονίου στο εσωτερικό των κτηρίων.

Στο **τέταρτο** (4^ο) κεφάλαιο περιγράφεται με λεπτομέρεια η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ώστε να συλλεχθούν τα δεδομένα και οι πληροφορίες προς επεξεργασία. Αρχικά παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε. Ακολούθως, αναλύεται η διαδικασία μετρήσεων των επιπέδων ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίων. Αφού προσδιοριστούν διάφορες παράμετροι που έλαβαν χώρα στο πεδίο, καθώς και συνθήκες, γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων σε Excel.

Στο **πέμπτο** (5^ο) κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα κτήρια της μελετώμενης περιοχής.

Στο **έκτο** (6^ο) κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, μέσω της μελέτης και εφαρμογής όλων των παραπάνω, ενώ παράλληλα γίνονται κάποιες προτάσεις κυρίως για πιθανά θέματα μελλοντικής έρευνας στη περιοχή μελέτης.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Ραδόνιο (Γενικά)

Το ραδόνιο είναι ένα φυσικό άχρωμο, άοσμο, άγευστο, ευγενές **ραδιενεργό αέριο**, και συγκεκριμένα το βαρύτερο από όλα τα ευγενή αέρια. Αποτελεί μια κατηγορία χημικά αδρανών αερίων χαμηλής αντιδραστικότητας, και έχει συνολικά 36 ισότοπα που κυμαίνονται από ^{193}Rn έως ^{228}Rn . Όλα τα ισότοπα είναι ραδιενεργά, και αποκαλούνται ραδιοϊσότοπα, με τρία ραδιοϊσότοπα να παράγονται σταθερά στη φύση: το ^{222}Rn , το οποίο αποτελεί το κυριότερο ισότοπο του στοιχείου και φέρει το όνομα ραδόνιο, προέρχεται από τη ραδιενεργό σειρά διάσπασης του ουρανίου-238 (^{238}U , με χρόνο ημιζωής $4.5 \cdot 10^9$ χρόνια) και αποδίδει ένα σύνολο από ραδιενεργά ισότοπα που αποκαλούνται *θυγατρικά* ισότοπα του ραδονίου, το ^{219}Rn , γνωστό ως ακτινόνιο, προερχόμενο από τη ραδιενεργό σειρά διάσπασης του ουρανίου-235 (^{235}U , με χρόνο ημιζωής $7.04 \cdot 10^8$ χρόνια), και το ^{220}Rn , γνωστό ως θορόνιο, προερχόμενο από τη ραδιενεργό σειρά διάσπασης του θορίου-232 (^{232}Th , με χρόνο ημιζωής $1.4 \cdot 10^{10}$ χρόνια). Μόνο τρία από τα 36 ισότοπα ραδονίου έχουν χρόνο ημιζωής μεγαλύτερο από 1 ώρα, το ^{210}Rn (με χρόνο ημίσειας ζωής 2.5 ώρες), το ^{211}Rn (με χρόνο ημίσειας ζωής 14.7 ώρες) και το ^{222}Rn (με χρόνο ημίσειας ζωής 3.8 ημέρες) (Νικολόπουλος, 2000, σ. 6, 16; Baskaran, 2016, p.1, Πατήρης, 2009, σ. 34-36). Στον Πίνακα 2.1.1 παρουσιάζονται οι σημαντικότερες φυσικές και χημικές ιδιότητες του ραδονίου (Baskaran, 2016, p. 4).

Πίνακας 2.1.1: Ατομικές, φυσικές & χημικές ιδιότητες ραδονίου (^{222}Rn). (Πηγή: Baskaran, 2016, p. 4)

Ιδιότητες	Τιμές
Ατομικός αριθμός	86
Πρότυπο ατομικό βάρος	222
Εξωτερική διαμόρφωση ηλεκτρονίων κελύφους	$6s^2 6p^6$
Πυκνότητα	9.73 kg/m^3 (στους 0°C : $1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$)
Σημείο τήξης ($^\circ\text{K}$)	202
Κανονικό σημείο βρασμού ($^\circ\text{K}$)	208.2
Θερμότητα σύντηξης (kJ/mol)	3.247
Θερμότητα εξάτμισης (kJ/mol)	18.0
Πρώτο δυναμικό ιονισμού (kJ/mol)	1037
Οξειδωτικές καταστάσεις	0, 2, 6
Ηλεκτροαρνητικότητα (κλίμακα Pauling)	2.2
Ομοιογενής ακτίνα (nm)	0.150
Ακτίνα Van der Waals (nm)	0.220

Ακολουθώς, στον Πίνακα 2.1.2 συνοψίζονται μερικές από τις βασικές πυρηνικές και φυσικές ιδιότητες των ^{222}Rn , ^{220}Rn και ^{219}Rn (Baskaran, 2016, p. 4).

Πίνακας 2.1.2: Πυρηνικές & φυσικές ιδιότητες των ^{222}Rn , ^{220}Rn & ^{219}Rn . (Baskaran, 2016, p. 4)

Παράμετρος	Σύμβολο	^{222}Rn	^{220}Rn	^{219}Rn
Ημι-ζωή	$T_{1/2}$	3.823 d	55.83 s	3.983 s
Σταθερά διάσπασης	λ (1/s)	$2.098 \cdot 10^{-6}$	$1.242 \cdot 10^{-2}$	0.174
Μέση ενέργεια ανάκρουσης κατά το σχηματισμό	E_T (keV)	86	103	104
Συντελεστής Διάχυσης στον αέρα	D_a (m ² /s)	10^{-5}	-	-
Συντελεστής Διάχυσης στο νερό	D_w (m ² /s)	10^{-9}	-	-

Όταν διασπώνται οι ασταθείς πυρήνες, γίνεται εκπομπή πυρηνικών σωματιδίων α και β , ενώ συχνά εκπέμπεται και ακτινοβολία- γ . Κατά την **α -διάσπαση** ασταθών πυρήνων εκπέμπονται σωματίδια- α . Κάθε σωματίδιο- α αποτελείται από δύο νετρόνια και δύο πρωτόνια, τα οποία είναι ισχυρά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Ένα σωματίδιο- α είναι ένας πυρήνας ^4_2He . Κατά την α -διάσπαση επιτυγχάνεται μείωση του ατομικού και μαζικού αριθμού του μητρικού ραδιενεργού ισοτόπου κατά δύο και τέσσερις μονάδες αντιστοίχως (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 23-24; Οικονομόπουλος, 2008, σ. 16). Κατά τη **β -διάσπαση** ασταθούς πυρήνα εκπέμπεται ένα σωματίδιο- β , δηλαδή ένα ηλεκτρόνιο, το οποίο θεωρείται ότι δεν έχει μάζα, και επομένως η εκπομπή του δε διαφοροποιεί το μαζικό αριθμό του πυρήνα, ωστόσο ο ατομικός αριθμός αυτού αυξάνεται κατά μία μονάδα. Αυτή η εκπομπή ηλεκτρονίου από τον πυρήνα, εξηγείται επειδή λαμβάνει χώρα μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο. Κατά τη **β^+ -διάσπαση** ασταθούς πυρήνα εκπέμπεται ένα ποζιτρόνιο, δηλαδή ένα θετικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο, η οποία εξηγείται επειδή ένα πρωτόνιο του πυρήνα μετατρέπεται σε νετρόνιο. Η εκπομπή του ποζιτρονίου δε διαφοροποιεί το μαζικό αριθμό του πυρήνα, εν τούτοις ο ατομικός αριθμός αυτού μειώνεται κατά μία μονάδα, συγκρινόμενος με αυτόν του μητρικού πυρήνα. Η β -διάσπαση, με εκπομπή είτε ηλεκτρονίου (e^-) είτε ποζιτρονίου (e^+) αποτελεί ένα μηχανισμό αποκατάστασης της συμμετρίας των πρωτονίων με τα νετρόνια, καθώς και της πυρηνικής μάζας (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 24; Σεμερτζίδου, 2013, σ. 9-10). Η **ακτινοβολία- γ** αφορά εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας, κατά τη μετάπτωση ενός διεγερμένου πυρήνα σε μια κατάσταση λιγότερο διεγερμένη, και εκπέμπεται ταυτόχρονα με την α - ή β - διάσπαση (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 24; Οικονομόπουλος, 2008, σ. 16).

Ως ημίσεια ζωή του ραδονίου ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η ραδιενέργεια του ραδονίου κατά το ήμισυ σε σχέση με την αρχική της τιμή, και δίδεται από

τον τύπο: $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$, όπου λ η σταθερά αποδιέγερσης ή σταθερά διάσπασης (Πατήρης, 2009, σ. 37). Ως ενεργότητα ή ραδιενέργεια ενός δείγματος καλείται το σύνολο των διασπάσεων κάθε είδους που λαμβάνουν χώρα σε αυτό το δείγμα ανά μονάδα χρόνου, και δίδεται από τη σχέση: $A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$, όπου $A(t)$ η ενεργότητα και $N(t)$ το σύνολο των πυρήνων του δείγματος τη στιγμή t . Μονάδα μέτρησης του ρυθμού αποδιέγερσης των ραδιενεργών πυρήνων (ενεργότητας ή ραδιενέργειας) στο S.I. είναι το Becquerel (Bq), το οποίο συνίσταται σε μία πυρηνική διάσπαση ή μετασχηματισμό μιας ραδιενεργούς ουσίας ανά δευτερόλεπτο. Παλαιότερη μονάδα ραδιενέργειας είναι το Curie, όπου $1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$, και αντιστοιχεί στη ραδιενέργεια ποσότητας $1 \text{ gr } ^{226}\text{Ra}$. Η ραδιενέργεια του ραδονίου μετρείται συνήθως σε Bq/m³ αέρα (Σεμερτζίδου, 2013, σ. 13; Πατήρης, 2009, σ. 36-37; Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 23). Συγκεκριμένα, 1 Bq/m³ εκφράζει ότι κατά μέσο όρο σε κάθε κυβικό μέτρο αέρα, συμβαίνει μία διάσπαση ενός ατόμου ραδονίου σε κάθε δευτερόλεπτο (Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 80). Ο συνολικός κίνδυνος που διατρέχει ένας ανθρώπινος οργανισμός από την έκθεση σε ραδόνιο εκτιμάται από την *ενεργό δόση*, η οποία προκύπτει από τη μέση απορροφώμενη δόση από έναν βιολογικό ιστό επί έναν ποιοτικό συντελεστή, που αφορά τη σχετική επικινδυνότητα μιας συγκεκριμένης ακτινοβολίας, καθώς και την ευαισθησία ενός συγκεκριμένου οργάνου στην ακτινοβολία αυτή. Μονάδα μέτρησης της ενεργού δόσης είναι το Sievert (Sv). Ως *απορροφώμενη δόση* καλείται η ποσότητα ενέργειας που απορροφάται από οποιοδήποτε σώμα, εξαιτίας της έκθεσής του σε ακτινοβολία, και έχει ως μονάδα μέτρησης το Gray (Gy), όπου $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ (Πατήρης, 2009, σ. 44, 45). Η συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών του στον αέρα συσχετίζονται με την απορροφώμενη δόση από έναν ανθρώπινο οργανισμό μέσω της Δυνητικής Ενέργειας Ακτινοβολίας- α (*Potential Alpha Energy, E_p*), η οποία ορίζεται ως η ολική ενέργεια που απελευθερώνεται από ένα ραδιενεργό πυρήνα με μορφή ακτινοβολίας- α , μεταβαίνοντας από όλα τα στάδια της ραδιενεργού σειράς διάσπασης. Το μέγεθος προκύπτει αθροίζοντας όλα τα ποσά ενέργειας που εκλύονται αποκλειστικά από ακτινοβολία- α , η οποία θεωρείται ότι έχει τις σπουδαιότερες ραδιοβιολογικές επιπτώσεις. Μονάδα μέτρησης της Δυνητικής Ενέργειας Ακτινοβολίας- α στο S.I. είναι το 1 Joule (J), ενώ πολλάκις χρησιμοποιείται και το $1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$. Ένα άλλο μέγεθος, η Δυνητική Συγκέντρωση Ενέργειας Ακτινοβολίας- α (*Potential Alpha Energy Concentration, C_p*) ορίζεται αθροίζοντας τις αντίστοιχες ενέργειες όλων των πυρήνων μέσα σε συγκεκριμένο όγκο, διαιρώντας με τον εν λόγω όγκο. Μονάδα μέτρησης της Δυνητικής Συγκέντρωσης Ενέργειας Ακτινοβολίας- α

στο S.I. είναι το 1 J/m^3 , ενώ πολλάκις χρησιμοποιείται και το 1 MeV/L , που ισούται με $1.6 \cdot 10^{-16} \text{ J/m}^3$. Να τονιστεί ωστόσο, ότι η πιο διαδεδομένη μονάδα μέτρησης της Δυνητικής Συγκέντρωσης Ενέργειας Ακτινοβολίας- α είναι το Επίπεδο Εργασίας (*Working Level, WL*). 1 WL ισοδυναμεί με οποιαδήποτε ποσότητα ραδονίου και θυγατρικών του που συνεπάγεται έκλυση $1.3 \cdot 10^5 \text{ MeV}$ ενέργειας ακτινοβολίας- α σε ένα λίτρο αέρα. Η Έκθεση σε Δυνητική Ενέργεια Ακτινοβολίας- α (*Potential Alpha Energy Exposure, E_a*) ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα της Δυνητικής Συγκέντρωσης Ενέργειας Ακτινοβολίας- α , και έχει ως μονάδα μέτρησης το μηνιαίο επίπεδο εργασίας (*Working Level Month, WLM*). Το WLM αποτελεί μια ποσότητα που περιγράφει την έκθεση σε ραδόνιο ατόμων που εργάζονται σε ορυχεία, και αντιστοιχεί σε έκθεση εργαζόμενου σε περιβάλλον συγκέντρωσης ραδονίου ενός Επιπέδου Εργασίας (*WL*) για χρονικό διάστημα ενός εργάσιμου μήνα. Ένας εργάσιμος μήνας θεωρείται ότι περιλαμβάνει 170 εργάσιμες ώρες, και κατά συνέπεια οι εργάσιμες ώρες αθροίζονται σε 2000 ανά έτος (Πατήρης, 2009, σ. 40, 41, 44). Η σχέση μεταξύ της ιστορικής μονάδας WLM και του S.I. είναι $1 \text{ WLM} = 3.54 \cdot 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{h/m}^3$ (UNSCEAR, 2000, p. 503).

2.2 Πηγές Ραδονίου

Πηγή ραδονίου αποτελεί κάθε εστία όπου παράγεται ραδόνιο, είτε κάθε αφετηρία όπου αυτό διαφεύγει. Διαφοροποίηση μπορεί να υπάρξει μεταξύ πηγών που περιλαμβάνουν ράδιο-226 (^{226}Ra) -που αποτελεί μητρικό ισότοπο του ραδονίου- και οι οποίες παράγουν διαρκώς ραδόνιο όσο περιέχουν ^{226}Ra , και πηγών που είναι απλώς εμπλουτισμένες με ραδόνιο, λόγω χημικής διάλυσης του τελευταίου. Εκτός από τα ορυκτά και τα πετρώματα, ανάμεσα στις πηγές που περιέχουν ^{226}Ra , ανήκουν το **έδαφος** και **υλικά προερχόμενα από αυτό**, ενώ στις πηγές που είναι απλώς εμπλουτισμένες σε ραδόνιο ανήκουν ο **ατμοσφαιρικός αέρας** και το **φυσικό αέριο**. Ενδιάμεση κατηγορία μπορούν να θεωρηθούν τα **επιφανειακά** αλλά και **υπόγεια ύδατα**, τα οποία παράγουν ραδόνιο εξαιτίας της περιεκτικότητάς του σε ^{226}Ra , ενώ ταυτόχρονα εμπλουτίζονται με ραδόνιο λόγω διάλυσης αυτού από πηγές όπως το έδαφος (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 75).

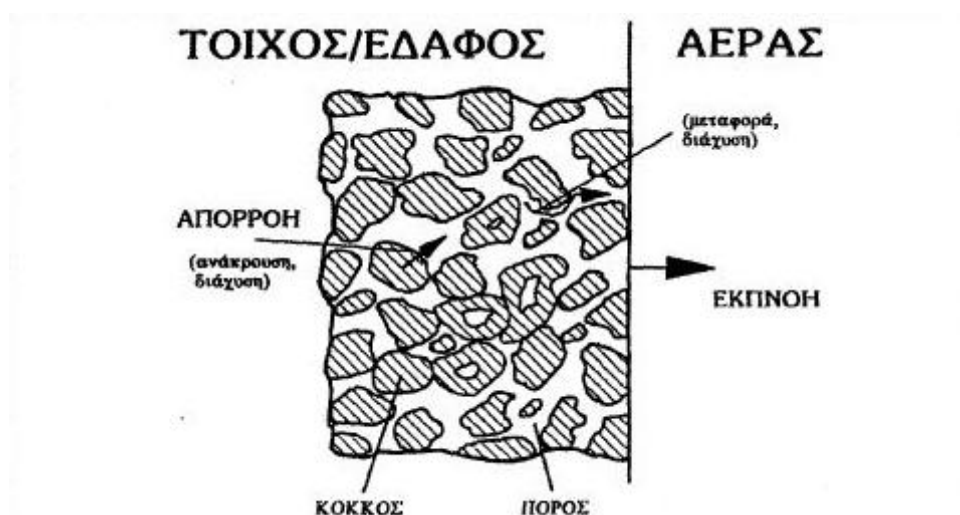
2.2.1 Έδαφος και Οικοδομικά Υλικά

Το ραδόνιο, Rn-222 (ή αλλιώς ^{222}Rn), όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι αέριο που προέρχεται από διασπάσεις του ουρανίου U-238 , το οποίο απαντάται σε ορισμένα εδάφη ως φυσική ραδιενέργεια, έχοντας ως αποτέλεσμα η εκροή του ραδονίου από το έδαφος να μην υπόκειται σε ανθρωπογενείς παράγοντες. Εκροή ραδονίου μπορεί να λάβει χώρα επίσης και μέσω

οικοδομικών υλικών από πρώτες ύλες που προέρχονται από εδάφη με φυσική ραδιενέργεια, λόγω της ύπαρξης U-238 (Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 13). Το ραδόνιο που παράγεται από την α -ραδιενεργό διάσπαση πυρήνων Ραδίου Ra-226, ως ευγενές αέριο, δεν σχηματίζει χημικούς δεσμούς, αλλά διαχέεται (εκρέει) προς την επιφάνεια του οικοδομικού υλικού και τελικά στην ατμόσφαιρα. Οι πυρήνες αυτοί του ^{226}Ra που απαντώνται στη φύση, αλλά και σε αρκετά οικοδομικά υλικά, συνδέονται ορυκτολογικά με τη δομή κάποιου στερεού υλικού, το οποίο μπορεί να είναι φυσικό, για παράδειγμα ένα πέτρωμα, είτε ανθρωπογενές, όπως είναι η τέφρα ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού (Καράγγελος, 2008, σ. 388, 407).

Το έδαφος στο οποίο θεμελιώνονται τα κτήρια, καθώς και οι τοίχοι των κτηρίων αποτελούν πορώδη υλικά, περιέχουν δηλαδή διάκενα, με διαφορετικό πορώδες έκαστο, στους κόκκους των οποίων απαντάται το Ra-226. Μετά τη διάσπαση του ^{226}Ra παράγεται το ^{222}Rn , το οποίο αποσπάται από τους κόκκους και εισέρχεται στο χώρο των πόρων του υλικού με τη διαδικασία της **απορροής**. Η απορροή ως φαινόμενο, συμβαίνει λόγω *ανάκρουσης* του πυρήνα του ραδονίου έχοντας κινητική ενέργεια 86 keV μετά τη διάσπαση του ραδίου-226, και μέσω *διάχυσης* του ραδονίου από τους κόκκους (Στούλος, 1998, σ. 3, 4). Το εύρος του μήκους ανάκρουσης του ραδονίου στους κόκκους ορυκτών λαμβάνει τιμές από 20 έως 70 nm, στον αέρα είναι περίπου 63 μm , ενώ στο νερό ή άλλα υγρά είναι περίπου 0.1 μm (Tanner, 1980). Ο ανακρουόμενος πυρήνας, αναλόγως την κινητική του ενέργεια, καθώς και το υλικό του κόκκου όπου δημιουργείται, δύναται: (α) να διασχίσει τον εν λόγω κόκκο, και ακολούθως να πορευτεί στο ρευστό μέρος του όγκου του εδαφικού πορώδους, το οποίο είναι κατά κύριο λόγο νερό, τερματίζοντας τη διαδρομή του σε αυτό, (β) να διασχίσει τον κόκκο στον οποίο παράχθηκε, και να προχωρήσει σε γειτνιάζοντα κόκκο, ολοκληρώνοντας την πορεία του σε αυτόν, χωρίς να περάσει μέσα από διάκενα, (γ) να διασχίσει τον κόκκο στον οποίο παράχθηκε, και να διεισδύσει σε γειτονικό κόκκο, τελειώνοντας τη διαδρομή του σε αυτόν, περνώντας από ενδιάμεσο πόρο, και (δ) να παραμείνει στον κόκκο όπου και δημιουργήθηκε, περατώνοντας τη διαδρομή του μέσα σε αυτόν (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 76; Πατήρης, 2009, σ. 47-48). Στην (α) περίπτωση όπου το ραδόνιο έχει τερματίσει τη διαδρομή του στο ρευστό μέρος του πορώδους, γίνεται εύκολα διάχυση αυτού στο περιβάλλον. Στις (β) και (γ) περιπτώσεις η κινητική ενέργεια που φέρει το ραδόνιο είναι αρκετή ώστε να μετακινηθεί σε γειτνιάζοντα κόκκο, όπου και παραμένει εγκλωβισμένο. Στη (δ) περίπτωση το ραδόνιο απελευθερώνεται σε απαγορευτικό βάθος, μέσα στον κόκκο του εδαφικού υλικού (Πατήρης, 2009, σ. 48). Η διαφυγή του ^{222}Rn μέσα από τους κόκκους όπου παράγεται εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες αυτών και του εδάφους ή των τοίχων, όπως

είναι το μέγεθος και η δομή των κόκκων, το πορώδες και η υγρασία του υλικού (Σεφτελής, 2007, σ. 25). Η υγρασία που εμπεριέχεται στα οικοδομικά υλικά είναι κατά κύριο λόγο αρκετά μικρότερη από την υγρασία του εδάφους. Συγχρόνως, ο ρυθμός με τον οποίο θα εισέλθει το ραδόνιο από τα οικοδομικά υλικά προς το εσωτερικό κτηρίου **εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό και από τη μόνωση στις επιφάνειες των τοίχων και των δαπέδων** (Πατήρης, 2009, σ. 54). Το ραδόνιο, μέσω της κίνησης εντός των πόρων του υλικού, διαφεύγει από την επιφάνεια του οικοδομικού υλικού και εισέρχεται στην ατμόσφαιρα του κτηρίου με τη διαδικασία της **εκπνοής**. Ταυτόχρονα, το ραδόνιο του εδάφους επίσης διεισδύει στο κτήριο μέσω της θεμελίωσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση ύπαρξης υπόγειων φρεατίων, είτε ρωγμών που έχουν προκληθεί από σεισμούς στο παρελθόν, εξαιτίας της διαφοράς στην πίεση ανάμεσα στο έδαφος και στο κτήριο (Στούλος, 1998, σ. 3, 7).



Εικόνα 3: Μηχανισμοί απορροής & εκπνοής ραδονίου από το έδαφος ή τοίχους κτηρίων. (Πηγή: Στούλος, 1998, σ. 3)

Η μεταφορά του ραδονίου από το έδαφος στην ατμόσφαιρα είτε στο εσωτερικό μιας κατοικίας συμβαίνει κυρίως με *μοριακή διάχυση*, ακολουθώντας τον 1^ο νόμο του Fick:

$$J_d = -D_m \nabla C, \text{ όπου:}$$

J_d ($\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s}$) η πυκνότητα ροής του ραδονίου που μεταφέρεται λόγω διάχυσης στα πορώδη τμήματα των υλικών,

D_m (m^2/s) ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, και

∇C ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}/\text{m}$) η μεταβολή της συγκέντρωσης ραδονίου στις πορώδεις περιοχές συναρτήσει της απόστασης (Baskaran, 2016, p. 7; Πατήρης, 2009, σ. 49).

Η διάχυση αποτελεί διεργασία με την οποία μεταφέρεται μάζα από ένα σημείο στο επόμενο, εξαιτίας της τυχαίας κίνησης των μορίων. Ο ρυθμός μεταφοράς του ραδονίου στο έδαφος

αναμένεται να είναι αργός σε σύγκριση με τη μεταφορά του σε ομοιογενές περιβάλλον, όπως είναι ο καθαρός αέρας, για δύο λόγους: (α) της δαιδαλώδους διαδρομής ροής γύρω από τα σωματίδια, και (β) του σχετικά μικρότερου όγκου ρευστού. Έχοντας υπόψη αυτούς τους δύο παράγοντες, η πυκνότητα ροής του ραδονίου δίδεται από τη σχέση: $J_d = -n_s \tau D_m \nabla C$, όπου:

n_s : το πορώδες του εδάφους ή του υλικού, που εκφράζει το λόγο του όγκου των πόρων προς το συνολικό όγκο του υλικού, και

τ : το δαιδαλώδες των πόρων (Baskaran, 2016, p. 7).

Εξαιτίας του μικρού χρόνου ημιζωής του ραδονίου, η μοριακή του διάχυση στο έδαφος γενικά είναι μικρή, ενώ είναι ακόμη μικρότερη σε εδάφη με μεγάλα ποσοστά υγρασίας. Αναλόγως τον τύπο του εδάφους, και για εμπεριεχόμενη υγρασία έως κάποια συγκεκριμένη τιμή, επικρατεί η εκπομπή ραδονίου λόγω της ανάκρουσης, εξαιτίας της οποίας δύναται να αυξηθεί ο ρυθμός εκπομπής κατά 50% έως 250%. Εφόσον συμβεί υπέρβαση της συγκεκριμένης ποσότητας υγρασίας, λαμβάνει χώρα μείωση της διάχυσης, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση του εκπεμπόμενου ραδονίου (Οικονομόπουλος, 2008, σ. 32).

Ένας δεύτερος μηχανισμός μεταφοράς του ραδονίου είναι η *μεταγωγή ή συμμεταφορά* (advection), λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ του εσωτερικού ενός κτηρίου και της εξωτερικής ατμόσφαιρας, που λαμβάνει χώρα εξαιτίας μεταβολών:

- (a) της θερμοκρασίας ΔT ,
- (b) της ταχύτητας των ανέμων,
- (c) της βαρομετρικής πίεσης ΔP_B εντός των πόρων του οικοδομικού υλικού, και
- (d) των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

Η πυκνότητα ροής του ραδονίου εξαιτίας της μεταγωγής, J_t (Bq/m²·s), λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ των εσωτερικών τοίχων ενός κτηρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντα χώρου, δίδεται από την σχέση: $J_t = \vec{V} \cdot \vec{C}$, όπου:

\vec{V} (m/s) η ταχύτητα ροής ανά μονάδα επιφανείας του τοίχου, και

C (Bq/m³) η συγκέντρωση ραδονίου των πόρων των τοίχων.

Η ταχύτητα ροής υπολογίζεται από το νόμο του Darcy, ως εξής: $\vec{V} = -\frac{k}{\mu} \nabla P_z$, όπου:

k (m²) η ειδική διαπερατότητα των τοίχων,

μ (kg/m·s) το δυναμικό ιξώδες του ρευστού των πόρων, και

∇P_z [N/(m²·m)] η μεταβολή της πίεσης του ρευστού εντός των πόρων του τοίχου συναρτήσει της απόστασης (Στούλος, 1998, σ. 5-6), όπου $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$.

Παρακάτω θα αναλυθούν λεπτομερέστερα οι διεργασίες εξαιτίας των οποίων λαμβάνει χώρα ο φυσικός μηχανισμός της μεταγωγής ή συµμεταφοράς του ραδονίου στο εσωτερικό ενός κτηρίου.

a) Μεταβολές στη Θερμοκρασία

Υποθέτοντας έναν τοίχο που διαχωρίζει δύο αέριες μάζες με διαφορετικές θερμοκρασίες, το αποτέλεσμα είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο αντίστοιχων σημείων, εσωτερικά και εξωτερικά του τοίχου. Η διαφορά πίεσης είναι συνάρτηση του ύψους από το έδαφος και λαμβάνει χώρα εξαιτίας της συμπίεστικότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, αλλά και λόγω μεταβολής της πυκνότητας του αέρα με τη θερμοκρασία. Για τοίχο ύψους H , που διαχωρίζει δυο διακριτές αέριες μάζες με θερμοκρασίες T_i και T_0 αντίστοιχα, οι οποίες ακολουθούν τις αρχές των ιδανικών αερίων, σε μια στατική κατάσταση, η πίεση σε συνάρτηση του ύψους για κάθε αέρια μάζα, θα δίδεται από τη σχέση: $P = P_0 \cdot e^{-mgz/RT}$, όπου:

P_0 : η πίεση σε ύψος $z=0$,

m : το γραμμομοριακό βάρος του αέρα (0.029 kg/mol),

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s²),

R : η παγκόσμια σταθερά των αερίων (8.31 J/mol·°K), και

T : η θερμοκρασία (°K).

Θεωρώντας z_0 το ύψος στο οποίο οι πιέσεις εντός και εκτός του τοίχου εξισώνονται, τότε η διαφορά πίεσης σε συνάρτηση του ύψους δίδεται από τη σχέση:

$$\Delta P(z) \approx a \left[\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_0} \right] (z - z_0), \text{ όπου:}$$

$a = 3454 \text{ Pa} \cdot \text{°K/m}$. Σε συνήθειες συνθήκες η διαφορά πίεσης, $\Delta P(z)$, είναι σχεδόν ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην εσωτερική και εξωτερική παρειά του τοίχου (Βογιάννης, 2005, σ. 17-18; Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 84).

b) Κίνηση του ανέμου

Βάσει ρευστομηχανικής, τόσο εγκάρσια, όσο και κατά μήκος μιας γραμμής ροής ενός κινούμενου ρευστού σημειώνεται διαφορά πίεσης. Εγκάρσια στη γραμμή ροής, οι οδηγούσες δυνάμεις είναι κάθετες, δημιουργώντας στροβίλους, γεγονός που εξηγείται από τη φυσική της υδροδυναμικής. Κατά μήκος της γραμμής ροής η διαφορά πίεσης εξηγείται από την αρχή διατήρησης της ενέργειας, που εκφράζεται μέσω της γενικευμένης εξίσωσης του Bernoulli. Για παράδειγμα, στην περίπτωση αέρα που κινείται (φυσά) προς τον τοίχο ενός κτηρίου, εάν αγνοηθεί η τριβή με το έδαφος και θεωρηθεί ότι όταν φτάσει στον τοίχο η ταχύτητα του ρεύματος αέρα είναι μηδενική, τότε η μεταβολή στην πίεση (πίεση στον τοίχο μείον την πίεση στο ρεύμα αέρος) δίδεται από τη σχέση:

$$\Delta P_0 = \frac{1}{2} \rho v^2, \text{ όπου:}$$

ΔP_0 (Pa) η διαφορά πίεσης τοίχου-αέρα,

ρ (kg/m³) η πυκνότητα του αέρα, και

v (m/s) η ταχύτητα αέρα.

Η γενικευμένη εξίσωση Bernoulli που παρουσιάστηκε ισχύει υπό την προϋπόθεση κίνησης αέρα προς τον τοίχο ενός κτηρίου αγνοώντας την τριβή με το έδαφος, καθώς και θεωρώντας μηδενική ταχύτητα του ρεύματος αέρα στον τοίχο, συνθήκες δηλαδή που αποκλίνουν απ' τις πραγματικές. Συνήθως οι άνεμοι ρέουν προς τους τοίχους κτηρίων πλαγίως, το ύψος ενός κτηρίου είναι συγκριτικά μικρό για να μη ληφθεί υπόψη η συμμετοχή του εδάφους στη μείωση της ταχύτητας του ανέμου, και τα κτήρια συχνά εμποδίζονται από κάποιου είδους βλάστηση ή άλλες δομές (Βογιάννης, 2005, σ. 16-17; Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 83). Ως αποτέλεσμα, τοποθετήθηκε διορθωτικά στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_d (Riley *et al.*, 1996), όπως φαίνεται παρακάτω: $\Delta P = C_d \frac{1}{2} \rho v^2$.

Μια αντιπροσωπευτική τιμή συντελεστή οπισθέλκουσας είναι $C_d=0.4$. Να επισημανθεί ότι ο άνεμος δύναται να προκαλέσει ταχύτατες μεταβολές στην πίεση στην εδαφική επιφάνεια, και συνακόλουθα σε τοίχους κτηρίων. Ο χρόνος για να μεταφερθεί μια διαταραχή της πίεσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_P = \frac{L_P^2}{D_P}, \text{ όπου:}$$

τ_p: ο χαρακτηριστικός χρόνος για να μεταφερθεί μια διαταραχή της πίεσης σε απόσταση L_p, και D_p: σταθερά, χαρακτηριστική του είδους του εδάφους, που αντιστοιχεί στον αντίστοιχο συντελεστή διάχυσης (Βογιάννης, 2005, σ. 16-17; Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 83).

c) Βαρομετρικές αλλαγές στην ατμόσφαιρα

Η βαρομετρική πίεση μεταβάλλεται σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ό,τι λαμβάνουν χώρα μεταβολές στην πίεση λόγω της κίνησης του ανέμου ή λόγω αλλαγής της θερμοκρασίας, με τιμές μεγαλύτερες των 100 Pa. Οι βαρομετρικές αλλαγές έχουν ως αποτέλεσμα τη διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού αέρα ενός κτηρίου και του αέρα στους πόρους του γειτνιάζοντος εδάφους, προκαλώντας μεταβολές στη συγκέντρωση του ²²²Rn στο εσωτερικό του κτηρίου.

d) Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Ένα ισχυρό καταιγιδόφωρο συμβάν μπορεί να είναι η αφορμή για την είσοδο του ²²²Rn στο εσωτερικό ενός κτηρίου, καθώς το νερό –όπως και το έμβολο- εκτοπίζει τον αέρα του εδάφους, οδηγώντας τον σε στεγνές περιοχές κάτω από το κτήριο (Βογιάννης, 2005, σ. 18; Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 84).

Ο συνηθέστερος μηχανισμός μεταφοράς ραδονίου από τα δομικά υλικά στους εσωτερικούς χώρους είναι η μοριακή διάχυση, καθώς η πλειονότητα των οικοδομικών υλικών χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα μικρή διαπερατότητα, έχοντας ως αποτέλεσμα η μεταφορά ραδονίου λόγω συµμεταφοράς να θεωρείται μηδαμινή (Πατήρης, 2009, σ. 54).

Τα εδάφη που δύνανται να παράγουν υψηλές ποσότητες ραδονίου, εξαιτίας των υψηλών συγκεντρώσεων σε ράδιο, είναι αυτά που περιλαμβάνουν πυριγενή πετρώματα, όπως οι γρανίτες και τα μάρμαρα, ηφαιστειακά πετρώματα, καθώς επίσης και εκείνα τα λιγνιτικά κοιτάσματα που από τη φύση της δημιουργίας του διαθέτουν υψηλά επίπεδα ραδίου. Αξίζει επίσης να τονιστεί ότι αυξημένους ρυθμούς εκροής ραδονίου προκαλούν εδάφη που έχουν μολυνθεί από παραπροϊόντα εξόρυξης, εμπλουτισμού, είτε περαιτέρω επεξεργασίας κοιτασμάτων ουρανίου (Νικολόπουλος, 2000, σ. 19). Για τις μικρές κατασκευές, όπως τα ισόγεια κτήρια, η σημαντικότερη πηγή εισόδου ραδονίου στο κτίσμα είναι το έδαφος (Βογιάννης, 2005, σ. 18).

Σε ό,τι αφορά οικοδομικά υλικά όπως για παράδειγμα τα τσιμέντα υψηλής περιεκτικότητας σε ιπτάμενη τέφρα, ελαφρόπετρα ή άλλα ηφαιστειογενή πετρώματα, αυτά εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις ραδίου, καθότι εν γένει συνίσταται αυξημένη η φυσική ραδιενέργεια που απαντάται σε τέφρα και ηφαιστειακά υλικά. Επίσης, δομικά υλικά όπως οι οπτόπλινθοι

και το σκυρόδεμα, εφόσον είναι κατασκευασμένα από πρώτες ύλες προερχόμενες από εδάφη υψηλής περιεκτικότητας σε ράδιο, θα παρουσιάζουν και αυτά υψηλές συγκεντρώσεις ραδίου (Νικολόπουλος, 2000, σ. 19). Να επισημανθεί, ότι η συνεισφορά των οικοδομικών υλικών στην είσοδο του ραδονίου εντός ενός κτηρίου είναι εντονότερη στους ορόφους, και ιδιαίτερα άνω του δευτέρου. Ειδικά για τη χώρα μας, η συνεισφορά των υλικών οικοδόμησης στη συνολική συγκέντρωση του ραδονίου, είναι μικρή (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 84).

2.2.2 Ατμοσφαιρικός αέρας

Στον ατμοσφαιρικό αέρα, οι συγκεντρώσεις ραδονίου μπορούν γενικά να θεωρούνται αμελητέες, καθότι τα αέρια ρεύματα και οι μετακινήσεις αέριων μαζών δεν αφήνουν περιθώριο συσσώρευσής του (Πατήρης, 2009, σ. 46). Έως πριν από μερικά χρόνια, οι μέσες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα λαμβάνονταν ίσες με 4-15 Bq/m³ στις Η.Π.Α., ενώ στις μέρες μας έχουν καταμετρηθεί συγκεντρώσεις αρκετών δεκάδων Bq/m³ (Bohicchio *et al.*, 1995, p. 4). Η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας τείνει να προκαλεί κάποια ατμοσφαιρική αναταραχή, έχοντας ως αποτέλεσμα το ραδόνιο να μεταφέρεται εύκολα προς τα επάνω και μακριά από το έδαφος. Αντίθετα, τη νύχτα και τις πρώτες πρωινές ώρες συχνά εντοπίζονται συνθήκες ατμοσφαιρικής θερμοκρασιακής αναστροφής, οι οποίες τείνουν να παγιδεύουν το ραδόνιο πιο κοντά στο έδαφος. Συνεπώς, οι συγκεντρώσεις ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα ποικίλουν ημερησίως. Επίσης, έχουν διαπιστωθεί και εποχιακές διακυμάνσεις στο ραδόνιο του ατμοσφαιρικού αέρα, που σχετίζονται με τις επιδράσεις των βροχοπτώσεων ή με αλλαγές στους επικρατούντες ανέμους (UNSCEAR, 2000, p. 103). Πηγή του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι κυρίως το έδαφος. Το ραδόνιο, κατά την κίνησή του στην ατμόσφαιρα διασπάται, με τα προϊόντα διάσπασής του να προσκολλώνται στα ατμοσφαιρικά σωματίδια (αερολύματα), τα οποία στη συνέχεια μετασχηματίζονται (Στούλος, 1998, σ. 88). Πολύ υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου στον υπαίθριο αέρα έχουν διαπιστωθεί κοντά σε αποθέσεις ορυχείων, είτε σε περιπτώσεις θερμοκρασιακών αναστροφών ή εποχές χαμηλών βροχοπτώσεων (Bohicchio *et al.*, 1995, p. 4-5). Άνω των ωκεανών, ο ατμοσφαιρικός αέρας παρουσιάζει πολύ χαμηλές τιμές συγκέντρωσης ραδονίου, περίπου 0.1 Bq/m³, εξαιτίας μιας εξαιρετικά μικρής συγκέντρωσης ραδίου στο θαλασσινό νερό, αλλά και λόγω της υψηλής διαλυτότητας που επιδεικνύει το ραδόνιο στο νερό υπό χαμηλές θερμοκρασίες. Ως συνεπαγόμενο αποτέλεσμα, η συγκέντρωση ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα νησιών και παράκτιων περιοχών είναι γενικά χαμηλότερη από εκείνη των ηπειρωτικών περιοχών (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 78). Κατά τον UNSCEAR 1993, p. 48, εκτιμάται ότι η παγκόσμια μέση τιμή της συγκέντρωσης

ραδονίου στην ατμόσφαιρα, είναι **10 Bq/m³** για τις ηπειρωτικές περιοχές, και λίγο λιγότερο για τις παράκτιες περιοχές, με παλαιότερη εκτίμηση τα 5 Bq/m³.

2.2.3 Φυσικό αέριο

Μια πηγή εμπλουτισμένη σε πιθανώς αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίων αποτελεί **το φυσικό αέριο** για θέρμανση και οικιακή χρήση, καθώς μεταφέρει το ραδόνιο που απορρέει από τα πετρώματα του κοιτάσματος φυσικού αερίου στο εσωτερικό των κατοικιών, μέσω των αγωγών μεταφοράς (Στούλος, 1998, σ. 3). Η απελευθέρωση του ραδονίου επιτυγχάνεται με την καύση του φυσικού αερίου. Βέβαια, να σημειωθεί ότι το φυσικό αέριο συνήθως δεν αποτελεί ανησυχητική πηγή ραδονίου, καθώς συχνά διεξάγεται έλεγχος στις γραμμές μεταφοράς φυσικού αερίου, αλλά και στα κέντρα διανομής αυτού. Για το φυσικό αέριο, η τυπική τιμή συγκέντρωσης ραδονίου είναι τα 1000 Bq/m³, ενώ η προέλευσή του εντοπίζεται με δυσκολία, καθώς το φυσικό αέριο αντλείται κατά κανόνα από αρκετά πηγάδια σε πολλά διαφορετικά μέρη. Ως αποτέλεσμα, η συγκέντρωση ραδονίου στο φυσικό αέριο μεταβάλλεται με το χρόνο, συναρτήσει των ποσοστών του από τις διαφορετικές πηγές προέλευσης αυτού (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 79).

2.2.4 Επιφανειακά & Υπόγεια Ύδατα

Οι άνθρωποι μπορούν να εκτεθούν σε ραδόνιο, μέσω του νερού της βρύσης, από την κατάποση πόσιμου νερού, καθώς και από την εισπνοή ραδονίου που εκλύεται στον αέρα με τη χρήση του νερού (UNSCEAR 2000, p. 108). Η διαλυτότητα του ραδονίου στο νερό είναι 510 cm³/L στους 0 °C, μειώνεται σε 220 cm³/L στους 25 °C, και σε 130 cm³/L στους 50 °C. Οι συγκεντρώσεις του ραδονίου στο νερό διαφέρουν σημαντικά. Τα επιφανειακά νερά παρουσιάζουν μικρότερες συγκεντρώσεις ραδονίου, σε σχέση με τα υπόγεια, αλλά μεγαλύτερης μεταβλητότητας (UNSCEAR, 1993, p. 45, 48, 49). Οι χαμηλές συγκεντρώσεις ²²²Rn στα επιφανειακά ύδατα ερμηνεύεται από το γεγονός ότι μέρος αυτού μπορεί να διαφύγει στην ατμόσφαιρα προτού διασπαστεί. Στα βαθύτερα ύδατα του Ειρηνικού και Ατλαντικού Ωκεανού έχουν διαπιστωθεί μεγάλες διαφορές στη δραστηριότητα του ²²²Rn, πιθανώς οφειλόμενη στις μεγάλες διαφορές στη συγκέντρωση της στήλης νερού σε ²²⁶Ra. Συγκεκριμένα, έχει διαπιστωθεί ότι οι δραστηριότητες του ²²⁶Ra στα βαθιά ύδατα του Ισημερινού και του Βορειοδυτικού Ειρηνικού Ωκεανού είναι περίπου 2-3 φορές υψηλότερες από εκείνες του Βορειοδυτικού Ατλαντικού (Baskaran, 2016, p. 121, 124). Οι υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου στο νερό συσχετίζονται συνήθως με βαθιά πηγάδια άντλησης σε περιοχές με γρανιτικά πετρώματα. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις που έχουν αναφερθεί στο

νερό είναι 14 MBq/m³ στον Καναδά, 77 MBq/m³ στη Φινλανδία, και περίπου 20 MBq/m³ στις Η.Π.Α. Υποστηρίζεται ότι το 1% έως 10% του παγκόσμιου πληθυσμού καταναλώνει νερό, προερχόμενο από πηγάδια σχετικά μεγάλου βάθους, που περιέχει συγκεντρώσεις ραδονίου της τάξης των 100 kBq/m³ ή υψηλότερες (UNSCEAR, 1988, p. 69). Η κατανομή των συγκεντρώσεων ραδονίου προσεγγίζει καλά την κανονική λογαριθμική, με μέση συγκέντρωση στο νερό παγκοσμίως να εκτιμάται στα 10000 Bq/m³ (UNSCEAR, 1993, p. 49). Οι εκτιμήσεις σχετικά με την ετήσια αποτελεσματική δόση που απορροφάται από έναν ενήλικα κατά την κατάποση νερού που περιέχει 1000 Bq/L ραδονίου, κυμαίνονται μεταξύ 0.2 mSv και 1.8 mSv, αναλόγως την ετήσια κατανάλωση νερού και το φάσμα των χρησιμοποιούμενων συντελεστών ισορροπίας ραδονίου και θυγατρικών του. Εκτιμάται επίσης ότι τα 1000 Bq/L ραδονίου στο νερό βρύσης θα αυξήσουν κατά μέσο όρο τη συγκέντρωση ραδονίου εσωτερικού αέρα κατά 100 Bq/m³ (EC, 2001). Στα νοικοκυριά, υπάρχουν χρήσεις του νερού που οδηγούν σε μεγάλα ποσοστά διαφυγής διαλυμένου ραδονίου στον εσωτερικό χώρο, για παράδειγμα από τα πλυντήρια, ενώ από άλλες χρήσεις διαφεύγει σε μικρότερες συγκεντρώσεις. Ο υπολογισμός, κατά μέσο όρο, της αύξησης της συγκέντρωσης του ²²²Rn στο εσωτερικό ενός χώρου εξαιτίας του νερού, γίνεται με εφαρμογή ισοζυγίου μάζας, από τη σχέση:

$$C_a = \frac{C_w W e}{V \lambda_v}, \text{ όπου:}$$

C_a (Bq/m³) η αύξηση της συγκέντρωσης ²²²Rn στον αέρα,

C_w (Bq/m³) η συγκέντρωση ²²²Rn στο νερό που εισέρχεται στο χώρο,

W [m³/(person·h)] ο ρυθμός χρήσης νερού ανά ένοικο,

e [-] ο μέσος ισοσταθμισμένος, κατά χρήση νερού, συντελεστής μεταφοράς ²²²Rn στον αέρα,

V (m³/person) ο όγκος αέρα ανά ένοικο, και

λ_v (1/h) ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα στον χώρο της κατοικίας, θεωρώντας ότι είναι αρκετά μεγαλύτερος από τη σταθερά διάσπασης του ²²²Rn (0.0076 h⁻¹) (Βογιάννης, 2005, σ. 18-19). Δεδομένου ότι το ραδόνιο είναι ευγενές αέριο και δεν αντιδρά με τα στερεά, σχεδόν το 100% του ραδονίου που απελευθερώνεται στα υπόγεια ύδατα παραμένει σε διαλυμένη φάση. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου στα υπόγεια ύδατα συχνά ποικίλλουν έως και 5 τάξεις μεγέθους. Η μεταβολή της γραμμομοριακής συγκέντρωσης του ²²²Rn σε σύστημα υπόγειων υδάτων είναι ίση με: [εισροή λόγω συμμεταφοράς + εισροή λόγω καιρικών συνθηκών + εισροή λόγω ανάκρουσης + παραγωγή μέσω διάσπασης του ²²⁶Ra - ραδιενεργή διάσπαση]. Το ραδόνιο

στα υπόγεια ύδατα δεν εκροφάται, δεν προσροφάται στους κόκκους των ορυκτών και δεν καθιζάνει (Baskaran, 2016, p. 167-169). Όταν το ραδόνιο εκλύεται από το έδαφος προς τους γεμάτους με νερό πόρους του, παραμένει στους πόρους αυτούς, καθώς είναι μικρό το μήκος διάχυσής του στο νερό προτού γίνει διάσπαση. Ειδικά στην περίπτωση που τα υπόγεια ύδατα κινούνται με γρήγορο ρυθμό, καθίσταται δυνατή η διαφυγή σημαντικής ποσότητας ραδονίου από κάποιο πέτρωμα. Ταυτόχρονα, η παρουσία υπόγειων υδάτων στις ρωγμές του υποβάθρου συνεπάγεται συχνά συγκεντρώσεις ραδονίου αρκετά υψηλότερες από αυτές του περιβάλλοντος πετρώματος (Οικονομόπουλος, 2008, σ. 42). Από έρευνες στα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει διαπιστωθεί ότι οι συγκεντρώσεις ραδονίου στα υπόγεια ύδατα κυμαίνονται από 1 έως 50 Bq/L για τους υδροφόρους ορίζοντες σε ιζηματογενή πετρώματα, από 10 έως 300 Bq/L για πηγάδια που αντλούν νερό από το έδαφος, και από 100 έως 50000 Bq/L σε κρυσταλλικούς βράχους (EC, 2001). Οι συγκεντρώσεις ^{222}Rn στα υπόγεια ύδατα γενικά, παρατηρούνται σε εύρος συνήθως από 10 έως 200 Bq/L, ενώ σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις, μεγαλύτερες από 1000 Bq/L, συχνά εμφανίζονται, όπως ήδη αναφέρθηκε, σε περιοχές με γρανίτες, που είναι πλούσιοι σε ουράνιο. Υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου στο υπόγειο νερό δύνανται επίσης να εμφανιστούν σε περιοχές με πηγματίτες, γνεύσιους, καθώς και σε ηφαιστειακά πετρώματα, με αφθονία σε χαλαζία και αστρίους. Να επισημανθεί ωστόσο, ότι υψηλές περιεκτικότητες πετρωμάτων σε ουράνιο δεν συνεπάγεται υποχρεωτικά υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου στα υπόγεια ύδατα. Συγκεκριμένα, έχει αναφερθεί για την στυπτηρία, που απαντάται σε αργιλικούς σχιστόλιθους, ότι παρά την υψηλή συγκέντρωσή της σε ουράνιο, εν τούτοις στα υπόγεια νερά περιοχών με τέτοια πετρώματα δεν παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου (Βογιάννης, 2005, σ. 27). Εξαιτίας της υψηλής διαλυτότητας του ραδονίου σε νερά χαμηλών θερμοκρασιών, αλλά και της μειωμένης διαλυτότητας αυτού για υψηλότερες θερμοκρασίες, διαπιστώνεται ότι τα θερμά ύδατα των ιαματικών λουτρών, δύνανται να απελευθερώνουν σημαντικές συγκεντρώσεις ραδονίου. Η επιβάρυνση λόγω της εκλυόμενης συγκέντρωσης ραδονίου είναι σημαντική τόσο για τους λουόμενους, όσο και ιδιαιτέρως αυξημένη για τους εργαζόμενους στο χώρο των ιαματικών λουτρών (Νικολόπουλος, 2015, σ. 79).

2.3 Επιπτώσεις του Ραδονίου στον άνθρωπο

Το ραδόνιο αλλά και τα θυγατρικά του ισότοπα, εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της αναπνοής. Λόγω του μεγάλου χρόνου ημίσειας ζωής του ραδονίου σε σχέση με το χρόνο αναπνοής, και επειδή πρόκειται για χημικά αδρανές αέριο, μόνο μια πολύ μικρή

ποσότητα εισπνεόμενου ραδονίου προλαβαίνει να διασπαστεί εντός των πνευμόνων, προτού απομακρυνθεί από τον οργανισμό μέσω της εκπνοής. Συνεπώς, η είσοδος του στον οργανισμό σπάνια συνδέεται με πνευμονικές βλάβες. Ωστόσο, τα θυγατρικά ισότοπα του ^{222}Rn είναι υπεύθυνα για τις κυριότερες επιπτώσεις στο αναπνευστικό σύστημα, και συγκεκριμένα τα τέσσερα βραχύβια θυγατρικά του: **πολόνιο Po-218** (με χρόνο ημιζωής 3.10 min), **μόλυβδος Pb-214** (με χρόνο ημιζωής 26.8 min), **βισμούθιο Bi-214** (με χρόνο ημιζωής 19.9 min) και **πολόνιο Po-214** (με χρόνο ημιζωής 0.1643 ms) έχουν συνδεθεί με αυξημένο κίνδυνο ανάπτυξης καρκίνου του πνεύμονα σε ανθρώπους εκτεθειμένους σε αυτά. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι τα τέσσερα αυτά θυγατρικά του ραδονίου δεν αποτελούν αδρανή αέρια, αλλά χημικώς ενεργά μέταλλα, και ειδικότερα λίγο μετά το σχηματισμό τους προσκολλώνται σε αιωρούμενα σωματίδια, δημιουργώντας ραδιενεργά αερολύματα, τα οποία μέσω εισπνοής επικάθονται στο πνευμονικό επιθήλιο. Στη συνέχεια, διασπώνται εντός των πνευμόνων, με ταυτόχρονη εκπομπή κυρίως σωματιδίων- α , ικανών να προκαλέσουν βλάβες στις ευαίσθητες κυψελίδες του πνεύμονα, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τις πιθανότητες ανάπτυξης καρκίνου (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 25; Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 14; Πατήρης, 2009, σ. 34). Η Δυνητική Ενέργεια Ακτινοβολίας- α που συσχετίζεται με την απορροφώμενη δόση από τον ανθρώπινο οργανισμό για τα 4 βραχύβια προϊόντα διάσπασης του ραδονίου, φαίνεται στον Πίνακα 2.3.1 παρακάτω (ICRP65, 1993, p. 3).

Πίνακας 2.3.1: Δυνητική Ενέργεια Ακτινοβολίας- α ανά άτομο, για τα 4 βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου (Πηγή: ICRP65, 1993, p. 3)

Ραδιονουκλίδιο (θυγατρικό του ^{222}Rn)	Δυνητική Ενέργεια Ακτινοβολίας- α ανά άτομο	
	MeV	J
^{218}Po	13.69	$2.19 \cdot 10^{-12}$
^{214}Pb	7.69	$1.23 \cdot 10^{-12}$
^{214}Bi	7.69	$1.23 \cdot 10^{-12}$
^{214}Po	7.69	$1.23 \cdot 10^{-12}$

Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά τη μοντελοποίηση της διαδρομής εισόδου των θυγατρικών του ραδονίου στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα είναι: α) το αερόλυμα, β) ο ρυθμός αναπνοής του εκτιθέμενου ατόμου, το εισπνεόμενο κλάσμα μέσω της μύτης, η ηλικία και το φύλο του ατόμου που εκτίθεται, γ) τα κύτταρα που έχουν στοχευθεί από τα θυγατρικά του ραδονίου, και δ) οι ρυθμοί απορρόφησης των θυγατρικών του ραδονίου μέσω του πνεύμονα στο αίμα (Mostafa *et al.*, 2015). Η έκθεση σε ραδόνιο αποτελεί τη δεύτερη κύρια αιτία καρκίνου του πνεύμονα μετά το κάπνισμα (ICRP126, 2014, p. 21). Όπως υποδεικνύεται

από την Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις επιπτώσεις της ατομικής ακτινοβολίας, η παγκόσμια μέση ετήσια αποτελεσματική δόση εισπνοής ραδονίου και των θυγατρικών του είναι **1.2 mSv/yr** (UNSCEAR, 2000, p. 5). Η αναλογία των καρκίνων του πνεύμονα που συνδέονται με το ραδόνιο εκτιμάται μεταξύ 3% και 14%, ανάλογα με τη μέση συγκέντρωση ραδονίου στη χώρα που εξετάζεται, καθώς και τη μέθοδο υπολογισμού (WHO, 2009, p. 3). Σε 9 κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η έκθεση σε ραδόνιο στο εσωτερικό κατοικιών εκτιμάται ότι μπορεί να αντιπροσωπεύει περίπου το 9% των θανάτων από καρκίνο του πνεύμονα, καθώς και το 2% όλων των θανάτων από άλλες μορφές καρκίνου. Δεδομένου ότι οι θάνατοι από καρκίνο του πνεύμονα στην Ευρώπη των 25 κρατών-μελών, το 2006, εκτιμήθηκαν να είναι περίπου 236000, τότε κατά προσέγγιση οι 21000 ίσως να προκλήθηκαν από έκθεση σε ραδόνιο στις κατοικίες (EnVIE, 2007, p. 202, 204). Σε επίπεδο κυττάρων, αλλά και μορίων, το ραδόνιο και τα θυγατρικά του προκαλούν κυτταρικό μετασχηματισμό, μεταβολές στη δομή των χρωμοσωμάτων και γονιδιακές μεταλλάξεις (Jostes, 1996).

Ο κίνδυνος εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα που προκαλείται από την έκθεση ανθρώπων σε ραδόνιο εσωτερικών χώρων έχει μελετηθεί σε επιδημιολογικές έρευνες, χρησιμοποιώντας οικολογικό σχεδιασμό και σχέδια ελέγχου ανά περίπτωση. Θετικές τάσεις έχουν παρατηρηθεί σε αρκετές μελέτες. Μία πολύ σημαντική είναι αυτή των Pershagen *et al.* (1994), η οποία περιελάμβανε 586 γυναίκες και 774 άνδρες, ηλικίας 35 έως 74 ετών, με καρκίνο του πνεύμονα που διαγνώστηκε την περίοδο 1980-1984. Ταυτόχρονα μελετήθηκαν άλλες 1380 γυναίκες και 1467 άντρες, ενώ το ραδόνιο μετρήθηκε συνολικά σε 8992 κατοικίες στις οποίες διέμεναν τα άτομα της μελέτης κάποια στιγμή της ζωής του από το 1947. Ελήφθησαν επίσης πληροφορίες σχετικά με συνήθειες καπνίσματος και άλλους παράγοντες κινδύνου για τον καρκίνο του πνεύμονα, με ερωτηματολόγια. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η έκθεση σε ραδόνιο είναι ένας σημαντικός παράγοντας κινδύνου για ανάπτυξη καρκίνου του πνεύμονα στο γενικό πληθυσμό, τόσο σε ανθρακωρύχους όσο και σε κατοίκους. Συγκεκριμένα, ο παρατηρούμενος υπερβάλλον κίνδυνος κατά 11% ανά 2.7 pCi ραδονίου ανά λίτρο για περίοδο 32.5 ετών αντιστοιχεί σε περίσσεια σχετικού κινδύνου καρκίνου του πνεύμονα κατά 3.4% ανά 27 pCi/L (1000 Bq/m³) ετησίως. Σε περίπτωση αποκλεισμού ατόμων που κοιμούνταν κοντά σε ανοιχτό παράθυρο, ο υπερβάλλον κίνδυνος διπλασιάζεται. Στην ίδια έρευνα, για τους ανθρακωρύχους, ο υπερβάλλον κίνδυνος κυμαίνεται από περίπου 0.5 έως 3% ανά μήνα εργασίας, ο οποίος αντιστοιχεί σε ένα εύρος 3-17% ανά 27 pCi/L ετησίως. Πολύ σημαντική είναι και η μελέτη των Wichmann *et al.* (2005), στην οποία αναλύθηκαν συνολικά 2963 περιστατικά καρκίνου του πνεύμονα και

διεξήχθησαν 4232 πληθυσμιακοί έλεγχοι. Οι μετρήσεις ραδονίου, στις κατοικίες στις οποίες έλαβαν χώρα, διήρκεσαν ένα έτος, όπου και διέμενε ο πληθυσμός από 5 έως και 35 έτη πριν τη διεξαγωγή της συνέντευξης. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κάλυψαν κατά μέσο όρο το 70% του χρονικού διαστήματος έκθεσης του πληθυσμού, και βρέθηκε ότι η μέση έκθεση σε ραδόνιο του πληθυσμού που ελέγχθηκε ήταν τα 61 Bq/m³. Η γραμμική αύξηση στην αναλογία πιθανότητας ανά 100 Bq/m³ ήταν 0.10 (στο 95% του διαστήματος εμπιστοσύνης: -0.02 έως 0.30) για όλο τον πληθυσμό, μόνιμο και μη μόνιμο, ενώ 0.14 (στο 95% του διαστήματος εμπιστοσύνης: -0.03 έως 0.55) για τα λιγότερο μετακινούμενα άτομα, αυτά που ζούσαν δηλαδή μόνο σε μία οικία κατά τα τελευταία 5 έως 35 χρόνια. Επιπλέον, όταν οι ερευνητές περιόρισαν το σφάλμα μέτρησης στις συγκεντρώσεις ραδονίου, με περιορισμό του πληθυσμού, διαπίστωσαν ότι οι συντελεστές κινδύνου ήταν γενικά υψηλότεροι. Ταυτόχρονα, σχετικά με την ιστοπαθολογία, ο κίνδυνος για καρκίνωμα μικρών κυττάρων ήταν υψηλότερος από ό,τι για άλλους υποτύπους, όπως αδenoκαρκίνωμα ή καρκίνωμα πλακωδών κυττάρων. Συμπεραίνει κανείς λοιπόν ότι η ανάλυση των ερευνητών αυτών ενισχύει τα στοιχεία που αποδεικνύουν ότι το ραδόνιο εντός των κατοικιών είναι ένας σημαντικός παράγοντας κινδύνου για τον καρκίνο του πνεύμονα.

Επιπλέον υπάρχουν κάποιες αναφορές που συσχετίζουν το ραδόνιο εσωτερικών χώρων με τον κίνδυνο για λευχαιμία. Συγκεκριμένα, στην έρευνα των Eatough and Henshaw (1993) εξακριβώθηκε στατιστικώς σημαντική συσχέτιση ($r=0.75$) μεταξύ της μονοκυτταρικής λευχαιμίας και της συγκέντρωσης ραδονίου ανά κομητεία της Αγγλίας. Σε κυτταρογενετική έρευνα που διεξήχθη από τους Stephan *et al.* (2005), από τους 61 ανθρώπους που διέμεναν σε κατοικίες με επίπεδα εσωτερικού ραδονίου από 80 έως 13000 Bq/m³, διαπιστώθηκε κάποια χρωμοσωμική ανωμαλία, με συχνότητα εμφάνισης δικεντρικών χρωμοσωμάτων και κεντρικών δακτυλίων, εξαρτώμενη από το χρόνο ενσωμάτωσης της συγκέντρωσης ραδονίου, από ≤ 1000 έως και 10000 Bq/(m³·yr), σε 16 άτομα, τα οποία είχαν εκτεθεί σε συγκέντρωση εσωτερικού ραδονίου >5000 Bq/m³. Συγκεκριμένα, οι περισσότερες χρωμοσωμικές ανωμαλίες βρέθηκαν σε σταθερά κύτταρα, συμπεραίνοντας ότι οι ανωμαλίες προκαλούνται σε ιστό που σχηματίζει το αίμα, ενώ ακολούθως μεταδίδονται στο περιφερειακό αίμα.

Παρόλο που δεν υπάρχει αμφιβολία για την καρκινογένεση του ραδονίου και των θυγατρικών του, τουλάχιστον αναφορικά με υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων, υπάρχουν ωστόσο ορισμένες μελέτες που δεν υποδεικνύουν αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου από την έκθεση σε ραδόνιο σε κατοικίες. Μια χαρακτηριστική έρευνα είναι αυτή των Auvinen *et al.* (1996), κατά την οποία δεν εντοπίστηκε γραμμική αύξηση του κινδύνου

εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα λόγω της έκθεσης σε ραδόνιο σε εσωτερικούς χώρους κτηρίων στη Φινλανδία. Ωστόσο οι ερευνητές δεν απέκλεισαν έναν μέτρια αυξημένο κίνδυνο για συγκεντρώσεις 10.8-34.5 pCi/L. Βέβαια, το ποσοστό του πληθυσμού που εκτίθεται σε αυτές τις συγκεντρώσεις στη Φινλανδία είναι 3.6%, γεγονός που συνεπάγεται ένα μέτριο αιτιολογικό κλάσμα. Σε μια άλλη έρευνα, αυτή των Mifune *et al.* (1992), διαπιστώθηκε αρνητική συσχέτιση μεταξύ καρκίνου του πνεύμονα και αυξημένων συγκεντρώσεων ραδονίου σε περιοχή ιαματικών λουτρών της Ιαπωνίας. Ομοίως αρνητική συσχέτιση βρέθηκε από τον Cohen (1990) μεταξύ των ποσοστών καρκίνου του πνεύμονα και αυξημένων επιπέδων ραδονίου σε πολλαπλές κατοικίες των Η.Π.Α. Αντίστοιχα, κατά τη διεξαγωγή πληθυσμιακής έρευνας ελέγχου στο Μιζούρι των Η.Π.Α., από τους Alavanja *et al.* (1994), σε γυναίκες οι οποίες δεν ήταν καπνίστριες, είτε διέκοψαν το κάπνισμα για περισσότερο από 15 έτη, δεν αποδείχθηκε πειστικά η συσχέτιση του καρκίνου του πνεύμονα με την έκθεση σε ραδόνιο στο εσωτερικό κατοικιών. Πιο συγκεκριμένα, το μέγεθος του κινδύνου καρκίνου του πνεύμονα λόγω των επιπέδων ραδονίου που συνήθως απαντώνται στις κατοικίες των Η.Π.Α. φαίνεται χαμηλό. Αν και οι ερευνητές υπογραμμίζουν ότι το ραδόνιο είναι αναμφίβολα καρκινογόνο για τον ανθρώπινο οργανισμό, ωστόσο τονίζουν ότι η μη ανίχνευση συσχέτισης μεταξύ επιπέδων ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίων και καρκίνου του πνεύμονα μπορεί να ερμηνεύεται λόγω περιορισμένου εύρους συγκεντρώσεων ραδονίου, ανακριβών εκτιμήσεων των ιστορικών συγκεντρώσεων ραδονίου, ανακρίβειας στις αναμενόμενες επιδράσεις από υπόγειες εκθέσεις σε ραδόνιο που εκλύεται από ορυχεία, ή είναι απλά τυχαία.

Άλλες μελέτες εξετάζουν την πιθανότητα συσχέτισης του ραδονίου με άλλες μορφές καρκίνου στον ανθρώπινο οργανισμό. Μια τέτοια έρευνα είναι των Kurttio *et al.* (2006), αναφορικά με την πιθανή συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης στο απαντώμενο ραδόνιο στο πόσιμο νερό, από αντλούμενα πηγάδια στη Φινλανδία, και των κινδύνων καρκίνου της ουροδόχου κύστης ή των νεφρών. Στα αποτελέσματά τους ήταν μεν ότι η συγκέντρωση του ραδονίου στα πηγάδια υπερέβη κατά 8% τα επίπεδα των θεσμοθετημένων ορίων, ωστόσο αν και οι άνθρωποι, που καταλάωναν το νερό από τα πηγάδια, ήταν εκτεθειμένοι σε ακτινοβολία, παρ' όλα αυτά, τα στοιχεία για αυξημένο κίνδυνο καρκίνου της ουροδόχου κύστης ή των νεφρών ήταν ελάχιστα.

2.4 Εκτίμηση του κινδύνου έκθεσης σε ραδόνιο

Για να εκτιμηθεί ο κίνδυνος έναντι έκθεσης σε ραδόνιο, απαιτείται αξιόπιστος υπολογισμός της συγκέντρωσης αυτού σε εσωτερικούς χώρους. Για το λόγο αυτό, συνίστανται μετρήσεις

μεγάλης διάρκειας, τουλάχιστον ενός έτους, ώστε οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων από παράγοντες όπως το κλίμα, η μετεωρολογική κατάσταση και ο τρόπος ζωής σε μια κατοικία να μπορούν να υπολογιστούν δεόντως. Οι μετρήσεις μικρής διάρκειας, μόνο λίγων ημερών, οι οποίες συνήθως εκτελούνται με κλειστά παράθυρα και πόρτες, πρέπει να αποφεύγονται, καθώς δύνανται να οδηγήσουν σε σημαντικές υπερεκτιμήσεις της συγκέντρωσης ραδονίου. Επιπρόσθετα, οι μετρήσεις πρέπει να διεξάγονται με κατάλληλα βαθμονομημένα και αξιόπιστα όργανα, ενώ θα πρέπει επιπλέον να εκτελούνται τακτικά διεργαστηριακές καταμετρήσεις (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 10).

Για την εκτίμηση του κινδύνου λόγω έκθεσης σε ραδόνιο χρησιμοποιούνται δοσιμετρικά μοντέλα, είτε διεξάγονται επιδημιολογικές μελέτες των εργαζομένων σε ορυχεία, είτε περατώνονται επιδημιολογικές μελέτες που αφορούν το γενικό πληθυσμό (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 92). Οι μεθοδολογίες αυτές θα αναλυθούν λεπτομερέστερα παρακάτω.

✧ *Εκτίμηση κινδύνου με χρήση δοσιμετρικών μοντέλων*

Η εκτίμηση του κινδύνου λόγω έκθεσης σε ραδόνιο, με χρήση δοσιμετρικών μοντέλων, περιλαμβάνει τα ακόλουθα δύο στάδια:

Στάδιο (I): Γίνεται υπολογισμός της απορροφώμενης δόσης ραδονίου από τους πνεύμονες βάσει πολύπλοκων μοντέλων, στα οποία καταχωρείται η συγκέντρωση του ραδονίου και των προϊόντων διάσπασής του στον αέρα, το ποσοστό αυτών των θυγατρικών ραδιονουκλιδίων που προσκολλάται σε ατμοσφαιρικά αερολύματα, το ποσοστό των ραδιοϊσοτόπων που είναι ελεύθερο, καθώς και διάφορα χαρακτηριστικά και διεργασίες του αναπνευστικού συστήματος. Ως αποτέλεσμα, προσδιορίζεται ένας συντελεστής μετατροπής των συγκεντρώσεων ραδονίου στον αέρα, σε ενεργό ισοδύναμη δόση, με μονάδα μέτρησης τα mSv/(Bq/m³) (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 92). Ο UNSCEAR 1993, p. 53 υπολόγισε τον συντελεστή αποτελεσματικής δόσης, που εκφράζεται ως ισοδύναμη συγκέντρωση ισορροπίας, να έχει την τιμή των 9 nSv/(Bq·h/m³). Οι Bocchicchio *et al.* (1995), p. 12, 13, με αναφορά στην EC, 1990, και στον UNSCEAR, 1993, παραθέτει ως παράγοντες αποτελεσματικής δόσης τις τιμές 0.05 (mSv/yr)/(Bq/m³) και 0.025 (mSv/yr)/(Bq/m³) μέσης ετήσιας συγκέντρωσης ραδονίου αντίστοιχα, για συντελεστή χρήσης εσωτερικού χώρου 0.8 και παράγοντα ισορροπίας 0.4 (UNSCEAR, 1993, p. 37, 51). Για συντελεστή αποτελεσματικής δόσης, λόγου χάρη 0.05 (mSv/yr)/(Bq/m³), καθώς και μέση ετήσια συγκέντρωση ραδονίου 400 Bq/m³, που προτείνεται από την EC (1990) ως το όριο

ανάληψης δράσης για υφιστάμενες κατοικίες, υπολογίζεται αποτελεσματική δόση ίση με 20 mSv/yr.

Στάδιο (II): Η εκτίμηση του κινδύνου που προκύπτει μέσω της απορρόφησης από τον ανθρώπινο οργανισμό μιας συγκεκριμένης ενεργού δόσης ποσοτικοποιείται με δεδομένα επιδημιολογικών μελετών, κυρίως από επιζήσαντες από τη ρίψη ατομικών βομβών, και δευτερευόντως, από ασθενείς αγκυλοποιητικής σπονδυλοαθρίτιδας, καθώς και από το γενικό πληθυσμό σε περιοχές με υψηλή φυσική ραδιενέργεια. Για την ποσοτικοποίηση, στην εκτίμηση κινδύνου δε λαμβάνονται υπόψη δεδομένα από επιδημιολογικές μελέτες εργαζομένων σε ορυχεία ή άλλων πληθυσμών εκτεθειμένων σε ραδόνιο (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 92). Οι Bocchicchio *et al.* (1995), p. 11-13, με αναφορά στην ICRP, 1991, βάσει διαφόρων μελετών, υιοθετούν έναν παράγοντα πιθανότητας ανάπτυξης θανατηφόρου καρκίνου ίσο με $5 \cdot 10^{-5}$, για κάθε mSv αποτελεσματικής δόσης στην οποία εκτίθεται ένας πολίτης του γενικού πληθυσμού. Για αποτελεσματική δόση, λόγου χάρη, ίση με 20 mSv/yr, η ετήσια πιθανότητα γένεσης θανατηφόρου καρκίνου στον πνεύμονα θα είναι 10^{-3} . Η λήψη αυτής της δόσης δημιουργεί 7% πιθανότητα για ανάπτυξη θανατηφόρου καρκίνου στον πνεύμονα σε έναν πολίτη του γενικού πληθυσμού, έπειτα από χρόνια έκθεση σε συγκέντρωση 400 Bq/m³ επί 70 συναπτά έτη.

❖ *Εκτίμηση κινδύνου βάσει δεδομένων από επιδημιολογικές μελέτες σε εργαζόμενους ορυχείων*

Είναι γεγονός ότι οι εργαζόμενοι σε ορυχεία εκτίθενται σε υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. Εδώ και αρκετά χρόνια εκπονούνται επιδημιολογικές μελέτες για την εύρεση συσχετισμού ανάμεσα στην έκθεση εργαζομένων στα ορυχεία σε ραδόνιο και στη δημιουργία καρκίνου στον πνεύμονα (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 92). Οι Bocchicchio *et al.* (1995), p. 11, 13, 14, με αναφορά στα αποτελέσματα μελετών από τον ICRP65 (1993), παραθέτουν πιθανότητα γένεσης θανατηφόρου καρκίνου στον πνεύμονα $0.87 \cdot 10^{-4}$ σε έναν πολίτη από το γενικό πληθυσμό, με χρόνια έκθεση σε 1 Bq/m³ μέσης ετήσιας συγκέντρωσης ραδονίου, κατά τη διάρκεια 70 συναπτών ετών. Η πιθανότητα αυτή προκύπτει έπειτα από διόρθωση των δεδομένων για τα ορυχεία και τους μεταλλωρύχους υψηλών εκθέσεων, προς τις χαμηλές εκθέσεις του αέρα εσωτερικών χώρων και του γενικού πληθυσμού. Για χρόνια έκθεση, λόγου χάρη, σε μέση ετήσια συγκέντρωση 400 Bq/m³ επί 70 συναπτά έτη, για παράγοντα κινδύνου 10^{-4} , υπάρχει 4% πιθανότητα δημιουργίας θανατηφόρου καρκίνου στον πνεύμονα σε έναν πολίτη από το γενικό πληθυσμό.

- ✧ *Εκτίμηση κινδύνου βάσει δεδομένων από επιδημιολογικές μελέτες που αφορούν το γενικό πληθυσμό*

Κύριο μέλημα των επιδημιολογικών μελετών που αφορούν το γενικό πληθυσμό είναι να εξεταστεί εάν η έκθεση των πολιτών σε χαμηλές συγκεντρώσεις ραδονίου συνεπάγεται συσχετισμό, και σε ποιο βαθμό, με την εμφάνιση θανατηφόρου καρκίνου του πνεύμονα. Τέτοιες μελέτες έχουν ήδη πραγματοποιηθεί, ενώ άλλες βρίσκονται σε εξέλιξη. Ωστόσο για την εύρεση κάποιου συσχετισμού, εφόσον αυτός υφίσταται, επιτάσσονται μακροχρόνιες μελέτες, και συγκεκριμένα σε πολύ μεγάλα δείγματα γενικού πληθυσμού, ώστε να εξαχθούν επιστημονικώς τεκμηριωμένα συμπεράσματα (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 93).

2.4.1 Αβεβαιότητες στην εκτίμηση κινδύνου από την έκθεση σε ραδόνιο

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν διάφορες πηγές αβεβαιότητας αναφορικά με την εκτίμηση κινδύνου λόγω της έκθεσης σε ραδόνιο. Σε αυτές περιλαμβάνονται: (α) αβεβαιότητες αναφορικά με την έκθεση σε ραδόνιο, (β) αβεβαιότητες σχετικά με την προσέγγιση δοσιμετρίας, και (γ) αβεβαιότητες σχετικά με την επιδημιολογική προσέγγιση.

- *Αβεβαιότητες αναφορικά με την έκθεση σε ραδόνιο*

Οι αβεβαιότητες σχετικά με την έκθεση σε ραδόνιο οφείλονται τόσο στις τεχνικές μέτρησης, όσο και στη διαδικασία για την εκτίμηση της έκθεσης ανά μεμονωμένο άτομο. Στην πράξη, δεν χρησιμοποιούνται προσωπικοί δοσιμετρητές, αλλά περιβαλλοντικές μετρήσεις και παράγοντες πληρότητας, ώστε να εκτιμηθεί η έκθεση των ατόμων, ιδιαίτερα για μεγάλες χρονικές περιόδους. Οι αβεβαιότητες αναφορικά με την έκθεση συνοψίζονται ως εξής:

- ♦ Τεχνική μετρήσεων

Συνήθως σε μακροχρόνιες μετρήσεις χρησιμοποιούνται οι παθητικοί δοσιμετρητές ιχνών, στους οποίους τα σωματίδια-α που εκπέμπονται από το ραδόνιο και τα θυγατρικά του παράγουν ίχνη, τα οποία και υπολογίζονται. Η συνολική αβεβαιότητα μέτρησης προκαλείται λόγω της βαθμονόμησης των δοσιμετρητών και της επαναληψιμότητας της τεχνικής, ενώ κυμαίνεται συνήθως από 10% έως 30%, εξαρτώμενη από την πραγματική συγκέντρωση ραδονίου και από άλλους παράγοντες.

- ♦ Περίοδος μέτρησης

Για την καλύτερη εκτίμηση της μέσης συγκέντρωσης ραδονίου, συνήθως πραγματοποιούνται ολοκληρωτικές τεχνικές μετρήσεων ενός έτους. Ωστόσο, προκαλείται αβεβαιότητα καθώς τα αποτελέσματα ενδέχεται να διαφέρουν από έτος σε έτος, εξαιτίας, λόγου χάρη, ισχυρών

κλιματικών μεταβολών. Συγχρόνως, τα δοσίμετρα εξακολουθούν να καταγράφουν μετρήσεις ακόμη και όταν οι άνθρωποι απουσιάζουν από μια κατοικία, προκαλώντας διαφοροποιήσεις στον κίνδυνο λόγω της έκθεσης σε συγκεντρώσεις ραδονίου, συγκριτικά με τη διάρκεια της ημέρας κατά την οποία οι άνθρωποι είναι στην οικία τους ή στην εργασία.

- ♦ Αναδρομική εκτίμηση

Σε επιδημιολογικές μελέτες που αφορούν τον έλεγχο περιπτώσεων, απαιτείται αναδρομική εκτίμηση της έκθεσης σε ραδόνιο. Συνήθως, αυτή η εκτίμηση γίνεται βάσει της σημερινής συγκέντρωσης ραδονίου σε όλες τις κατοικίες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εξεταζόμενη περίοδο της μελέτης περίπτωσης. Αυτή η διαδικασία δύναται να προκαλέσει σημαντική απόκλιση, η οποία μπορεί να περιοριστεί εάν χρησιμοποιηθεί αυστηρό πρωτόκολλο ως προς την επιλογή των περιπτώσεων και των ελέγχων, εξαιρώντας όλες τις περιπτώσεις και τους ελέγχους σε ανθρώπους που διαβίωναν σε οικίες με οποιαδήποτε σημαντική δομική αλλαγή, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει τη συγκέντρωση ραδονίου.

- ♦ Χώρος δειγματοληψίας

Οι ανιχνευτές ραδονίου συνήθως τοποθετούνται στα υπνοδωμάτια, όπου δαπανάται ο περισσότερος χρόνος από τους διαμένοντες. Ως αποτέλεσμα, εισάγεται αβεβαιότητα για τις περιπτώσεις όπου η συγκέντρωση ραδονίου ποικίλει αισθητά από χώρο σε χώρο, λόγω χάρη σε μεζονέτες, όπου δύναται να υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις μεταξύ ισογείου και ανωτέρων ορόφων.

- ♦ Παράγοντας πληρότητας

Ο παράγοντας πληρότητας μετριέται δύσκολα στην πράξη, και συχνά η προσωπική κρίση είναι ο μόνος τρόπος εκτίμησής του, ιδιαίτερα σε μεγάλες χρονικές περιόδους. Ο εν λόγω παράγοντας δημιουργεί αβεβαιότητα ως προς την εκτίμηση κινδύνου έναντι έκθεσης σε ραδόνιο, αφού μεταβάλλεται μεταξύ των ανθρώπων, εξαρτώμενος από πλήθος στοιχείων, μεταξύ αυτών, την ηλικία, το επάγγελμα, την κατάσταση της υγείας. Ταυτόχρονα, δύναται να διαφέρει σημαντικά κατά τα Σαββατοκύριακα και τις αργίες. Στον υπολογισμό του κατά μέσο όρο για το γενικό πληθυσμό, είναι σχετικά σταθερός. Εξαρτάται βέβαια από το κλίμα, όντας συνήθως υψηλότερος σε χώρες ψυχρού κλίματος (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 15).

- Αβεβαιότητες σχετικά με την προσέγγιση δοσιμετρίας

- ♦ Αβεβαιότητες στον παράγοντα μετατροπής της έκθεσης σε δόση

Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα δοσιμετρικά μοντέλα των πνευμόνων εξελίσσονται συνεχώς, όπως και οι γνώσεις για τις συσχετιζόμενες φυσικές και βιολογικές παραμέτρους, δημιουργείται αντίκτυπος στον παράγοντα μετατροπής της έκθεσης σε δόση, καθώς και στους συντελεστές στάθμισης για την εκτίμηση της αποτελεσματικής δόσης από την υπολογιζόμενη απορροφώμενη. Μεγάλη αβεβαιότητα υπάρχει επίσης στην επιλογή των κυττάρων-στόχων. Συχνά τα πιο σύγχρονα μοντέλα προβλέπουν υψηλότερες τιμές του παράγοντα μετατροπής της έκθεσης σε δόση, σε σχέση με τα προγενέστερα. Επιπλέον, τα αποτελέσματα του δοσιμετρικού μοντέλου συνήθως αναφέρονται σε ενήλικες, ενώ ο εν λόγω παράγοντας μπορεί να είναι έως 2 φορές υψηλότερος για την ηλικιακή ομάδα 0 έως 10 ετών.

♦ Αβεβαιότητες στον παράγοντα μετατροπής της δόσης σε κίνδυνο

Οι παράγοντες μετατροπής της δόσης σε κίνδυνο έχουν γενικά ληφθεί κυρίως από τα επιδημιολογικά δεδομένα των επιζώντων από Hiroshima και Nagasaki, των οποίων οι συνθήκες έκθεσης ήταν πολύ διαφορετικές, σε σχέση με αυτές λόγω ραδονίου εσωτερικών χώρων. Οι επιζώντες σε Hiroshima και Nagasaki εκτέθηκαν σε υψηλές δόσεις για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, καθώς και σε ακτινοβολία νετρονίων και ακτινοβολία-γ, σε αντίθεση με τη χρόνια έκθεση ανθρώπων στο εσωτερικό χώρων σε χαμηλές δόσεις, με εκπομπή ακτινοβολίας-α. Τέτοιες διαφοροποιήσεις εισάγουν αβεβαιότητες που είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν.

Ορισμένες αβεβαιότητες σχετίζονται επίσης με την εκτίμηση της δόσης που λαμβάνεται από τα εκτεθειμένα άτομα, εξαιτίας της διαφοροποίησης λόγω καπνίσματος. Μια άλλη πηγή αβεβαιότητας έγκειται στο ότι όλα τα εκτεθειμένα άτομα σε ραδόνιο δεν έχουν πεθάνει, και επομένως η εκτίμηση κινδύνου, που υπολογίζεται βάσει του αριθμού των καρκίνων έως σήμερα, να πρέπει να γίνεται με βάση τον συνυπολογισμό των καρκίνων που προβλέπεται ότι θα εμφανιστούν μελλοντικά (Bohicchio *et al.*, 1995, p. 16).

▫ Αβεβαιότητες σχετικά με την επιδημιολογική προσέγγιση

Αρκετές αβεβαιότητες υφίστανται επίσης οι εκτιμήσεις κινδύνου από επιδημιολογικές μελέτες βασιζόμενες σε εργαζόμενους εκτεθειμένους σε υπόγεια ορυχεία, καθώς και στον γενικό πληθυσμό. Πιο συγκεκριμένα, μεγάλες είναι οι αβεβαιότητες στην εκτιμώμενη συσσωρευμένη έκθεση των ανθρακωρύχων σε θυγατρικά ραδονίου ιδιαίτερα την περίοδο 1950-1960. Συνάμα, η παρουσία στα ορυχεία άλλων καρκινογόνων παραγόντων, όπως οι σκόνη από μέταλλα, ατμών κινητήρων ντίζελ, μακρόβιων ραδιονουκλιδίων, ακτινοβολίας-γ,

και πρωτίστως το κάπνισμα, καθιστούν πιο δύσκολη την ποσοτική συσχέτιση των πνευμονικών ασθενειών με την εμφάνιση ραδονίου.

Σε ό,τι αφορά το γενικό πληθυσμό, υφίστανται αβεβαιότητες των επιδημιολογικών μελετών σχετικά με το κατά πόσο οι σύγχρονες μετρήσεις ραδονίου στις παρούσες ή προγενέστερες κατοικίες τους δύνανται να διαφέρουν από αναδρομικές μετρήσεις έκθεσης.

Πολύ σημαντική αβεβαιότητα προκαλεί η προέκταση του κινδύνου από ενήλικες άνδρες ανθρακωρύχους μέσω των υπόγειων ορυχείων, προς το ευρύ κοινό στις κατοικίες τους. Η αβεβαιότητα προκύπτει λόγω δυσκολίας ποσοτικοποίησης των επιπτώσεων, εξαιτίας των διαφορών στα δύο περιβάλλοντα (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 16, 17). Αρκετές αρχές έχουν κάνει προσαρμογές είτε σιωπηρά, είτε ρητά, ώστε να εξομαλύνουν τις διαφορές ανάμεσα στα διαφορετικά περιβάλλοντα, προτείνοντας έναν κατάλληλο διορθωτικό συντελεστή με εύρος τιμών από 0.65 έως 1.4 (ICRP65, 1993, p. 12).

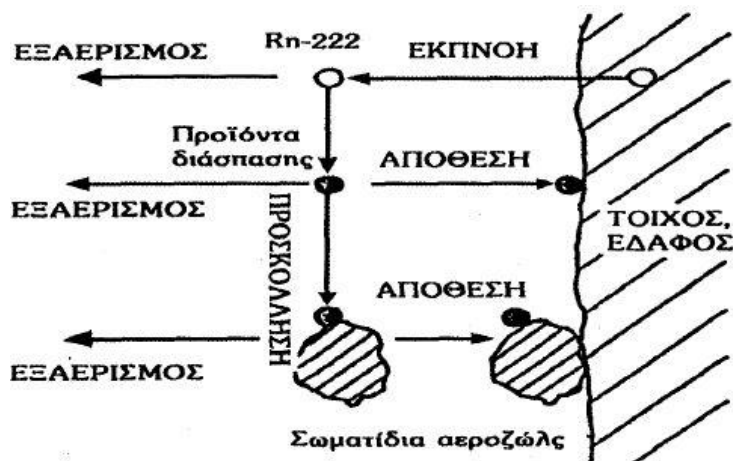
2.5 Ραδόνιο στους εσωτερικούς χώρους

Το ραδόνιο αποτελεί φυσική πηγή ακτινοβολίας και προέρχεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, από τη φυσική διάσπαση του ραδίου που υπάρχει στο έδαφος και στα πετρώματα της Γης. Ως αδρανές αέριο, εισέρχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα, όταν αυτό διαφύγει από το έδαφος και τα οικοδομικά υλικά (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 25). Από έρευνες σχετικά με τους παράγοντες που επιδρούν στα υψηλά επίπεδα ραδονίου σε κατοικίες στη Σουηδία, εξακριβώθηκε ότι οι κύριες πηγές ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους κατοικιών είναι τα οικοδομικά υλικά (π.χ. τσιμέντα, κεραμικά, θραύσματα μαρμάρου, γρανίτες), ο τύπος των γεωλογικών δομών κάτω από τις κατοικίες (π.χ. υψηλής διαπερατότητας) και οι πηγές νερού και ενέργειας (π.χ. νερό οικιακής χρήσης, φυσικό αέριο) (Swedjemark *et al.*, 1989). Οι περιοχές με καρστικούς ασβεστόλιθους συνδέονται με υψηλά επίπεδα ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίων, λόγω της διαπερατότητας των υποκείμενων πετρωμάτων. Ομοίως και οι περιοχές με υψηλή περιεκτικότητα σε σχιστόλιθους, αφού είναι γνωστό ότι περιέχουν αυξημένα επίπεδα ουρανίου (Gillmore *et al.*, 2005). Επιπλέον, ο εξωτερικός αέρας μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην είσοδο ραδονίου στα κτήρια μέσω ανοιχτών θυρών και παραθύρων, καθώς και μέσω μηχανικού εξαερισμού (Ahmed, 1994). Η αραίωση μέσω ανταλλαγής αέρα με τον εξωτερικό αέρα επηρεάζει θεμελιωδώς τη συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, μια διαδικασία που μπορεί να διαφοροποιείται λόγω μετεωρολογικών παραμέτρων, αλλά και συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού

(Papaefthymiou *et al.*, 2003). Στους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις ραδονίου στο εσωτερικό των κτηρίων είναι ο **τύπος δαπέδου**, η **στεγανοποίηση** και εάν η κατοικία έχει **διπλά τζάμια** (Gillmore *et al.*, 2005). Κατά τη διάρκεια κατασκευής κτηρίων σε περιοχές με έντονη παρουσία γηγενούς ραδονίου, η αποτελεσματική μείωση των συγκεντρώσεων αυτού στο εσωτερικό των κατοικιών μπορεί να επιτευχθεί με τη **χρήση μεμβρανών φραγμού ραδονίου**, από φύλλο πολυαιθυλενίου ελάχιστου πάχους 300 μm , οι οποίες δύνανται να μειώσουν τον κίνδυνο ανάπτυξης καρκίνου του πνεύμονα, εφόσον διασφαλιστεί η 100% αποτελεσματικότητα των μεμβρανών (Groves-Kirkby *et al.*, 2006). Η **στρώση χαλικιού** κάτω από την πλάκα δαπέδου από σκυρόδεμα μιας κατοικίας δύναται να αυξήσει σημαντικά την ταχύτητα εισόδου του ραδονίου (UNSCEAR, 2000, p.100).

Το εισερχόμενο ραδόνιο σε εσωτερικούς χώρους υφίσταται διάχυση και ανάμειξη με τα λοιπά συστατικά του εσωτερικού αέρα, μη αντιδρώντας με αυτά. Με τη διάσπασή του, δίδει στερεά θυγατρικά ισότοπα τα οποία αλληλεπιδρούν με τα συστατικά του εσωτερικού αέρα, δημιουργώντας πυρήνες συμπύκνωσης. Στην περίμετρο αυτών προσκολλώνται υπέρλεπτα σωματιδιακά αερολύματα, όπως H_2O , NO , NO_2 , SO_2 , διάφορα άλλα ιχνοστοιχεία, καθώς και νιτρικές και θειϊκές σύμπλοκες ενώσεις. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται μοριακά συσσωματώματα, διαστάσεων από < 0.5 έως 20 nm, τα οποία είναι *ελεύθερα* ή *μη προσκολλημένα* προϊόντα διάσπασης ραδονίου (άτομα ή ιόντα). Ακολουθώντας, γίνεται διάχυση αυτών στην ατμόσφαιρα, και σε χρόνο από 10 έως 100 sec προσκολλώνται στα υφιστάμενα αερολύματα, διαστάσεων από 50 έως 500 nm, δημιουργώντας τα *προσκολλημένα* προϊόντα διάσπασης ραδονίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Η προσκόλληση των *ελεύθερων* προϊόντων διάσπασης ραδονίου σε σωματιδιακά ατμοσφαιρικά αερολύματα εξαρτάται από τη διάχυση λόγω τυρβώδους ανάμειξης και κίνησης Brown, ενώ συνάμα επηρεάζεται από την παρουσία ηλεκτροστατικών δυνάμεων (Στούλος, 1998, σ. 7). Ο *ρυθμός προσκόλλησης* λ_a (h^{-1}) των προϊόντων διάσπασης του ραδονίου εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων στο χώρο, αλλά και από το μέγεθος αυτών. Τυχούσα αύξηση της συγκέντρωσης των αερολυμάτων προκαλεί αύξηση του ρυθμού προσκόλλησης, οδηγώντας σε σπουδαία αύξηση των προσκολλημένων προϊόντων διάσπασης του ραδονίου (Πατήρης, 2009, σ. 74, 86). Επιπρόσθετα, τα σωματιδιακά αερολύματα κατά την κίνησή τους σε εσωτερικούς χώρους αποτίθενται σε διάφορες επιφάνειες, όπως τοίχους, έπιπλα, κουρτίνες κλπ., ενώ η απόθεση αυτών εξαρτάται πρωτίστως από τη διάχυση λόγω τυρβώδους ανάμειξης και κίνησης Brown, καθώς και από τη βαρύτητα. Δευτερευόντως, τα σωματιδιακά

αερολύματα αποτίθενται εξαιτίας της σύλληψης, η οποία λαμβάνει χώρα λόγω ηλεκτροστατικής και θερμικής έλξης αυτών, είτε εξαιτίας της πρόσκρουσης στις διάφορες επιφάνειες του χώρου λόγω αδράνειας. Εξαιτίας της απόθεσης ελαττώνονται οι συγκεντρώσεις κυρίως των *ελεύθερων* προϊόντων διάσπασης ραδονίου εντός των κτηρίων, σε ποσοστά έως και > 50% (Στούλος, 1998, σ. 8, 9).



Εικόνα 4: Συμπεριφορά ραδονίου & προϊόντων διάσπασής του σε εσωτερικούς χώρους. (Πηγή: Στούλος, 1998, σ. 8)

Σχετικά με την απόθεση των μη προσκολλημένων προϊόντων διάσπασης του ραδονίου σε ατμοσφαιρικά αερολύματα, έχει εισαχθεί ο ρυθμός απόθεσης λ_d^u , ενώ για τα προσκολλημένα θυγατρικά ραδιονουκλίδια του ραδονίου, ο ρυθμός απόθεσης συμβολίζεται ως λ_d^a . Σε ένα δεδομένο δωμάτιο με όγκο V , επιφάνειες συνολικού εμβαδού S , και ίδια πιθανότητα εναπόθεσης για όλες τις επιφάνειες, οι εν λόγω ρυθμοί απόθεσης υπολογίζονται ως:

$$\lambda_d^u = u_d^u \frac{S}{V} \text{ και } \lambda_d^a = u_d^a \frac{S}{V}, \text{ όπου } u_d^u \text{ και } u_d^a \text{ οι ταχύτητες με τις οποίες εναποτίθενται τα μη}$$

προσκολλημένα και τα προσκολλημένα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου σε ατμοσφαιρικά αερολύματα αντίστοιχα. Σε ένα χώρο με επίπλωση ή άλλα αντικείμενα, η συνολική επιφάνεια αυξάνεται, ενώ συγχρόνως ο όγκος μειώνεται, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού απόθεσης των θυγατρικών προϊόντων του ραδονίου σε επιφάνειες (Πατήρης, 2009, σ. 76-78). Τα εναποτεθειμένα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου στις διάφορες επιφάνειες παύουν να εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό με τη διαδικασία της εισπνοής. Εκτός αυτού, η πιθανότητα να επιστρέψουν στον αέρα είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Η διαδικασία απόθεσης των σωματιδιακών αερολυμάτων δύναται να επηρεαστεί από την ύπαρξη ηλεκτροστατικού φορτίου στις διάφορες επιφάνειες του εσωτερικού χώρου, όπως και από ηλεκτρικά πεδία εξαιτίας των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων. Η ταχύτητα με την οποία αποτίθενται τα μη προσκολλημένα θυγατρικά του ραδονίου σε επιφάνειες κυμαίνεται

από 0.05 cm/s έως 0.5 cm/s, ενώ η ταχύτητα απόθεσης των προσκολλημένων προϊόντων διάσπασης λαμβάνει τιμές μεταξύ 5×10^{-4} cm/s και 5×10^{-3} cm/s (Πατήρης, 2009, σ. 24).

Εφόσον τα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου δεν προσκολλώνται σε αερολύματα, επομένως παραμένουν ελεύθερα, εξαιτίας του μικρού μεγέθους τους η κίνησή τους προσεγγίζεται με αυτή των αερίων. Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης D_m (m²/s) των προϊόντων διάσπασης του ραδονίου δίδεται από την εξίσωση των Stokes-Einstein:

$$D_m = \frac{\kappa \cdot T \cdot CU}{3\pi \cdot \mu \cdot d_p}, \text{ όπου:}$$

$$\kappa: \text{η σταθερά Boltzmann (} \kappa = 1.381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{°K}} = 1.381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{°K}} \text{),}$$

T: η θερμοκρασία (°K),

CU [-] ο παράγοντας διόρθωσης Cunningham,

μ: το δυναμικό ιξώδες του μέσου δια του οποίου γίνεται η μοριακή διάχυση (για τον αέρα:

$$\mu = 1.83 \cdot 10^{-4} \frac{\text{gr}}{\text{cm} \cdot \text{s}} \Rightarrow \mu = 1.83 \cdot 10^{-4} \frac{\text{gr}}{\text{cm} \cdot \text{s}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{gr}} \cdot 10^2 \frac{\text{cm}}{\text{m}} \Rightarrow \mu = 1.83 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}, \text{ και}$$

$$1\text{N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \Rightarrow 1\text{kg} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}, \text{ άρα για τον αέρα:}$$

$$\mu = 1.83 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \Rightarrow \mu = 1.83 \cdot 10^{-5} \frac{\frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}}{\text{m} \cdot \text{s}} \Rightarrow \mu = 1.83 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

d_p : η διάμετρος των διαχεόμενων προϊόντων διάσπασης του Rn (m) (Πατήρης, 2009, σ. 72).

Ο παράγοντας διόρθωσης Cunningham αποτελεί μια συνάρτηση της διαμέτρου d_p των διαχεόμενων σωματιδίων, και δίδεται από την εξίσωση:

$$CU = 1 + \frac{2l}{d_p} \left(\alpha + \beta e^{-\gamma \frac{d_p}{2l}} \right), \text{ όπου } \alpha, \beta, \gamma \text{ χαρακτηριστικές παράμετροι εξαρτώμενες από την}$$

επιφάνεια των σωματιδίων και τα χαρακτηριστικά του αερίου, οι οποίες προσδιορίζονται πειραματικά, και l : η μέση ελεύθερη διαδρομή που διανύουν τα μόρια του αερίου μεταξύ δύο διαδοχικών κρούσεων με άλλα μόρια. Τόσο οι Allen and Raabe (1985), όσο και οι Cheng *et al.* (1988) προσδιόρισαν τις παραμέτρους α , β , γ ίσες με 1.142, 0.558 και 0.999 αντίστοιχα, για μέση ελεύθερη διαδρομή $l=0.0673$ μm στον αέρα και θερμοκρασία 23°C. Επομένως ο

παράγοντας διόρθωσης Cunningham δίδεται από την εξίσωση:

$$CU = 1 + \frac{2l}{d_p} \left(1.142 + 0.558e^{-0.999 \frac{d_p}{2l}} \right).$$

Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης των θυγατρικών ισοτόπων του ραδονίου έχει προσδιοριστεί πειραματικά από διάφορους μελετητές. Μία χαρακτηριστική έρευνα είναι αυτή των Malet *et al.* (2000), στην οποία διαπιστώθηκε πειραματικά ότι ο συντελεστής μοριακής διαχύσεως για το ραδιονουκλίδιο Pb-214 είναι $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Σε μια άλλη μελέτη, αυτή των Knutson *et al.* (1997), σε ό,τι αφορά το συντελεστή μοριακής διάχυσης του Po-218, βρέθηκε πειραματικά ότι δεν πρόκειται για ένα σταθερό αριθμό, αλλά μεταβάλλεται, προσεγγίζοντας τη λογαριθμική κανονική κατανομή, με τοπικό μέγιστο τα $0.06 \text{ cm}^2/\text{s}$. Η κορύφωση του τοπικού αυτού μέγιστου περιελάμβανε περισσότερο από το 96% της ενεργότητας του Po-218. Στην ίδια μελέτη, υπολογίστηκε ότι το φάσμα κατανομής του συντελεστή μοριακής διάχυσης για το ^{214}Pb δε διέφερε σημαντικά από αυτό του ^{218}Po , με τους συντελεστές διαχύσεως να είναι κατά 20% μικρότεροι. Από την άλλη, τα πειράματα για το ραδιονουκλίδιο ^{212}Pb , έδειξαν ότι ως επί το πλείστον, ο συντελεστής μοριακής διάχυσης εμφάνιζε δύο τοπικά μέγιστα, ακολουθώντας διτροπική κατανομή. Όλα τα δείγματα ^{212}Pb για το πείραμα είχαν ένα τοπικό μέγιστο περίπου στα $0.044 \text{ cm}^2/\text{s}$. Το δεύτερο τοπικό μέγιστο εμφάνιζε μέση τιμή $0.0054 \text{ cm}^2/\text{s}$, αλλά μεταβαλλόταν ανάλογα με τις συνθήκες της δοκιμής. Σε έρευνα των Tymen *et al.* (1999), από πειραματικές μετρήσεις προσδιορίστηκε ο συντελεστής μοριακής διάχυσης για τα μη προσκολλημένα ραδιονουκλίδια ^{218}Po , με εύρος τιμών από 0.09 έως $0.04 \text{ cm}^2/\text{s}$, και μέση τιμή τα $0.08 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Η συγκέντρωση του ραδονίου στο χώρο μπορεί να μεταβληθεί μακροπρόθεσμα. Μπορεί ωστόσο να μεταβληθεί και εποχιακά, λόγω αλλαγής στις κλιματολογικές συνθήκες, είτε και μόνιμα, λόγω γήρανσης του κτηρίου (Καράγγελος, 2008, σ. 248). Έχει επισημανθεί σε μελέτες που βασίζονται σε βραχυχρόνιες μετρήσεις, για διάστημα περίπου ενός έτους, ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου στο εσωτερικό κατοικιών παρουσιάζονται το χειμώνα, ενώ οι χαμηλότερες κατά τη θερινή περίοδο (Mostafa *et al.*, 2015; Gillmore *et al.*, 2005; Paraefthymiou *et al.*, 2003). Οι ιδιαίτερα υψηλές τιμές συγκέντρωσης του ραδονίου και των προϊόντων αποσύνθεσής του κατά τη χειμερινή περίοδο οφείλονται σε ανεπαρκή αερισμό των κατοικιών, καθώς οι θύρες και τα παράθυρα, στους χώρους όπου μετριοούνται οι συγκεντρώσεις, παραμένουν κλειστά ως επί το πλείστον. Αντίθετα, ο υψηλός αερισμός κατά την άνοιξη, όπου τα παράθυρα παραμένουν ανοιχτά κατά κύριο λόγο και για μεγαλύτερη διάρκεια, φαίνεται ότι οδηγεί σε χαμηλές τιμές συγκεντρώσεων ραδονίου και των προϊόντων

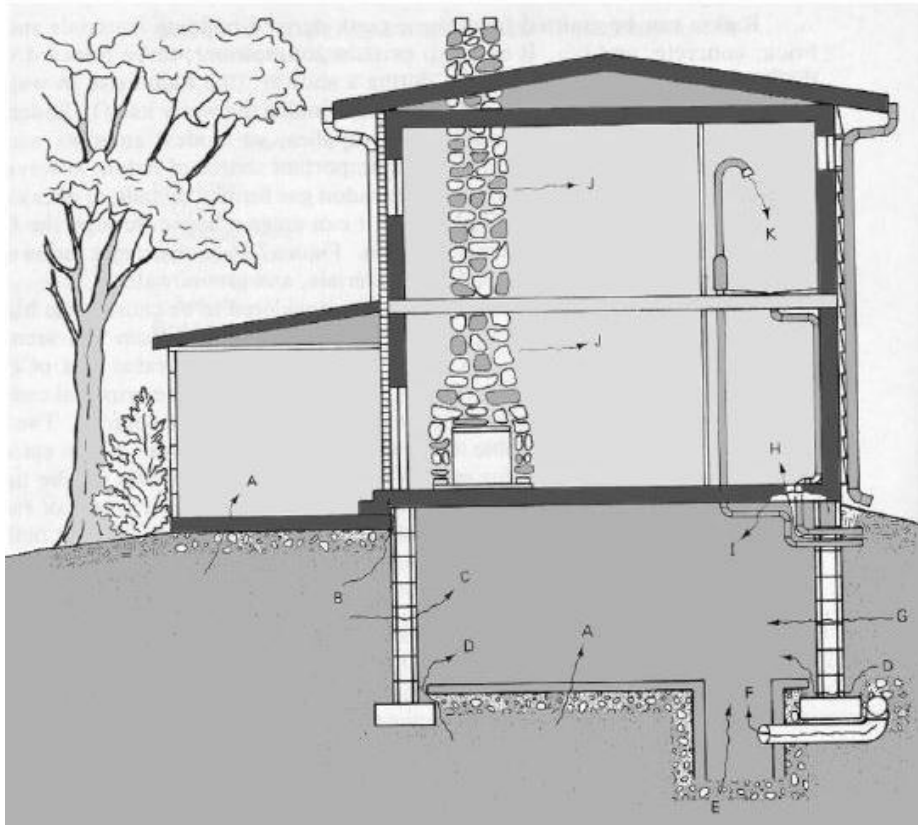
αποσύνθεσής του για αυτή την εποχή. Παρά το γεγονός ότι ο ρυθμός εξαερισμού μιας κατοικίας πιθανώς μειώνεται και κατά τη διάρκεια της εποχής των βροχοπτώσεων, οι συγκεντρώσεις ραδονίου και των προϊόντων αποσύνθεσής του διαπιστώνονται μέτριες, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλή εκπομπή ραδονίου από τους κόκκους των ορυκτών, εξαιτίας των υψηλών επιπέδων υγρασίας (Mostafa *et al.*, 2015). Οι Papaefthymiou *et al.* (2003) μελετώντας την εξάρτηση του ραδονίου στο εσωτερικό διάφορων κατοικιών στην Ελλάδα, ανάλογα με το επίπεδο του δαπέδου στο οποίο βρίσκεται ο εξεταζόμενος χώρος, διαπίστωσαν έναν εποχιακό κύκλο. Συγκεκριμένα, εξακρίβωσαν ότι υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου σημειώνονταν το χειμώνα, ενώ γραμμικώς μειούμενες συγκεντρώσεις λάμβαναν χώρα σε κάθε υψηλότερο επίπεδο δαπέδου. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι οι ισόγειες κατοικίες με υπόγειο χώρο παρουσίαζαν χαμηλότερη μέση ετήσια συγκέντρωση ραδονίου, από ότι αυτές χωρίς υπόγειο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν τα αποτελέσματα της έρευνας των Bossew and Lettner (2007) σε κατοικίες της Αυστρίας που ανήκουν σε ζώνες υψηλής μέσης συγκέντρωσης ραδονίου εσωτερικών χώρων, λόγω υποκείμενων πετρωμάτων αποτελούμενων από γρανίτες Βοημίας και Αλπικούς γνεύσιους, όπου ανακάλυψαν ότι σε ορόφους υψηλότερα απ' τον δεύτερο, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των συγκεντρώσεων ραδονίου εσωτερικών χώρων ανάμεσα σε καλοκαίρι και χειμώνα. Εν ολίγοις, όσο υψηλότερα είναι το εξεταζόμενο επίπεδο, τόσο χαμηλότερος είναι ο αντίκτυπος των εποχιακών μεταβολών στη μέση συγκέντρωση ραδονίου στο εσωτερικό των κτηρίων. Συγχρόνως, στην ίδια περιοχή, το εύρος της εποχιακής μεταβλητότητας των βραχυπρόθεσμων μετρήσεων είναι κάπως υψηλότερο από αυτό των μακροπρόθεσμων μετρήσεων. Απ' την άλλη, στην έρευνα των Burke and Murphy (2011) διαπιστώθηκε πολύ μεγάλη περιφερειακή διαφοροποίηση στην εποχιακή μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών της Ιρλανδίας, και επομένως κρίνεται ακατάλληλη η χρήση ενός εθνικού εποχιακού μοτίβου.

Σε έρευνα του Cohen (1990) σημειώνεται ότι οι αστικές κατοικίες στις Η.Π.Α. έχουν σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα ραδονίου από εκείνα των αγροτικών κατοικιών. Αυτό πιθανώς εξηγείται επειδή απαντώνται περισσότερες πολυκατοικίες από ότι μονοκατοικίες, οι οποίες συχνά θεμελιώνονται σε άμμο από παραθαλάσσιες περιοχές χαμηλής περιεκτικότητας σε ουράνιο, είτε ίσως λόγω διαφορών στην κατασκευή των κατοικιών των πόλεων από αυτών της υπαίθρου.

Το ραδόνιο που εκλύεται από το έδαφος, καθώς και από οικοδομικά υλικά μπορεί να εισέλθει εντός ενός κτηρίου διαμέσου:

- A. των υφιστάμενων μικρορωγμών στο τσιμεντένιο υπόστρωμα της πλάκας έδρασης,
- B. των χώρων πίσω από τοίχους οπτοπλινθοδομής, στηριζόμενους σε θεμέλια δοκών υποστήριξης,
- C. των πόρων και ρωγμών σε τσιμεντόλιθους,
- D. των διάκενων συνδέσμων τοίχων-δαπέδου (αρμών),
- E. απευθείας εισόδου από μη κεκαλυμμένο (εκτεθειμένο) έδαφος,
- F. των διαρροών από τις απορροές των φρεατίων αποχέτευσης,
- G. των κενών στις αρθρώσεις τσιμεντοκονιάματος,
- H. των διάτρητων σωληνώσεων,
- I. των διάκενων σύνδεσης διαφορετικών ορόφων,
- J. των οικοδομικών υλικών, π.χ. πέτρες,
- K. των σωλήνων ύδρευσης (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 80).

Στην Εικόνα 5 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι προαναφερθείσες κύριες οδοί εισόδου του ραδονίου στο εσωτερικό ενός κτηρίου.



Εικόνα 5: Κυριότερες οδοί εισόδου ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίου, Α έως Κ. (Πηγή: Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 81)

Άλλες πηγές εισόδου ραδονίου εντός ενός κτηρίου, μέσω εδάφους και οικοδομικών υλικών, που δε σημειώνονται στην Εικόνα 5, είναι εξαιτίας:

- ✓ των υπάρχοντων κενών ή ρωγμών σε τοίχους,
- ✓ πιθανών διακένων σε ξύλινα πατώματα,
- ✓ κενών σε κουφώματα (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 25; Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 13).

Η συγκέντρωση ραδονίου εσωτερικά ενός κτηρίου μπορεί να επηρεαστεί από πολλαπλούς παράγοντες, όπως:

- ✓ το ρυθμό εκροής ραδονίου από το έδαφος
- ✓ το είδος θεμελίωσης μιας οικοδομής
- ✓ το ύψος του κτηρίου
- ✓ την εκροή ραδονίου από τα οικοδομικά υλικά, μέσα από τις εσωτερικές επιφάνειες
- ✓ τον εξαερισμό του κτηρίου
- ✓ τη διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού ενός κτηρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 25; Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 13).

Αξίζει να σημειωθεί ότι για μία τυπική ισόγεια κατοικία, η συνεισφορά του εδάφους, των υλικών οικοδόμησης και του εξωτερικού αέρα στα επίπεδα ραδονίου εσωτερικού χώρου είναι κατά προσέγγιση 60%, 20% και 20% αντίστοιχα, ενώ σε υψηλότερα πατώματα πολυώροφων κτηρίων, τα ποσοστά γίνονται περίπου 0%, 50% και 50% αντιστοίχως (Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 14).

Σημαντικό ρόλο στις συγκεντρώσεις ραδονίου εσωτερικών χώρων διαδραματίζουν επίσης οι αστικοί ρύποι, και ιδιαίτερα το διοξείδιο του θείου (SO₂). Χαρακτηριστικά, οι Papastefanou and Stoulos (1994) μέτρησαν τις συγκεντρώσεις θυγατρικών του Rn σε 19 κατοικίες στην κεντρική ζώνη της Θεσσαλονίκης, υψηλά εκτεθειμένες σε ατμοσφαιρικούς ρύπους λόγω φωτοχημικού νέφους, υπό συνθήκες σχετικά χαμηλής υγρασίας -έως 70%- σε ετήσιο κύκλο. Διαπιστώθηκε ότι οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών Rn αυξήθηκαν σε αυξημένες συγκεντρώσεις αερολυμάτων, κάτι που ερμηνεύεται από το μειούμενο αδέσμευτο κλάσμα των θυγατρικών, με την αύξηση της συγκέντρωσης των αερολυμάτων. Συγχρόνως, τα ελεύθερα θυγατρικά Rn απομακρύνονται σταθερά με ρυθμό κατά δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερο από τον αντίστοιχο των δεσμευμένων θυγατρικών του Rn σε αερολύματα. Επομένως, για υψηλότερο μη προσαρτημένο κλάσμα θυγατρικών ραδονίου, η συνολική απώλεια των θυγατρικών κατά την έκθεσή τους στο εσωτερικό κτηρίων είναι μεγαλύτερη.

Υπάρχουν μελετητές που εξετάζουν τη συσχέτιση των συγκεντρώσεων ραδονίου σε κτήρια με διάφορους παράγοντες. Συγκεκριμένα, σε έρευνα των Al-Khateeb *et al.* (2017) στην πόλη AlMafrag στην έρημο της Ιορδανίας, εξακριβώθηκε μία μέτρια γραμμική συσχέτιση ($R^2=0.66$) μεταξύ των συγκεντρώσεων ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους και των συγκεντρώσεων ραδονίου στο έδαφος. Οι παράγοντες που φαίνεται να ενισχύουν τη συσχέτιση αυτή μπορεί να είναι το λεπτό στρώμα σκυροδέματος που χρησιμοποιείται ως δάπεδο των κατοικιών, ή/και το αμμώδες υπόστρωμα με υψηλό πορώδες κάτω από τη θεμελίωση των κτηρίων, παράμετροι που αυξάνουν τη διαρροή ραδονίου από το έδαφος προς τις κατοικίες. Επιπλέον, το γεγονός ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη θερινή περίοδο, όπου η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία είναι πολύ χαμηλή, οδηγεί στην αύξηση της έκλυσης ραδονίου και διάχυσης από το έδαφος στο εσωτερικό χώρων. Στο πλαίσιο των αποτελεσμάτων, οι μελετητές πρότειναν στους κατοίκους της περιοχής μελέτης να αυξήσουν τον κανονικό ρυθμό εξαερισμού των σπιτιών τους, ανοίγοντας θύρες και παράθυρα, να εγκαταστήσουν ένα χώρο εξαερισμού κάτω από το ισόγειο ώστε να απομονωθούν οι οικίες τους από την άμεση επαφή στο έδαφος, είτε να αντικαταστήσουν το αμμώδες έδαφος κάτω από τα θεμέλια των κατοικιών με λασπώδες έδαφος ώστε να μειωθεί

η ροή ραδονίου από το έδαφος προς το εσωτερικό, ταυτόχρονα σφραγίζοντας το σκυρόδεμα στα θεμέλια του κτηρίου προκειμένου να είναι περισσότερο στεγανά, καθώς και να σφραγίσουν όλα τα ανοίγματα και ρωγμές στο ισόγειο.

Σε μια άλλη μελέτη, αυτή των Collignan *et al.* (2016), διαπιστώθηκε ότι κατοικίες που είχαν υποστεί θερμική αναβάθμιση, παρουσίαζαν υψηλότερη μέση συγκέντρωση ραδονίου από αυτές που δεν είχαν αναβαθμιστεί θερμικά. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφειλόταν σε μειωμένη διαπερατότητα αέρα του κελύφους του κτηρίου, έπειτα από εργασίες αποκατάστασης που δεν περιελάμβαναν την ορθή διαχείριση του εξαερισμού συστηματικά. Οι ερευνητές συνιστούν να εξετάζεται το εσωτερικό περιβάλλον στην περίπτωση κατασκευής δομής που βασίζεται στην εξοικονόμηση ενέργειας, ώστε να αποφεύγεται η επιδείνωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα που μπορεί να βλάψει την ανθρώπινη υγεία.

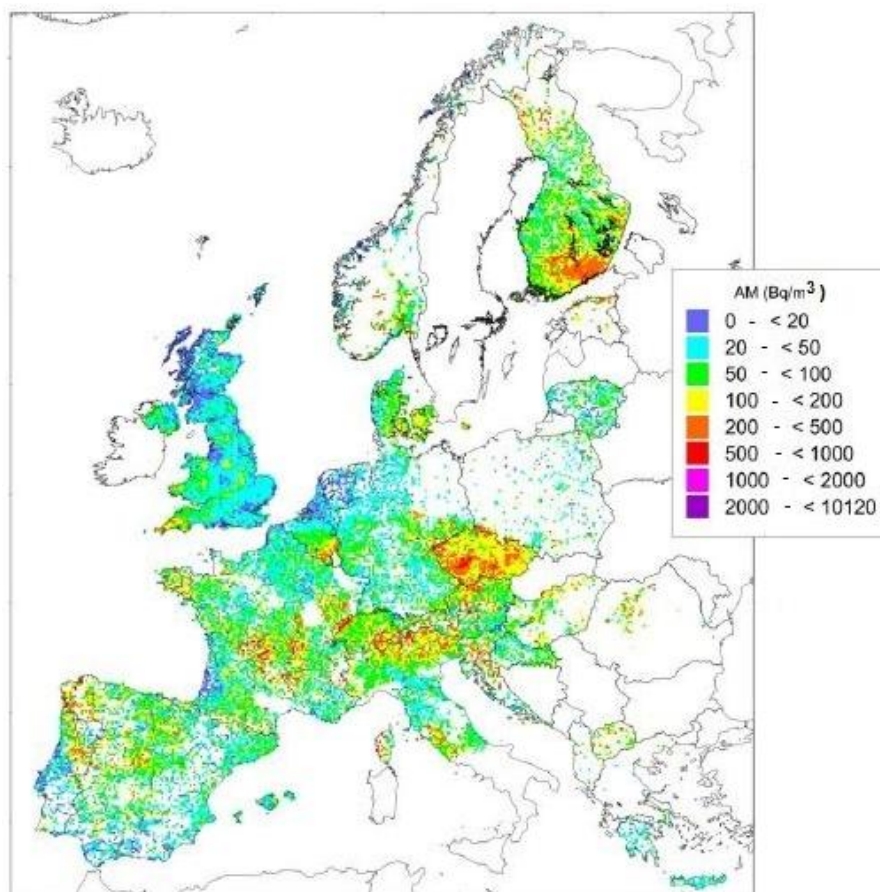
Ορισμένοι ερευνητές συγκρίνουν τα αποτελέσματα από μετρήσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους μέσω της τεχνικής αναδρομικής δοσιμετρίας, που βασίζεται στην επιφανειακή δραστηριότητα του ^{210}Po σε γυάλινα αντικείμενα, έναντι των σύγχρονων μεθόδων μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου. Στην έρευνα των Bochicchio *et al.* (2003) διαπιστώθηκε ότι η παρατηρούμενη συσχέτιση μεταξύ των δύο μεθόδων δεν είναι υψηλή, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη σημαντικών αβεβαιοτήτων ή διακυμάνσεων. Ο συσχετισμός ωστόσο επηρεάστηκε πιθανώς από ασυνήθιστες συνθήκες αερολυμάτων. Συγκεκριμένα, εξακριβώθηκε ότι η συσχέτιση αυξάνεται σημαντικά εφόσον οι μετρήσεις διεξάγονται σε κατοικίες που διαμένουν μη-καπνιστές, ενώ εκλείπει στην περίπτωση μετρήσεων σε κατοικίες που διαμένουν καπνιστές, γεγονός που υποδηλώνει πολύ μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην εξάπλωση ραδονίου, παρουσία περιβάλλοντος καπνού.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου σε όλη την Ευρωπαϊκή Ένωση είναι αρκετά μεταβλητές, ενώ μεγάλη μεταβλητότητα στις συγκεντρώσεις ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίων μπορεί να υπάρχει και σε μεμονωμένες χώρες. Στον Πίνακα 2.5.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται ο αριθμητικός μέσος και ο γεωμετρικός μέσος των συγκεντρώσεων ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών σε Bq/m³, σε 25 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπως εμφανίζεται στην έκθεση της UNSCEAR, 2000, p. 133, συμπληρωμένη από την έκθεση του WHO, 2007, p. 22-23. Λόγω των διαφορών στα χαρακτηριστικά των ερευνών σε κάθε χώρα, δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί μια μέση σταθμισμένη συγκέντρωση ραδονίου στην ΕΕ, αλλά είναι πιθανώς πλησίον των 50 Bq/m³. Η κατανομή του ραδονίου εσωτερικών χώρων στις περισσότερες χώρες προσεγγίζει καλά την λογαριθμική κανονική κατανομή (EnVIE, 2007, p. 203, 205).

Πίνακας 2.5.1: Αριθμητικός & γεωμετρικός μέσος των συγκεντρώσεων ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών σε 25 κράτη-μέλη της Ε.Ε. (Πηγή: UNSCEAR, 2000, p. 133; WHO, 2007, p. 22-23)

Κράτος Μέλος της Ε.Ε.	Αριθμητικός Μέσος (Bq/m ³)	Γεωμετρικός Μέσος (Bq/m ³)	Κράτος Μέλος της Ε.Ε.	Αριθμητικός Μέσος (Bq/m ³)	Γεωμετρικός Μέσος (Bq/m ³)
Αυστρία	99	15	Λιθουανία	32	22
Βέλγιο	53	38	Λουξεμβούργο	110	70
Γαλλία	90	41	Μάλτα	Χωρίς στοιχεία	Χωρίς στοιχεία
Γερμανία	49	40	Ολλανδία	23	18
Δανία	53	29	Ουγγαρία	107	82
Ελλάδα	55	52	Πολωνία	41	32
Εσθονία	120	92	Πορτογαλία	62	45
Ηνωμένο Βασίλειο	20	Χωρίς στοιχεία	Σλοβακία	87	Χωρίς στοιχεία
Ιρλανδία	91	37	Σλοβενία	87	60
Ισπανία	45	42	Σουηδία	108	56
Ιταλία	70	57	Τσέχικη Δημοκρατία	118	Χωρίς στοιχεία
Κύπρος	7	7	Φινλανδία	120	84
Λετονία	Χωρίς στοιχεία	Χωρίς στοιχεία			

Σε μια έρευνα που έλαβε χώρα από το 2006 και διεξήχθη από το Ενωμένο Κέντρο Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, τελέστηκε η χαρτογράφηση του ραδονίου εσωτερικών χώρων κατοικιών σε 24 ευρωπαϊκές χώρες, καλύπτοντας σημαντικό μέρος της Ευρώπης, χρησιμοποιώντας δεδομένα έως το Μάιο του 2014. Στη Εικόνα 6 που ακολουθεί παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή του αριθμητικού μέσου των συγκεντρώσεων ραδονίου στο εσωτερικό ισόγειων χώρων, σε πλεγματικά κελιά 10 x 10 km. Οι μεταβολές στις συγκεντρώσεις σε όλη την Ευρώπη, ουσιαστικά αντανakλούν τους διαφορετικούς υποκείμενους γεωλογικούς σχηματισμούς. Στις 24 χώρες της Ευρώπης, το ποσοστό των πλεγματικών κελιών που ο αριθμητικός μέσος (Α.Μ.) των συγκεντρώσεων είναι > 100 Bq/m³ αγγίζει το 30.1%. Αντίστοιχα, το ποσοστό των πλεγματικών κελιών που ο Α.Μ. είναι > 300 Bq/m³, για το σύνολο των 24 χωρών, είναι 4.24% (Tollefsen *et al.*, 2014).



Εικόνα 6: Αριθμητικός Μέσος (Bq/m³) σε πλέγμα κελιών 10 x 10 km μακροχρόνιας συγκέντρωσης ραδονίου σε ισόγειους χώρους. (Πηγή: Tollefsen et al., 2014)

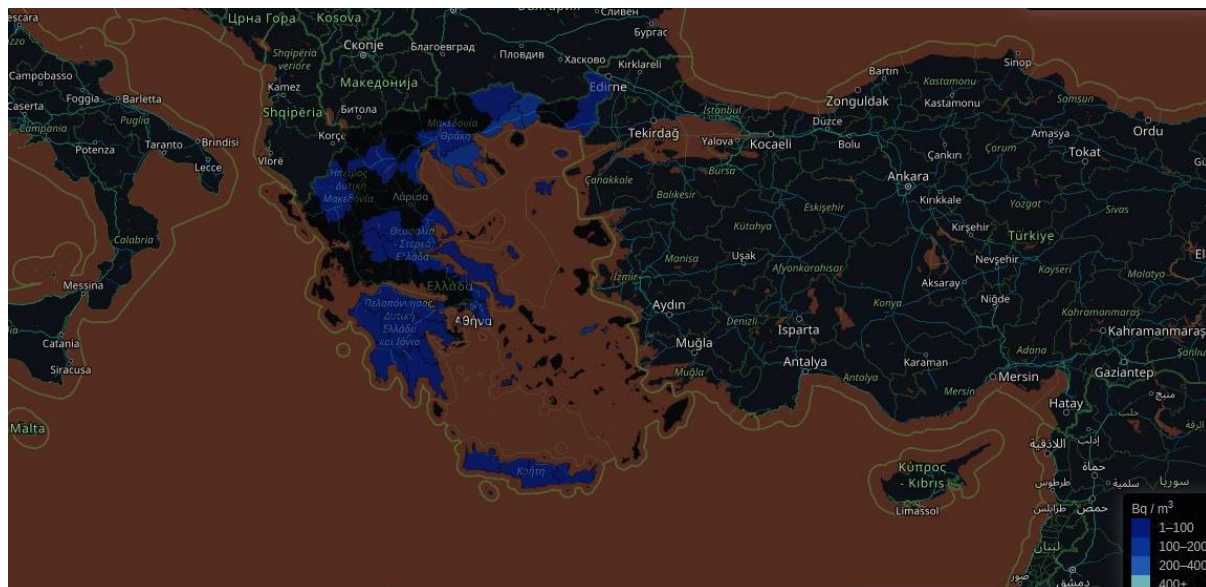
Στον Πίνακα 2.5.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι περιοχές με τη μεγαλύτερη συσσώρευση ραδονίου στην Ελλάδα, σε Becquerel ανά m³.

Πίνακας 2.5.2: Περιοχές με μεγαλύτερη συσσώρευση ραδονίου στην Ελλάδα (Bq/m³). (Πηγή: <http://www.keelpno.gr/Portals/0/Αρχεία/ΚΕΠΙΧ/Ραδόνιο.pdf>)

Χωριό	Νομός	Συσσώρευση Ραδονίου (Bq/m ³)
Νεράιδα	Θεσπρωτίας	511
Μελιβοία	Ξάνθης	460
Κέντρο Πόλης	Καβάλας	350
Σέλερο	Ξάνθης	320
Πρασινάδα	Δράμας	280
Μύκονος	Κυκλάδων	280
Δεσκάτη	Γρεβενών	279
Πεντάλοφο	Κοζάνης	258
Νικίσιανη	Καβάλας	237
Κέντρο Πόλης	Θεσσαλονίκης	220
Δοξάτο	Δράμας	211
Γενισέα	Ξάνθης	200

Μέσω διαδικτυακής εφαρμογής της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) υπάρχει πρόσβαση για το κοινό σε πληροφορίες αναφορικά με τις συγκεντρώσεις ραδονίου, σε Bq/m³, που έχουν καταμετρηθεί στον αέρα των κατοικιών σε διάφορες περιοχές της Ελλάδος. Ανά γεωγραφική περιοχή (περιφερειακή ενότητα, δήμο, δημοτική ενότητα) απεικονίζεται ο μέσος όρος των συγκεντρώσεων ραδονίου εφόσον το δείγμα από το πλήθος κατοικιών είναι στατιστικά αντιπροσωπευτικό. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε περιοχές όπου η επισκόπηση ραδονίου θεωρείται αρχικά ολοκληρωμένη απεικονίζονται με χρώμα. Στην περίπτωση που λάβουν χώρα συμπληρωματικές μετρήσεις, αυτές θα ενσωματωθούν στο προσεχές μέλλον, με στόχο τη σταδιακή ολοκλήρωση του εθνικού χάρτη. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 2.5.4 παρακάτω απεικονίζονται οι Δημοτικές Ενότητες (Δ.Ε.) του Νομού Χανίων για τις οποίες έχουν ολοκληρωθεί οι μετρήσεις.

έως 164.434 Bq/m³ στην Π.Ε. Ικαρίας. Ο χάρτης ραδονίου των Π.Ε. Ελλάδος για τις οποίες υπάρχει στατιστικά αντιπροσωπευτικό δείγμα φαίνεται στην Εικόνα 2.5.5. παρακάτω.



Εικόνα 8: Χάρτης ραδονίου Περιφερειακών Ενοτήτων Ελλάδος. (Πηγή: <https://eeae.gr/χάρτης-ραδονίου>)
Στον Πίνακα 2.5.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων ραδονίου στον αέρα των κατοικιών ανά Περιφερειακή Ενότητα της Ελλάδος, σε Bq/m³.

Πίνακας 2.5.3: Μέσες τιμές συγκεντρώσεων ραδονίου στον αέρα των κατοικιών, ανά Περιφερειακή Ενότητα της Ελλάδος (Πηγή: <https://eeae.gr/χάρτης-ραδονίου>)

Περιφερειακή Ενότητα	Μέση Συγκέντρωση Ραδονίου (Bq/m ³)	Περιφερειακή Ενότητα	Μέση Συγκέντρωση Ραδονίου (Bq/m ³)
Έβρου	51.44	Κεντρικού Τομέα Αθηνών	16.08
Λήμνου	87.57	Δυτικού Τομέα Αθηνών	91.12
Ξάνθης	145.275	Νότιου Τομέα Αθηνών	30.18
Καβάλας	131.38	Πειραιώς	62.844
Δράμας	98.0	Αχαΐας	43.58
Χαλκιδικής	136.208	Ηλείας	26.59
Θεσσαλονίκης	90.33	Κορινθίας	41.17
Περίας	41.78	Αργολίδας	42.79
Κοζάνης	46.206	Αρκαδίας	57.64
Ιωαννίνων	86.895	Μεσσηνίας	37.23
Μαγνησίας	45.97	Λακωνίας	48.166
Καρδίτσας	84.07	Μήλου	38.91
Ευρυτανίας	67.99	Ικαρίας	164.434
Φθιώτιδας	48.66	Χανίων	49.163
Εύβοιας	67.59	Ρεθύμνου	46.826
Ανατολικής Αττικής	52.766	Ηρακλείου	39.89

Βόρειου Τομέα Αθηνών	80.77	Λασιθίου	41.36
----------------------	-------	----------	-------

Μία έρευνα ευρείας κλίμακας στην Ελλάδα, αναφορικά με το ραδόνιο στο εσωτερικό κατοικιών, σχεδιάστηκε και εκτελέστηκε από τους Nikolopoulos *et al.* (2002), με χρήση δοσιμέτρων που κατασκευάστηκαν από το Τμήμα Ιατρικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, πλήρως βαθμονομημένα και δοκιμασμένα. Η έρευνα διεξήχθη από τον Ιούλιο του 1995 έως τον Αύγουστο του 1998, με δείγματα 1061 κατοικιών σε 722 θέσεις, σε χωριά και πόλεις. Συμπεριλήφθηκαν επίσης 216 δείγματα σε 12 θέσεις, που συλλέχθηκαν την περίοδο 1988-1994 από άλλους ερευνητές του Πανεπιστημίου Αθηνών. Σε σύνολο, τα δείγματα ήταν 1277 σε 734 τοποθεσίες της Ελλάδας, για περίοδο έκθεσης 12 μηνών. Εκτελέστηκε ευρεία δειγματοληψία στη Νότιο Ελλάδα, και συγκεκριμένα στο λεκανοπέδιο Αττικής, σε Πελοπόννησο και Κρήτη, καλύπτοντας περίπου το 40% της ελληνικής επικράτειας, και περίπου το 50% του ελληνικού πληθυσμού, ενώ τοπική δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές που ερευνήθηκαν. Το πλήρες σύνολο δεδομένων περιελάμβανε 741 κατοικίες στο ισόγειο, 320 στον πρώτο όροφο, 105 στον δεύτερο όροφο, 64 στον τρίτο όροφο, και 47 άνω του τρίτου ορόφου ενός κτηρίου. Τα συνολικά αποτελέσματα της δειγματοληψίας ακολουθούν τη λογαριθμική κατανομή ($P < 0.01$). Η συγκέντρωση ραδονίου στις κατοικίες κυμάνθηκε μεταξύ 200 και 400 Bq/m³ σε 22 κατοικίες, καλύπτοντας ποσοστό 1.9% των συνολικών δειγμάτων, μεταξύ 400 και 1000 Bq/m³ σε 8 κατοικίες, σε ποσοστό 0.7% του συνόλου, και άνω των 1000 Bq/m³ σε 4 κατοικίες, σε μόλις 0.4% του συνόλου των ερευνώμενων κατοικιών. Στο πλήρες σύνολο δεδομένων, ο αριθμητικός μέσος όρος βρέθηκε ίσος με 55 Bq/m³, και ο γεωμετρικός μέσος όρος ίσος με 44 Bq/m³, με γεωμετρική τυπική απόκλιση ± 2.4 Bq/m³. Σε μόλις 1.1% των κατοικιών στην Ελλάδα, οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις ραδονίου υπερέβησαν τα 400 Bq/m³. Οι ισόγειες κατοικίες παρουσίαζαν στατιστικά σημαντικές υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου, ωστόσο σε κατοικίες του πρώτου ορόφου και άνω, οι διαφορές δεν ήταν σημαντικές ($P < 0.001$). Σχετικά με τις συγκεντρώσεις ραδονίου ισόγειων κατοικιών, διαπιστώθηκε ότι ορισμένες περιοχές παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($P < 0.001$). Βρέθηκε επίσης ότι η Αρναία Χαλκιδικής και οι Βρύσες Αποκορώνου Χανίων είναι περιοχές επιρρεπείς σε ραδόνιο.

Στη Νότια Ελλάδα, όπου σημειώθηκε δειγματοληψία ευρείας περιοχής, οι Δυνητικές Συγκεντρώσεις Ενέργειας- α (*Potential Alpha Energy Concentration, PAEC*) των κατοικιών κυμαίνονταν μεταξύ (0.024 ± 0.009) και (2.8 ± 1.0) WLM/yr ($P < 0.05$), με μέση τιμή 0.2 WLM/yr. Οι αποτελεσματικές δόσεις σημείωναν εύρος μεταξύ (0.09 ± 0.04) και (11 ± 4) mSv/yr ($P < 0.05$), με μέση τιμή 0.8 mSv/yr. Αυτές οι μέσες τιμές βρίσκονταν κατά πολύ

μακριά από τις μέγιστες τιμές (8 ± 1) WLM/yr και (28 ± 4) mSv/yr ($P < 0.05$) που σημειώθηκαν στην Αρναία Χαλκιδικής, η οποία είναι επιρρεπής σε ραδόνιο. Ο μέσος κίνδυνος διάρκειας ζωής για τον ελληνικό πληθυσμό λόγω του ραδονίου κατοικιών βρέθηκε να είναι 0.4%, και εξαρτάται από την ηλικία, τις συνήθειες καπνίσματος και τις αβεβαιότητες του μέσου προσδόκιμου ορίου ζωής στην Ελλάδα.

2.6 Διαδικασία απομάκρυνσης ραδονίου από εσωτερικούς χώρους

Η είσοδος ραδονίου σε πολλές δομές μπορεί να προληφθεί αρκετά ή τουλάχιστον να μειωθεί σημαντικά, με την ανακατεύθυνση και την εκ νέου διοχέτευση του μεταφερόμενου αέρα μακριά από τους εσωτερικούς χώρους των κτηρίων. Επιτυχείς στρατηγικές μετριασμού αποτελούν η αναγνώριση και στεγανοποίηση των οδών εισόδου ραδονίου στο κτήριο, καθώς και ο αποτελεσματικός εξαερισμός του εδάφους ακριβώς παρακείμενου στα θεμέλια. Με αυτές τις τεχνικές, οι συγκεντρώσεις ραδονίου τυπικά μειώνονται κατά περίπου 30%. Άλλες τεχνικές στοχεύουν στη μείωση της διαφοράς πίεσης μεταξύ κτηρίου και εδάφους που προκαλεί τη συμεταφορά ραδονίου. Με αυτό τον τρόπο, οι συγκεντρώσεις ραδονίου τυπικά μειώνονται κατά 80-99%. Ταυτόχρονα, τυχούσες βελτιώσεις στα συστήματα αερισμού συνήθως μειώνουν τις συγκεντρώσεις ραδονίου εσωτερικών χώρων έως το πολύ 50% (UNSCEAR, 2000, p. 102). Το συμπαγές τσιμέντο είναι ένα υλικό το οποίο ενεργεί ως ένα είδος φραγμού του αέριου ραδονίου, αφού η διάχυση διαμέσου αυτού πραγματοποιείται με ιδιαίτερη δυσκολία. Επιπρόσθετα, για την κάλυψη ρωγμών σε τοίχους και δάπεδα, συνήθως χρησιμοποιούνται ειδικές επιστρώσεις που χαρακτηρίζονται από μικρή διαπερατότητα, με στόχο τη μείωση του ρυθμού εισόδου του ραδονίου (Πατήρης, 2009, σ. 53-54).

Ως *εξαερισμός* (ventilation) αναφέρεται η διαδικασία που λαμβάνει χώρα με αντικατάσταση του εσωτερικού αέρα ενός κτηρίου από τον εξωτερικό. Για να πραγματοποιηθεί εξαερισμός σε ένα χώρο με κλειστές θύρες και παράθυρα, πρέπει να υφίσταται διαφορά ατμοσφαιρικής πίεσης εντός και εκτός του χώρου, προκαλούμενη από διαφορές θερμοκρασίας και ανέμους. Με το άνοιγμα θυρών και παραθύρων του χώρου, η συγκέντρωση ραδονίου στο εσωτερικό του χώρου εξισώνεται με τη συγκέντρωση εξωτερικού περιβάλλοντος αρκετά άμεσα. Ο *ρυθμός εξαερισμού* λ_v (h^{-1}) (ventilation rate) αντιπροσωπεύεται από πολύπλοκα μεταβαλλόμενη συμπεριφορά στο χρόνο, επηρεαζόμενη από παράγοντες όπως:

- ✧ την εισβολή ή απομάκρυνση αέρα μέσω ρωγμών και ανοιγμάτων στο φέροντα οργανισμό ενός κτηρίου,

- ✧ τη φυσική ανταλλαγή αέρα μεταξύ του εσωτερικού ενός κτηρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος, μέσω ανοιγμάτων του χώρου,
- ✧ την ύπαρξη μηχανικού συστήματος εξαερισμού (Πατήρης, 2009, σ. 54-55).

Για τη θέρμανση ή ψύξη ενός εσωτερικού χώρου, μία λύση είναι να χρησιμοποιηθεί ισορροπημένος εξαερισμός, ο οποίος δεν συμπιέζει ούτε αποσυμπιέζει τον εσωτερικό αέρα, σε σχέση με την πίεση του αέρα στο έδαφος και σε εξωτερικούς χώρους. Αυτή η τεχνική αραιώνει το ραδόνιο μετά την είσοδό του στο κτήριο. Μια άλλη εφαρμογή είναι ο εξαερισμός με ανεμιστήρα, ο οποίος μπορεί να αραιώσει το ραδόνιο εσωτερικού χώρου μετά την είσοδό του στο κτήριο, και ταυτόχρονα μπορεί να μειώσει τις διαφορές πίεσης μεταξύ εδάφους και εσωτερικού χώρου. Σε αρκετές περιπτώσεις, ο συνδυασμός αυτών των τεχνικών μπορεί να παρέχει μεγαλύτερη μείωση στη συγκέντρωση ραδονίου (ICRP126, 2014, p. 63). Σε ό,τι αφορά τα μη προσκολλημένα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου σε ατμοσφαιρικά αερολύματα, η ύπαρξη εξαερισμού στο χώρο αυξάνει το συντελεστή μοριακής διάχυσης, με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας απόθεσής τους (Πατήρης, 2009, σ. 78). Ο άνεμος μπορεί επίσης να μειώσει τις συγκεντρώσεις εισόδου ραδονίου σε ένα κτήριο, λόγω της επίδρασής του στο ραδόνιο του εδάφους που περιβάλλει το κτήριο (Riley *et al.*, 1996). Σε κτήρια που δεν είναι κατασκευασμένα από τοιχοποιία σε τροπικά κλίματα, θα πρέπει να εφαρμόζεται μέσος ημερήσιος ρυθμός εξαερισμού 2 h^{-1} (UNSCEAR, 2000, p. 99).

2.7 Τεχνικές μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους

Η πλειοψηφία των μεθόδων καταμέτρησης της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του εντός ενός συγκεκριμένου όγκου αέρα βασίζεται στην ανίχνευση α -σωματιδίων είτε γ -φωτονίων που εκπέμπονται από τα ραδιονουκλίδια κατά τη ραδιενεργό διάσπασή τους (Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 79; Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 95). Χρησιμοποιούνται επίσης κατάλληλοι συντελεστές βαθμονόμησης, ώστε οι καταγραφές από το σύνολο των α - ή γ -εκπομπών να τροποποιούνται προς συγκέντρωση ραδονίου. Έως σήμερα, δεν απαντάται μέθοδος που να καταμετρά τη συγκέντρωση ραδονίου από τις διασπάσεις του ιδίου του ραδονίου κατ' αποκλειστικότητα. Η μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου πραγματοποιείται με διατάξεις γνωστές ως ανιχνευτές ή μετρητές ραδονίου (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 95).

Οι μέθοδοι μέτρησης σε ό,τι αφορά το είδος των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε:

- ✧ Ενεργητικές τεχνικές (εκείνες που απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια και χρήση αντλιών αέρα για να λειτουργήσουν).
- ✧ Παθητικές τεχνικές (εκείνες στις οποίες αφού τοποθετηθεί ο ανιχνευτής στο σημείο μέτρησης, δεν απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια) (Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 79).

Επιπρόσθετα, οι τεχνικές μέτρησης μπορούν να διακριθούν ως προς το χρόνο απόκρισής τους σε: (I) στιγμιαίων δειγματοληψιών, (II) συνεχούς επιτήρησης, και (III) ολοκληρωτικές. Παρακάτω θα αναλυθούν συνοπτικά οι τεχνικές μέτρησης που κατηγοριοποιούνται σχετικά με το χρόνο απόκρισής τους.

I) Τεχνικές στιγμιαίων δειγματοληψιών

Η τεχνική στιγμιαίας δειγματοληψίας αφορά τη μέτρηση της συγκέντρωσης ^{222}Rn σε διακριτό δείγμα αέρα, όγκου περίπου 200-250 cm³, που συλλέγεται για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, συγκριτικά με τη μέση διάρκεια ζωής του ραδονίου, σε ένα μόνο σημείο, και οδηγείται σε έναν ενεργητικό ανιχνευτή, αποδίδοντας μια τιμή στη διάρκεια της δειγματοληψίας. Ταυτόχρονα, εξασφαλίζοντας πολύ μικρά διαστήματα συλλογής δειγμάτων, η τιμή ουσιαστικά αντιστοιχεί στη συγκέντρωση ραδονίου τη στιγμή έναρξης της καταμέτρησης (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 95; Baskaran, 2016, p. 15). Το διάστημα συλλογής ποσότητας αέρα έχει εύρος από λίγα μόνο λεπτά έως μερικές ώρες. Η εν λόγω τεχνική εφαρμόζεται στην περίπτωση που απαιτείται ταχέως εκτίμηση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας, αλλά και για την εκτίμηση της εξέλιξης των συγκεντρώσεων χρονικά σε ένα χώρο (Πατήρης, 2009, σ. 97). Η μέθοδος έχει πολύ περιορισμένη χρήση για προσδιορισμό των μέσων συγκεντρώσεων ραδονίου εσωτερικού αέρα, οι οποίες προσδιορίζονται καταλληλότερα βάσει μακροπρόθεσμων μετρήσεων (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 21).

II) Τεχνικές συνεχούς επιτήρησης

Η τεχνική συνεχούς παρακολούθησης παρέχει συγκεντρώσεις ^{222}Rn σε δείγματα αέρα, και η δειγματοληψία και η μέτρηση πραγματοποιούνται ταυτόχρονα (Baskaran, 2016, p. 17). Η μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου διαρκεί μερικά λεπτά έως αρκετές ημέρες, και λαμβάνει χώρα χρησιμοποιώντας ενεργητικούς ανιχνευτές. Ως αποτέλεσμα προκύπτει ένα σύνολο τιμών που αντιστοιχεί στις συγκεντρώσεις ραδονίου στον αέρα, για διάφορες χρονικές στιγμές, το οποίο χρησιμεύει στην λεπτομερή παρακολούθηση μεταβολής της συγκέντρωσης του ραδονίου ανάλογα με το χρόνο (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 95). Η τεχνική συνεχούς επιτήρησης, με δειγματοληψία που αφορά εβδομάδες ή και μήνες, χρησιμοποιείται όταν το αντικείμενο διερεύνησης είναι η χρονική διακύμανση των

συγκεντρώσεων ραδονίου, είτε εφόσον οι συγκεντρώσεις αυτές συσχετίζονται με μεγέθη που μεταβάλλονται συνεχώς ως προς το χρόνο, όπως η υγρασία, η θερμοκρασία και ο ρυθμός έκλυσης ραδονίου (Πατήρης, 2009, σ. 98). Ως αποτέλεσμα, μπορούν να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με την αναλογία ανάμεσα σε ημερήσια και νυκτερινή συγκέντρωση ραδονίου σε ένα χώρο, είτε οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων αυτού ημερησίως. Τέτοιες πληροφορίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις τεχνικές μετρίασης έναντι έκθεσης σε ραδόνιο επαγγελματικών χώρων, στους οποίους η πληρότητα είναι μικρότερη από αυτήν των κατοικιών (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 21).

III) Ολοκληρωτικές τεχνικές

Η ολοκληρωτική τεχνική παρέχει την ολοκληρωμένη μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Συνίσταται για τον προσδιορισμό της μηνιαίας ή ετήσιας μέσης συγκέντρωσης ^{222}Rn ενός συγκεκριμένου κτηρίου, και επιτυγχάνεται τόσο με ενεργητικούς, όσο και με παθητικούς ανιχνευτές. Ολοκληρωμένα αποτελέσματα μπορούν επίσης να προσδιοριστούν από συνεχείς μακροχρόνιες εγγραφές μετρήσεων (Baskaran, 2016, p. 17). Ως αποτέλεσμα μιας ολοκληρωτικής μέτρησης είναι μια τιμή που αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή όλων των πραγματικών συγκεντρώσεων, που έλαβε χώρα εντός του χρονικού διαστήματος καταμέτρησης (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 95). Εξαιτίας της παρατεταμένης έκθεσής των ανιχνευτών σε ραδόνιο, τα συστήματα ολοκληρωτικών τεχνικών μένουν σχεδόν ανεπηρέαστα από παράγοντες που μεταβάλλουν τη συγκέντρωση αυτού για μικρά χρονικά διαστήματα, όπως είναι οι αλλαγές στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, ο αιφνίδιος εξαερισμός του χώρου που είναι τοποθετημένοι οι ανιχνευτές, αλλά και η μεταβλητότητα του ρυθμού εκροής ραδονίου από το έδαφος. Ως μέθοδοι είναι ευρύτατα χρησιμοποιούμενες για τους υπολογισμούς δοσιμετρίας (Πατήρης, 2009, σ. 98).

2.7.1 Τεχνικές μέτρησης με ενεργητικούς ανιχνευτές

Οι τεχνικές καταγραφής της συγκέντρωσης ραδονίου με ενεργητικούς ανιχνευτές, ή διαφορετικά ενεργητικές τεχνικές μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου, βασίζονται σε συσκευές που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ισχύ, με ή χωρίς την παρουσία ανθρώπινου δυναμικού. Σήμερα υφίστανται πολλαπλοί τύποι τέτοιων συσκευών, οι οποίες αποτελούνται από έναν κατάλληλο θάλαμο όπου και εισέρχεται το ραδόνιο. Ανάλογα με τον τύπο θαλάμου που χρησιμοποιείται και τη μέθοδο που ακολουθείται, κατά τη μέτρηση γίνεται υπολογισμός της μέσης συγκέντρωσης ραδονίου, η οποία αναγνωρίζεται σε κατάλληλη οθόνη που φέρει η συσκευή. Οι σημαντικότεροι τύποι θαλάμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε

ενεργητικούς ανιχνευτές είναι: (i) σπινθηρισμών, (ii) ιοντισμού, και (iii) ημιαγωγικών τοιχωμάτων. Παρακάτω θα αναλυθούν λεπτομερέστερα οι ενεργητικές τεχνικές μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου.

i) Θάλαμοι σπινθηρισμών

Οι θάλαμοι φέρουν μερική ή ολική επίστρωση από έναν ειδικό σπινθηριστή, ο οποίος είναι ευαίσθητος σε α -σωματίδια ή γ -ακτινοβολία. Αναλόγως την ανίχνευση και με τη βοήθεια κατάλληλων ηλεκτρονικών, γίνεται καταμέτρηση ενός αριθμού γεγονότων διασπάσεων της αλυσίδας ραδονίου, από όπου και υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση ραδονίου κατά τη μέτρηση. Συγκεκριμένα, το ραδόνιο εισέρχεται εντός του θαλάμου με δειγματοληψία αερίου μάζας, η οποία και κατακρατείται έως το πέρας της μέτρησης. Επομένως, η ενεργητική αυτή τεχνική μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου αποτελεί μια μέθοδο στιγμιαίας δειγματοληψίας. Πριν τη διεξαγωγή οποιασδήποτε άλλης μέτρησης, ο θάλαμος σπινθηρισμών καθαρίζεται διοχετεύοντας εσωτερικά ρεύμα αζώτου.

ii) Θάλαμοι ιοντισμού

Εντός έκαστου θαλάμου υφίσταται ένα κατάλληλα φορτισμένο ηλεκτρόδιο όπου και συλλέγονται ιόντα, τα οποία δημιουργούνται από ιοντισμούς προκαλούμενους από τις ραδιενεργές διασπάσεις της αλυσίδας ραδονίου που απαντάται στο θάλαμο. Το ραδόνιο εισέρχεται με ελεύθερη διάχυση μέσω κατάλληλου πορώδους φίλτρου. Ο τρόπος εισαγωγής του ραδονίου στο θάλαμο, προμηνύει ότι η ενεργητική αυτή τεχνική μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου λαμβάνει χώρα με συνεχή επιτήρηση. Ο υπολογισμός της μέσης συγκέντρωσης ραδονίου κατά τη διάρκεια της μέτρησης γίνεται μέσω της μεταβολής του δυναμικού του ηλεκτροδίου, χρησιμοποιώντας κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

iii) Θάλαμοι ημιαγωγικών τοιχωμάτων

Κάθε θάλαμος φέρει στα τοιχώματά του ημιαγωγικά υλικά, τα οποία δύνανται να καταμετρήσουν γεγονότα α -διασπάσεων, απ' όπου και υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση ραδονίου. Το ραδόνιο εισέρχεται στο θάλαμο, ομοίως με προηγουμένως, με ελεύθερη διάχυση, μέσω κατάλληλου πορώδους φίλτρου ή με δειγματοληψία αερίων μαζών. Αυτή η ενεργητική τεχνική μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου μπορεί είτε να λαμβάνει χώρα με συνεχή επιτήρηση, είτε να αποτελεί μέθοδο στιγμιαίας δειγματοληψίας.

Στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι στην περίπτωση **συνεχούς επιτήρησης** της συγκέντρωσης του ραδονίου, τα τελευταία χρόνια απαντώνται ιδιαίτερος εξελιγμένα όργανα μετρήσεων, με δυνατότητα ταχείας απόκρισης (5-10 min), εξαιρετικού εύρους αποκρίσεων (μερικών έως

εκατομμυρίων Bq/m³), και ταυτόχρονα μεγάλου χώρου αποθήκευσης δεδομένων. Αναλόγως την περίπτωση, η συνεχής επιτήρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου μπορεί να λαμβάνει χώρα από μερικές ώρες έως και 2-3 μήνες. Τα όργανα μετρήσεων είναι πολύ φιλικά στη χρήση, συνοδευόμενα από κατάλληλο λογισμικό απλής επεξεργασίας δεδομένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Σε περισσότερο εξελιγμένα όργανα μέτρησης, μέσω αντλιών μπορούν να διοχετευθούν επίσης μέσα στους θαλάμους δείγματα αέρα, οπότε και μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου με α -φασματοσκοπικές μεθόδους. Να επισημανθεί ότι με τα όργανα αυτά επιτυγχάνεται μέτρηση ακόμη και εντός 2 h από τη δειγματοληψία, ώστε να καθίσταται παράλληλα δυνατή η παρακολούθηση των μεταβολών της συγκέντρωσης των θυγατρικών στον αέρα. Τελευταίως, απαντώνται επίσης όργανα που δύνανται να διακρίνουν τόσο τα ελεύθερα θυγατρικά, όσο και εκείνα που είναι προσκολλημένα σε σωματίδια αερολυμάτων (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 97-98).

2.7.2 Τεχνικές μέτρησης με παθητικούς ανιχνευτές

Οι παθητικές τεχνικές μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου είναι συνήθως απλές και εύκολες στη χρήση, έχουν ανταγωνιστικό κόστος, και είναι κατάλληλες για ερευνητική εργασία και για μακροπρόθεσμες μετρήσεις (Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 79).

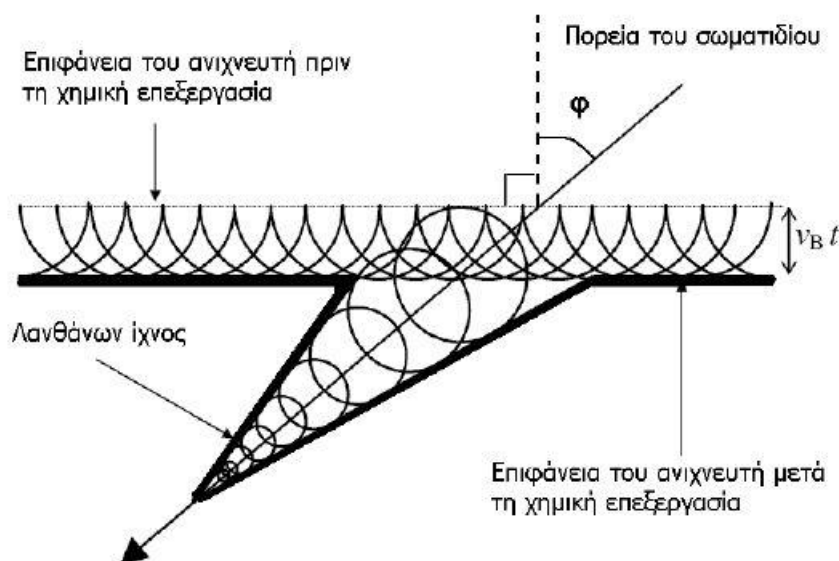
Οι σημαντικότεροι τύποι παθητικών ανιχνευτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι: (α) καταγραφής ιχνών, (b) ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα, και (c) ηλεκτρίσιμων υλικών. Παρακάτω θα αναλυθούν λεπτομερέστερα οι προαναφερθείσες παθητικές τεχνικές μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου.

a) Ανιχνευτές καταγραφής ιχνών (alpha track detectors)

Στις μέρες μας είναι διαθέσιμος ένας μεγάλος αριθμός από πλαστικά ή πολυμερή υλικά, ικανά να διατηρούν σταθερή την πρωταρχική βλάβη που προκαλείται σε αυτά από τη διέλευση α -πυρηνικών σωματιδίων. Αυτή η βλάβη, με κατάλληλη διαδικασία χημικής επεξεργασίας μπορεί να γίνεται ορατή σαν ίχνος. Τα υλικά αυτά αποκαλούνται Ανιχνευτές Πυρηνικών Ιχνών (Solid State Nuclear Track Detectors, SSNTDs), με συνηθέστερους τύπους ανίχνευσης ραδονίου τη μεμβράνη νιτρικής κυτταρίνης LR-115, το πλαστικό θερμοσκληρυνόμενου πολυμερούς CR-39, το πολυανθρακικό πλαστικό Makrofol (Bohicchio *et al.*, 1995, p. 23), το πολυμερές PAPD (Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 79), και τελευταίως το SR-86 (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 96). Η διαδρομή ενός α -σωματιδίου από τη διάσπαση του ραδονίου μέσα από έναν SSNTD προκαλεί μία στενή βλάβη κατά μήκος της τροχιάς του, τυπικού μήκους συνήθως 20-70 μm , η οποία αρχικά δεν είναι ορατή

(Bochicchio *et al.*, 1995, p. 23). Τα α -σωματίδια από τη ραδιενεργό διάσπαση του ^{222}Rn εκπέμπονται με ενέργεια 5.5 MeV, και από τα προϊόντα διάσπασής του ^{218}Po και ^{214}Po , με ενέργειες 6.0 MeV και 7.7 MeV αντίστοιχα. Τα α -σωματίδια, καθώς κινούνται μέσα στον αέρα, χάνουν διαρκώς ενέργεια, και κατά συνέπεια φθάνουν στον ανιχνευτή με ενέργειες από περίπου 0 έως 7.7 MeV (Στούλος, 1998, σ. 15). Η παραγωγή ορατού ίχνους γίνεται με χρήση ειδικού χημικού διαβρωτικού, συνήθως καυστικού διαλύματος NaOH ή KOH, που διαβρώνει επιλεκτικά το υλικό ανίχνευσης ταχύτερα κατά μήκος της εγγεγραμμένης τροχιάς από οπουδήποτε αλλού, έχοντας ως αποτέλεσμα τη διεύρυνση των ιχνών (Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 79-80). Η διαδικασία της *χημικής διάβρωσης ή χάραξης* (chemical etching) των ανιχνευτών μπορεί να λάβει χώρα επίσης και με διαλύματα των NaOH και KOH με αλκοόλες, που προκαλούν επιτάχυνση της διαδικασίας διάβρωσης, ενώ η θερμοκρασία πραγματοποίησής της είναι συνηθέστερα 25-80 °C (Πατήρης, 2009, σ. 105). Αρχικά δηλαδή δημιουργείται το *λανθάνον ίχνος*, με την αλληλεπίδραση του υλικού του ανιχνευτή με το α -σωματίδιο, ενώ στη συνέχεια παράγεται το *εγχαράξιμο ίχνος*, μέσω της χημικής αλληλεπίδρασης του υλικού του ανιχνευτή με το καυστικό διάλυμα (Πατήρης, 2009, σ. 103). Πιο συγκεκριμένα, η επιφάνεια του ανιχνευτή πυρηνικών ιχνών χαράσσεται με ένα ρυθμό χαρακτηριστικό του υλικού του ανιχνευτή, του είδους και της συγκέντρωσης του καυστικού διαλύματος που χρησιμοποιείται κατά τη χάραξη, αλλά και των συνθηκών υπό τις οποίες γίνεται η χημική επεξεργασία, π.χ. θερμοκρασία. Ο ρυθμός αυτός αποκαλείται *ρυθμός διάβρωσης ή χάραξης του υλικού του ανιχνευτή* U_b (bulk etching rate), και θεωρείται σταθερός σε ολόκληρη την επιφάνεια του SSNTD. Στην περιοχή που δημιουργούνται τα λανθάνοντα ίχνη, η χημική αλληλεπίδραση είναι ταχύτερη. Ο *ρυθμός διάβρωσης ή χάραξης της περιοχής του ίχνους* U_t (track etching rate), που είναι χαρακτηριστικός της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων με το υλικό του ανιχνευτή, και εξαρτώμενος της μάζας και του φορτίου του α -σωματιδίου, καθώς και της γραμμικής μεταφοράς ενέργειας (Linear Energy Transfer, LET) και της περιορισμένης απώλειας ενέργειας (Restricted Energy Loss, REL), είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό διάβρωσης του υλικού του ανιχνευτή (Πατήρης, 2009, σ. 106-107; Κοντάκου, 2011, σ. 52-53). Η χάραξη της περιοχής του ίχνους ακολουθεί τη διαδρομή του σωματιδίου που το προκάλεσε, ενώ σημαίνει παύση στο σημείο όπου το σωματίδιο τερματίζει την τροχιά του. Για την εμφάνιση του ίχνους, βασική συνθήκη αποτελεί η εφαρμογή της σχέσης: $U_t \cos \varphi > U_b$, όπου:

ϕ : η γωνία πρόσπτωσης του α -σωματιδίου ως προς την κάθετο προς την επιφάνεια του ανιχνευτή. Η σχηματική αναπαράσταση της επιφάνειας του ανιχνευτή μετά από χημική χάραξη φαίνεται στην Εικόνα 2.7.2.1 (Πατήρης, 2009, σ. 106).



Εικόνα 9: Αναπαράσταση επιφάνειας SSNTD έπειτα από χημική διάβρωση για χρονικό διάστημα t .
(Πηγή: Πατήρης, 2009, σ. 106)

Ο λόγος $V = \frac{U_t}{U_b}$ αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο, βάσει της οποίας καθορίζονται

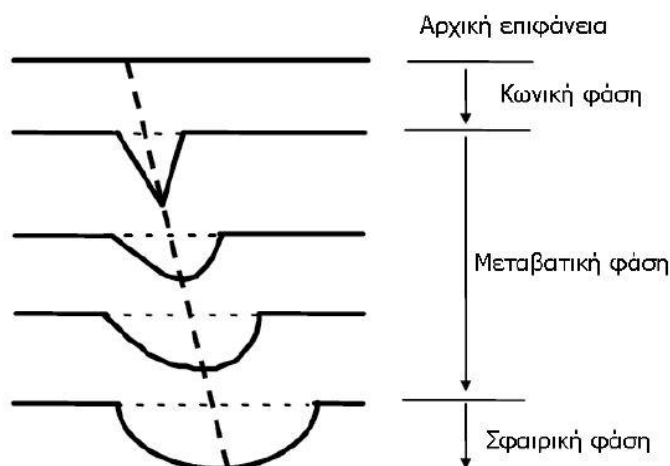
οι ιδιότητες των φορτισμένων σωματιδίων που καταγράφονται σε κρυσταλλικά και πολυμερή διηλεκτρικά μέσα. Βάσει του λόγου αυτού υπολογίζονται επίσης η κρίσιμη γωνία διάβρωσης θ_{cr} (critical angle of etching) και η απόδοση της χημικής διάβρωσης (etching efficiency) (Κοντάκου, 2011, σ. 53). Ο λόγος για τον οποίο γίνεται αναφορά, μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, και συνήθως αποκαλείται απόκριση του ανιχνευτή (detector's response) (Πατήρης, 2009, σ. 107). Η κρίσιμη γωνία διάβρωσης εκφράζει τη χαμηλότερη τιμή που μπορεί να λάβει η γωνία με την οποία το σωματίδιο προσπίπτει στην επιφάνεια του ανιχνευτή, ώστε τα προκύπτοντα ίχνη να δύνανται να γίνουν ορατά με τη διαδικασία της χημικής διάβρωσης. Η απόδοση της χημικής διάβρωσης αναφέρεται στην πιθανότητα αποκάλυψης ιχνών στην περίπτωση που ο ανιχνευτής εφάπτεται με πηγή φορτισμένων σωματιδίων, και είναι ίση με: $\cos^2 \theta_{cr}$, όπου: $\theta_{cr} = \sin^{-1} \frac{U_b}{U_t}$ (Κοντάκου, 2011, σ. 53). Η

συμπληρωματική γωνία της κρίσιμης γωνίας διάβρωσης είναι η γωνία καταγραφής ϕ_{cr} (registration angle) του σωματιδίου, η οποία δίνεται από τη σχέση: $\phi_{cr} = \arccos \frac{U_b}{U_t}$. Τα

προσπίπτοντα σωματίδια υπό μεγαλύτερη γωνία από τη γωνία καταγραφής ϕ_{cr} , προκαλούν

λανθάνοντα ίχνη που είναι αδύνατο να μεγεθυνθούν (Πατήρης, 2009, σ. 106-107). Αντίθετα, τα προκύπτοντα ίχνη από σωματίδια που προσπίπτουν με μικρότερη γωνία από την κρίσιμη γωνία διάβρωσης θ_{cr} , ουσιαστικά δεν καταγράφονται στη διαβρωμένη επιφάνεια του υλικού, οπότε και δεν γίνονται ορατά (Κοντάκου, 2011, σ. 53).

Επιπλέον, σημαντική είναι η μεταβολή του σχήματος των ιχνών κατά τη διάρκεια της χημικής διάβρωσης. Με εκτίμηση ότι η διάρκεια της χημικής επεξεργασίας είναι τέτοια ώστε το χημικό διαβρωτικό διάλυμα να φθάσει μέχρι το σημείο που το σωματίδιο τερματίζει την τροχιά του, το σχήμα έκαστου ίχνους διέρχεται από τρεις φάσεις. Όπως διαφαίνεται και στην Εικόνα 2.7.2.2, οι φάσεις αυτές είναι η κωνική, η μεταβατική και η σφαιρική φάση (Πατήρης, 2009, σ. 107).



Εικόνα 10: Αναπαράσταση φάσεων που διέρχεται το σχήμα του ίχνους κατά τη χημική χάραξη του ανιχνευτή. (Πηγή: Πατήρης, 2009, σ. 107)

Στην κωνική και μεταβατική φάση, το ίχνος λαμβάνει σταδιακά κωνικό σχήμα με κορυφή που συνεχώς αμβλύνεται. Κατά τη διάρκεια αυτών των φάσεων, ο ρυθμός διάβρωσης της περιοχής του ίχνους, U_i , εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό διάβρωσης του υλικού του ανιχνευτή, U_b . Με την ολοκλήρωση της μεταβατικής φάσης, εφόσον το διαβρωτικό διάλυμα φθάσει στο πέρας της τροχιάς του σωματιδίου, το ίχνος λαμβάνει σφαιρικό σχήμα. Στην περίπτωση που η χημική χάραξη του ανιχνευτή συνεχιστεί και μετά τη σφαιρική φάση, η περιοχή του ίχνους καθώς και η υπόλοιπη επιφάνεια του ανιχνευτή χαράσσονται με σταθερό ρυθμό, ενώ το σχήμα του ίχνους αυξάνει σε μέγεθος, παραμένοντας σφαιρικό, με τους ρυθμούς U_b και U_i να είναι ίσοι (Πατήρης, 2009, σ. 107-108).

Με τη χάραξη, τα ίχνη γίνονται ορατά σαν οπές συγκεκριμένου τύπου σε οπτικό μικροσκόπιο, όπου και καταμετρώνται. Η πυκνότητα ιχνών του ανιχνευτή (ίχνη/cm²)

μετατρέπεται σε συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m^3) του εσωτερικού αέρα του κτηρίου με κατάλληλη βαθμονόμηση (Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 80).

Επιπρόσθετα, στην περίπτωση εφαρμογής κατάλληλου εναλλασσόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (ηλεκτροχημική διάβρωση), τα ίχνη αποκτούν διαφορετική και χαρακτηριστικότερη μορφή (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 96). Τα ίχνη χημικής και ηλεκτροχημικής διάβρωσης δύνανται να αναγνωσθούν χειροκίνητα με μικροσκόπιο, είτε μέσω αυτόματων μηχανογραφικών συστημάτων ανάλυσης εικόνας (Bohicchio *et al.*, 1995, p. 23; Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 96).

Από το παρελθόν μέχρι και σήμερα, οι SSNTDs χρησιμοποιούνται, για μετρήσεις ραδονίου. Η χρήση αυτών των ανιχνευτών ακολουθεί ωστόσο τον περιορισμό να καταγράφει μεγάλη ποσότητα ιχνών, μια διαδικασία ιδιαίτερα αργή, ακόμα και για υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. Επομένως, με την τοποθέτηση των δοσιμέτρων (δοχεία που περιλαμβάνει τους ανιχνευτές) σε κάποιο σημείο ενός κτηρίου, πραγματοποιούνται κυρίως ολοκληρωτικές μετρήσεις μεγάλου χρονικού διαστήματος (2- 12 μήνες) (Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 79). Περιορισμένα έχουν αναφερθεί ολοκληρωτικές μετρήσεις μικρού χρονικού διαστήματος (0.5-1 μήνα) (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 96). Οι περισσότεροι ανιχνευτές α -ιχνών ραδονίου αποτελούνται από μερικά cm^2 του υλικού SSNTD, και έκαστος τοποθετείται μέσα σε έναν μικρό, σχεδόν αεροστεγή, κλειστό θάλαμο (Bohicchio *et al.*, 1995, p. 24). Η διάταξη που δημιουργείται, γνωστή ως *ανιχνευτής ραδονίου καταγραφής ιχνών* (radon track etch detector), καταλαμβάνει πολύ μικρό χώρο και συνήθως εμποδίζει την είσοδο θυγατρικών από τον αέρα του χώρου. Αναλόγως τον θάλαμο, το ραδόνιο διαχέεται στο εσωτερικό του μέσω μικρών οπών, είτε μέσω του ίδιου του υλικού κατασκευής του. Τα α -σωματίδια (ίχνη) από διασπάσεις της αλυσίδας του ραδονίου που έχει διαχυθεί στο θάλαμο, καταμετρούνται από τον SSNTD καθ' όλη τη διάρκεια της μέτρησης, και ακολούθως δύναται να υπολογιστεί η μέση συγκέντρωση του ραδονίου στο χώρο τοποθέτησης του ανιχνευτή.

Με τους SSNTDs, εκτός από ραδόνιο μετρούνται και θυγατρικά ραδονίου. Συνήθως οι ανιχνευτές τοποθετούνται γυμνοί, ή εντός ειδικών κατασκευών, επιτρέποντας επιλεκτική μέτρηση α -σωματιδίων. Η τεχνική είναι ολοκληρωτική, και η μοναδική τέτοιου τύπου για μέτρηση θυγατρικών ραδονίου, παρουσιάζοντας συνήθως πολλαπλές διακυμάνσεις, λόγω του πλήθους των παραγόντων που επηρεάζουν τη συγκέντρωση των θυγατρικών ραδονίου στον αέρα. Συνεπώς, η μέτρηση θυγατρικών ραδονίου με SSNTDs κρίνεται ανεπαρκής, και πρέπει συγχρόνως να συνδυάζεται με πλήθος μετρούμενων παραγόντων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν ωστόσο παρουσιάζουν αβεβαιότητα και αμφιλεγόμενη χρησιμότητα, καθώς

το ενδιαφέρον για τα θυγατρικά δεν εστιάζεται στη μέση συγκέντρωσή τους, αλλά στις πιθανώς εμφανιζόμενες αιχμές, κατά τη διάρκεια των οποίων υπάρχει έντονη επιβάρυνση στην ανθρώπινη υγεία (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 96).

Οι παθητικοί ανιχνευτές ιχνών αποτελούν μία μέθοδο ολοκληρωτικής μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου στον εσωτερικό αέρα κατοικιών, καθότι είναι χαμηλού κόστους, αξιόπιστοι και απλοί στη χρήση (Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 79). Ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι το αποτέλεσμα της μέτρησης δεν μπορεί να δοθεί επί τόπου από το πεδίο, αλλά οι ανιχνευτές πρέπει να αποστέλλονται σε εργαστήριο επεξεργασίας, εφοδιασμένο με τον εξοπλισμό για την επεξεργασία και τη μέτρησή τους (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 24). Συγχρόνως, οι ανιχνευτές αυτής της κατηγορίας δύνανται να χρησιμοποιηθούν μόνο μία φορά (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 96).

b) Ανιχνευτές ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα (*charcoal detectors*)

Η προσρόφηση ραδονίου από ενεργοποιημένο ξυλάνθρακα χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια ως μέθοδος ανίχνευσης. Η διαδικασία είναι απλή. Συγκεκριμένα, η γ-ακτινοβολία που εκπέμπεται από το ραδόνιο και τα προϊόντα διάσπασής του στον άνθρακα, μετράται με έναν ανιχνευτή ακτίνων-γ, όπως το ιωδιούχο νάτριο (NaI(Tl)). Ο ανιχνευτής ξυλάνθρακα είναι κατάλληλος για μετρήσεις ραδονίου εσωτερικών χώρων, και συνήθως αποτελείται από ένα επίπεδο μεταλλικό κύλινδρο μικρού μεγέθους, όγκου περίπου 400 cm³, που περιέχει τον ξυλάνθρακα, ενώ περιλαμβάνει ένα φράγμα διάχυσης μεταξύ ξυλάνθρακα και αέρα, ώστε ο ρυθμός προσρόφησης ραδονίου να είναι ανάλογος με τη συγκέντρωσή του στον αέρα. Η εν λόγω μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για έρευνες ραδονίου μεγάλης κλίμακας. Η μέθοδος του ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα είναι μια παθητικής ανίχνευσης, βραχυπρόθεσμη ολοκληρωτική τεχνική, χαμηλού κόστους και ικανοποιητικής ακρίβειας, ώστε η συγκέντρωση ραδονίου σε τυπικά επίπεδα εσωτερικών χώρων να προσμετράται εντός λίγων μόνο ημερών (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 24). Σημαντικό μειονέκτημα της τεχνικής είναι ότι ο ολοκληρωτικός της χρόνος περιορίζεται σε λίγο περισσότερο από μία εβδομάδα, καθότι ο ξυλάνθρακας προσροφά υγρασία, αποτελώντας εμπόδιο στην προσρόφηση επιπλέον ραδονίου (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 97). Η χρήση ενός φράγματος διάχυσης μπορεί να μειώσει τις επιπτώσεις λόγω της υψηλής υγρασίας (WHO, 2009, p. 24). Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι μετά την ολοκλήρωση της έκθεσης του ραδονίου σε ένα κτήριο, ο ανιχνευτής ξυλάνθρακα που περιέχει το προσροφημένο ραδόνιο πρέπει να αποστέλλεται αρκετά σύντομα στο εργαστήριο μέτρησης προς ανάλυση, ώστε ο ρυθμός εκπομπής ακτινοβολίας-γ να είναι μετρήσιμος (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 24). Να επισημανθεί ότι μετά

την καταμέτρηση του ραδονίου, ο ανιχνευτής θερμαίνεται ώστε να απελευθερωθεί η υγρασία, και να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 97).



Εικόνα 11: Ανοιγμένο δοχείο ενεργού ξυλάνθρακα (αριστερά) & κλειστό δοχείο ενεργού ξυλάνθρακα (δεξιά). (Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/239815223_fig1_Figure-1-Photograph-showing-two-activated-charcoal-canisters-The-opened-canister-shows)

c) Ανιχνευτές ηλεκτρίσιμων υλικών (electret detectors)

Το διηλεκτρικό είναι υλικό το οποίο όταν φορτιστεί μπορεί να διατηρεί το φορτίο του και το σχετικό με αυτό ηλεκτρικό δυναμικό, για περίοδο ενός έτους ή και περισσότερο. Τέτοια υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί παρελθοντικά, αλλά όχι εκτενώς, ως ηλεκτροστατικοί συλλέκτες φορτισμένων προϊόντων διάσπασης ραδονίου από τον αέρα, τα οποία μπορούν ακολούθως να μετρηθούν με ανιχνευτή σπινθηρισμών, ή άλλον κατάλληλο ανιχνευτή (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 25). Τα τελευταία χρόνια είναι διαθέσιμοι εξαιρετικής ακρίβειας μετρητές ραδονίου, οι οποίοι βασίζονται στους ηλεκτρισμούς υλικών. Ένα υλικό ηλεκτρισμών φορτίζεται σε μεγάλο δυναμικό και τοποθετείται σε κατάλληλο δοχείο, το οποίο δύναται να κλείνει και να ανοίγει μέσω περιστροφικού πώματος, ώστε, για κλειστό πώμα ο ανιχνευτής να μην απορροφά ραδόνιο, ενώ για ανοικτό πώμα, να απορροφά. Όταν λοιπόν με ανοικτό πώμα ο ανιχνευτής απορροφά ραδόνιο, αυτό διασπάται και ιοντίζει τον αέρα, παράγοντας ιόντα που μεταβάλλουν το δυναμικό του υλικού ηλεκτρισμών, οδηγώντας στον υπολογισμό της συγκέντρωσης ραδονίου στο χρόνο μέτρησης. Η μέθοδος έχει χαμηλό ολικό κόστος και ικανοποιητική ακρίβεια, ωστόσο μικρότερη από αυτή των υπόλοιπων παθητικών ανιχνευτών έως σήμερα. Η τεχνική είναι ολοκληρωτική, δε χρειάζεται να γίνεται αποστολή του υλικού ηλεκτρισμού σε εργαστήριο, ωστόσο ο ολοκληρωτικός της χρόνος περιορίζεται σε μερικές μόνο μέρες, λόγω φαινομένων κορεσμού που λαμβάνουν χώρα στο υλικό ηλεκτρισμού (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 97).



Εικόνα 12: Ανιχνευτής ηλεκτρίσιμων υλικών (electret) ε-PERM. (Πηγή: <http://evgpot.weebly.com/piepsilon943rhoalphamualpha-1.html>)

Στον Πίνακα 2.7.2.1 που ακολουθεί συνοψίζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά ανιχνευτών ραδονίου, παθητικών και ενεργητικών (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 98).

Πίνακας 2.7.2.1: Κυριότερα χαρακτηριστικά παθητικών & ενεργητικών ανιχνευτών ραδονίου και θυγατρικών του. (Πηγή: Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 98).

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

Αξιόλογο παράδειγμα μέτρησης ραδονίου με χρήση δοσιμετρητών CR-39 αποτελεί η έρευνα μέτρησης ραδονίου στο εσωτερικό 80 κατοικιών στο Ισλαμαμπάντ του Πακιστάν, που διεξήχθη από τους Rahman *et al.* (2008). Οι δοσιμετρητές CR-39 τοποθετήθηκαν στο υπόγειο (εφόσον υπήρχε), στο ισόγειο και στον πρώτο όροφο των οικιών, σε σαλόνι και υπνοδωμάτιο, για περίοδο 3 μηνών. Μετά την έκθεση των δοσιμέτρων, για την παραγωγή ορατών ιχνών, οι ανιχνευτές CR-39 χαράχθηκαν για 16 h με διαβρωτικό διάλυμα NaOH συγκέντρωσης 6M, στους 80 °C και μετρήθηκαν με οπτικό μικροσκόπιο. Στη συνέχεια, οι παρατηρούμενες πυκνότητες ιχνών τροχιάς μετατράπηκαν σε επίπεδα συγκέντρωσης ραδονίου με χρήση συντελεστή βαθμονόμησης ίσο με 2.7 ίχνη/(cm²·h)/(kBq/m³). Το αποτέλεσμα της μέτρησης ήταν χαμηλές συγκεντρώσεις εσωτερικού ραδονίου.

Σε μια άλλη ενδιαφέρουσα έρευνα, αυτή των Stojanovska *et al.* (2011), έγιναν εποχιακές μετρήσεις ραδονίου στο εσωτερικό 437 κατοικιών, σε όλες τις περιοχές του FYROM. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με παθητικούς ανιχνευτές καταγραφής ιχνών τύπου RSKS και RADUET, σε τέσσερις διαδοχικές τρίμηνες περιόδους (χειμώνα, άνοιξη, καλοκαίρι και

φθινόπωρο), καθ' όλη τη διάρκεια του 2009. Ο τύπος ανιχνευτή RSKS αποτελείται από ένα τσιπ CR-39 τοποθετημένο σε ένα κυλινδρικό θάλαμο διάχυσης, διαστάσεων $\varnothing 25 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$. Ταυτόχρονα χρησιμοποιήθηκε ο τύπος ανιχνευτή RADUET, για τη συνδυασμένη ανίχνευση ραδονίου και θορονίου, αποτελούμενος από δύο τσιπ ανιχνευτών CR-39, στερεωμένα σε τμήμα δοχείου δύο θαλάμων διάχυσης, διαστάσεων $\varnothing 60 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$. Ο κύριος θάλαμος του ανιχνευτή είναι ευαίσθητος στη δραστηριότητα του ραδονίου, ενώ ο δευτερεύων θάλαμος είναι ευαίσθητος τόσο στο ραδόνιο, όσο και στο θόριο. Μετά τη συλλογή των ανιχνευτών, τα τσιπ CR-39 αποσπάστηκαν από το θάλαμο διάχυσης και χαραχτήκαν χημικά με 25% διάλυμα NaOH για 4.5 h, στους 92 °C. Η μέτρηση των τροχιών πραγματοποιήθηκε με οπτικό μικροσκόπιο εκπομπής φωτός, μέσω αυτοματοποιημένου συστήματος ανάλυσης εικόνας. Το λογισμικό που ήταν συνδεδεμένο με το μικροσκόπιο αναγνώρισε πρώτα την ταυτότητα του ανιχνευτή που ήταν χαραγμένη στην επιφάνεια του CR-39, και ακολούθως, με τον κατάλληλο συντελεστή βαθμονόμησης, έγινε η μετατροπή του μετρημένου αριθμού ιχνών ανά μονάδα επιφάνειας σε επίπεδα έκθεσης σε ραδόνιο εσωτερικού χώρου (Bq/m^3), σύμφωνα με την εξίσωση: $C_{\text{Rn}} = \rho_c f_c \Delta t^{-1}$, όπου:

C_{Rn} (kBq/m^3) η συγκέντρωση ραδονίου,

ρ_c (ίχνη/ mm^2) η πυκνότητα ιχνών τροχιάς,

f_c : ο συντελεστής βαθμονόμησης, και

Δt (h) ο χρόνος έκθεσης.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των ερευνητών εμφάνισαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των συγκεντρώσεων ραδονίου εσωτερικού χώρου για τις εξεταζόμενες περιοχές, σε διαφορετικές εποχές, και συγκεκριμένα σαφώς υψηλότερες συγκεντρώσεις για τη χειμερινή και φθινοπωρινή περίοδο, σε σύγκριση με την άνοιξη και το καλοκαίρι. Αυτές οι εποχιακές διακυμάνσεις έχουν επισημανθεί και από πολλούς άλλους συγγραφείς (Mostafa *et al.*, 2015; Gillmore *et al.*, 2005; Papaefthymiou *et al.*, 2003).

Ορισμένες μελέτες συγκρίνουν τις βραχυπρόθεσμες με τις μακροπρόθεσμες μετρήσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Μια τέτοια χαρακτηριστική έρευνα είναι των Al-Jarallah *et al.* (2008), στην οποία μετρήθηκαν βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα οι συγκεντρώσεις ραδονίου -χαμηλών επιπέδων- σε 34 τοποθεσίες σε πανεπιστήμιο στο Dhahran της Σαουδικής Αραβίας, με ενεργητικές και παθητικές μεθόδους αντίστοιχα. Οι πρώτες χρησιμοποιούνται ευρέως, ενώ οι δεύτερες αντικατοπτρίζουν μια καλύτερη μέση

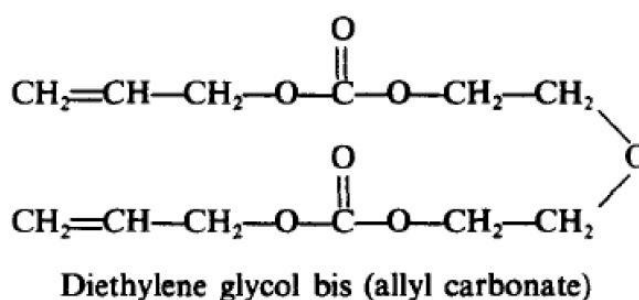
συγκέντρωση ραδονίου από τις μεμονωμένες μετρήσεις. Οι βραχυπρόθεσμες ενεργητικές μετρήσεις έδειξαν ότι η μέση, ελάχιστη και μέγιστη συγκέντρωση ραδονίου ήταν 19, 8 και 58 Bq/m³, αντίστοιχα, με τυπική απόκλιση 8.6 Bq/m³. Απ' την άλλη, οι μακροπρόθεσμες παθητικές μετρήσεις έδειξαν ότι η μέση, ελάχιστη και μέγιστη συγκέντρωση ραδονίου ήταν 25, 10 και 67 Bq/m³, αντίστοιχα, με τυπική απόκλιση 12 Bq/m³. Συσχετίζοντας τις δύο μεθόδους, διαπιστώθηκε μία κακή συσχέτιση ($R^2=0.38$). Η διαφορά στα αποτελέσματα μετρήσεων των δύο μεθόδων οφείλεται κυρίως στον εξαιρεισμό του κτηρίου. Συγκεκριμένα, οι μακροπρόθεσμες μετρήσεις περιελάμβαναν και τα σαββατοκύριακα, κατά τα οποία ο αερισμός στα γραφεία ήταν χαμηλός, επειδή το πανεπιστήμιο δε λειτουργούσε. Συνεπώς, ερμηνεύεται το γεγονός ότι η μακροπρόθεσμη συγκέντρωση ραδονίου είναι υψηλότερη κατά μέσο όρο σε σύγκριση με τις βραχυπρόθεσμες μετρήσεις.

Άλλες μελέτες συγκρίνουν τις αναδρομικές με τις σύγχρονες μετρήσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Μια πολύ ενδιαφέρουσα έρευνα είναι των Žunić *et al.* (2007), στην οποία μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις ραδονίου -υψηλών επιπέδων- στη Niška Banja της Σερβίας με δύο αναδρομικές μεθόδους μέτρησης ραδονίου και σύγχρονες μετρήσεις ραδονίου. Οι δύο μέθοδοι αναδρομικής καταμέτρησης συγκεντρώσεων ραδονίου σε κατοικίες για μεγάλες περιόδους του παρελθόντος, βασίζονται στην ποσότητα του συγκεντρωμένου θυγατρικού ισοτόπου ²¹⁰Po στην επιφάνεια γυάλινων αντικειμένων ή στον όγκο πορώδων υλικών (κυρίως σπόγγους πλήρωσης επίπλων). Ως προς τη συλλογή των δεδομένων, τόσο το αναδρομικά συσσωρευμένο ²¹⁰Po στην επιφάνεια γυάλινων αντικειμένων, όσο και το σύγχρονο ραδόνιο στον αέρα, μετρήθηκαν σε 46 δωμάτια, 32 οικιών της πόλης, χρησιμοποιώντας διπλής διαμόρφωσης ανιχνευτή α-ιχνών (CR-39 και LR115) και CR-39 ανιχνευτές καταγραφής ιχνών αντίστοιχα. Συλλέχθηκαν επίσης δείγματα συγκεντρωμένου ²¹⁰Po στους όγκους κατάλληλου πορώδους υλικού σε 18 δωμάτια, 15 κατοικιών. Η καταμέτρηση των σύγχρονων ετήσιων συγκεντρώσεων ραδονίου κάθε δωματίου διορθώθηκε με εποχιακούς διορθωτικούς συντελεστές. Η κατανομή των συγκεντρώσεων ραδονίου σε όλα τα σύνολα δεδομένων βρέθηκε κοντά στην κανονική λογαριθμική, με παρόμοιο γεωμετρικό μέσο, από 1040 έως 1380 Bq/m³, ενώ οι τυπικές αποκλίσεις για τις δύο αναδρομικές μεθόδους ήταν μεγαλύτερες από αυτές της μεθόδου σύγχρονων μετρήσεων. Η ανάλυση παλινδρόμησης, σε σχέση με την κανονική λογαριθμική κατανομή του κάθε συνόλου δεδομένων, έδειξε συντελεστή συσχέτισης $r=0.85$ μεταξύ των δύο αναδρομικών μεθόδων, $r=0.82$ μεταξύ των μετρήσεων στους όγκους πορώδους υλικού και σύγχρονων μετρήσεων, και $r=0.73$ μεταξύ των μετρήσεων στις επιφάνειες γυάλινων

αντικειμένων και σύγχρονων μετρήσεων, υποδεικνύοντας καλή συμφωνία μεταξύ των δύο αναδρομικών τεχνικών εκτίμησης αερίων ραδονίου και των σύγχρονων μετρήσεων.

2.7.3 Ο ανιχνευτής πυρηνικών ιχνών CR-39

Ο ανιχνευτής CR-39 είναι ένα πλαστικό πολυμερές ανθρακικής αλλυλοδιγλυκόλης (allyl diglycol carbonate), και παρασκευάζεται με πολυμερισμό του μονομερούς δις-αλλυλοανθρακικής διαιθυλενογλυκόλης (diethylenglycol bis allylcarbonate, ADC) σε υγρή μορφή, με παρουσία καταλύτη υπερδιττανθρακικού δι-ισοπροπυλίου (diisopropyl peroxydicarbonate, IPP) και θέρμανση. Στην Εικόνα 13 παρακάτω παρουσιάζεται ο χημικός τύπος του μονομερούς.



Εικόνα 13: Χημικός τύπος μονομερούς δις-αλλυλοανθρακικής διαιθυλενογλυκόλης. (Πηγή: Πατήρης, 2009, σ. 137)

Λόγω της χημικής δομής του, το CR-39 αποτελεί ένα σκληρό και ανθεκτικό υλικό σε μηχανικές καταπονήσεις, σε τριβές και σε καυστικά διαλύματα (Πατήρης, 2009, σ. 137). Ταυτόχρονα είναι δύσστηκτο, εντελώς άμορφο, εξαιρετικά ισότροπο και ομοιογενές, πολύ ευαίσθητο στην ακτινοβολία και σε βλάβες από βαρέα ιόντα, καθώς και αδιάλυτο σχεδόν σε όλους τους διαλύτες με μόνο περιορισμένη διόγκωση. Στο νερό, στους 60°C, η διόγκωση του CR-39 έχει μετρηθεί μόλις 1-1.5%. Το CR-39 ικανοποιεί την απαίτηση ύπαρξης ενός χημικού χαρακτήρα χωρίς διαλύτη που να δύναται να επιτύχει αποικοδόμηση του πολυμερούς του υλικού, αντί να διαλύεται το υλικό σε διάλυμα (Cassou and Benton, 1978). Είναι διαπερατό στο ορατό φάσμα του φωτός και σχεδόν αδιαπέρατο στην υπεριώδη και υπέρυθη ακτινοβολία, έχοντας ως αποτέλεσμα οι οπτικές του ιδιότητες να επιτρέπουν τη χρήση του CR-39 στην κατασκευή φακών για γυαλιά οράσεως, με συντελεστή διαθλάσεως μικρότερο του γυαλιού. Επιπλέον, οι οπτικές ιδιότητες του πολυμερούς παραμένουν αναλλοίωτες, ακόμα και έπειτα από πολύωρη χημική διάβρωση με διαλύματα ισχυρών οξέων είτε βάσεων. Το CR-39 διατηρεί το σχήμα του και δεν υφίσταται παραμόρφωση για θέρμανση έως 100 °C. Στον Πίνακα 2.7.3.1 παρουσιάζονται ορισμένες από τις βασικές φυσικές ιδιότητες του CR-39 (Πατήρης, 2009, σ. 137).

Πίνακας 2.7.3.1: Φυσικές ιδιότητες του CR-39. (Πηγή: Πατήρης, 2009, σ. 137)

Ιδιότητες	Τιμές
Πυκνότητα σε κανονικές συνθήκες (gr/cm ³)	1.32
Συντελεστής διάθλασης στους 20°C	1.452
Θερμοχωρητικότητα (cal/gr°C)	0.55
Σημείο τήξης (°C)	4
Σημείο βρασμού (°C)	166

Το πολυμερές CR-39 αποτελεί μια καλή επιλογή για τη δοσιμετρία ραδονίου. Το πλαστικό παρουσιάζει τέτοια περιβαλλοντική σταθερότητα, ώστε η ευαισθησία έναντι ακτινοβολίας και η ομοιογένεια να μην αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Το πολυμερές CR-39 εκτός από τη δοσιμετρία ραδονίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δοσιμετρία νετρονίων και βαρέων ιόντων, για μελέτες ανάλυσης ισοτόπων βαρέων σωματιδίων κοσμικών ακτινών, καθώς και τη ραδιογραφία σωματιδίων (Cassou and Benton, 1978).

Οι ανιχνευτές CR-39 διατίθενται εμπορικά από αρκετούς κατασκευαστές σε Ηνωμένο Βασίλειο, Η.Π.Α., Ιαπωνία. Τα υλικά κατασκευής των ανιχνευτών έχουν διαφορετική τραχύτητα και πυκνότητα, και από πειράματα των Vázquez-López *et al.* (2001) αποδείχθηκε ότι ο ρυθμός χάραξης της επιφάνειάς τους U_b (μm/h) διαφέρει από διαφορετικούς κατασκευαστές. Πιο συγκεκριμένα, υπό τις ίδιες συνθήκες χημικής επεξεργασίας, σε διάλυμα ΚΟΗ συγκέντρωσης 6.25 M, υπό θερμοκρασία 60 ± 1 °C, για 3h, ο ρυθμός χάραξης U_b των ανιχνευτών από τους κατασκευαστές American Acrylics, Fujii, Landtrack και Pershore, υπολογίστηκε ίσος με 1.13 ± 0.01 μm/h, 1.14 ± 0.01 μm/h, 0.89 ± 0.01 μm/h, και 1.03 ± 0.01 μm/h αντιστοίχως. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι διαφορές παρατηρούνται και μεταξύ ανιχνευτών από τον ίδιο κατασκευαστή (Πατήρης, 2009, σ. 138). Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι κατά τη διαδικασία πολυμερισμού των μονομερών σχηματίζεται ένα τρισδιάστατο δίκτυο, και πιθανώς να δημιουργούνται κλειστές περιοχές από αλυσίδες, μέσα στις οποίες παγιδεύονται μόρια του μονομερούς που δεν ενώνονται με άλλα μόρια. Λόγω της τυχαίας απομόνωσης μορίων του πολυμερούς διαμορφώνονται ανομοιογενείς περιοχές στη δομή του υλικού του ανιχνευτή. Για την απαλοιφή αυτού του φαινομένου οι κατασκευαστές του ανιχνευτή CR-39, κατά τον πολυμερισμό των μονομερών, αυξομειώνουν σταδιακά τη θερμοκρασία του υλικού ώστε να εξισωθεί ο ρυθμός πολυμερισμού σε όλα τα στάδια παραγωγής του. Η ακολουθούμενη μέθοδος αποκαλείται *κύκλος ωρίμανσης*. Ωστόσο, με την εφαρμογή αυτής της κατασκευαστικής μεθόδου το φαινόμενο περιορίζεται, αλλά δεν παύει. Κατά συνέπεια, δύνανται να υπάρχουν ανομοιογένειες εντός του υλικού του ανιχνευτή, έχοντας ως αποτέλεσμα διαφορές στους ρυθμούς χάραξης (Πατήρης, 2009, σ. 138-139).

Το πολυμερές CR-39 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως ανιχνευτής από τους Cartwright *et al.* (1978). Ο ανιχνευτής λειτουργεί βάσει της ιδιότητας του ιονισμού των μορίων του υλικού, που έχουν τα φορτισμένα σωματίδια, κατά το πέρασμά τους. Τα σωματίδια που έχουν μάζα και φορτίο ίσο με το πρωτόνιο ή και μεγαλύτερο, δύνανται να δημιουργήσουν λανθάνοντα ίχνη στην επιφάνεια του ανιχνευτή, με διαστάσεις μερικές δεκάδες nm. Η καταγραφή αυτού του μεγέθους ιχνών μπορεί να γίνει μόνο με χρήση ηλεκτρονικών μικροσκοπίων. Ωστόσο, αφού ο ανιχνευτής χαραχθεί χημικά, τα ίχνη μεγεθύνονται, της τάξης των μm, και καθίστανται ορατά μέσω απλούστερων και λιγότερο κοστοβόρων οπτικών μικροσκοπίων. Ο ανιχνευτής CR-39 είναι πολύ ευαίσθητος στην ακτινοβολία-α, εύρους ενέργειας 0.5-20 MeV. Δύναται να καταγράψει πρωτόνια, αλλά και βαρύτερα σωματίδια από τα σωματίδια-α, όπως αποτελούν τα προϊόντα σχάσης, ενώ ταυτόχρονα έχει ευρεία χρήση ως δοσομετρητής από την ακτινοβόληση νετρονίων. Πιο συγκεκριμένα, τα νετρόνια, καθότι αποτελούν ηλεκτρικά ουδέτερα σωματίδια, με τη διέλευσή τους δεν ιονίζουν το υλικό του ανιχνευτή, δεν παύουν να κινούνται μέσα σε αυτόν, και εν τέλει τον διαπερνούν, μη δημιουργώντας λανθάνον ίχνος άμεσα. Μολαταύτα, είναι πιθανή η σκέδαση κατά τη διέλευσή τους, μέσω των πρωτονίων των ατόμων του υδρογόνου που αφθονούν στο υλικό του ανιχνευτή, μεταφέροντας ταυτόχρονα σε αυτά ορισμένη ενέργεια. Μέσω της σκέδασης, τα πρωτόνια αποκτούν κινητική ενέργεια και ιονίζουν τα μόρια του υλικού του ανιχνευτή κατά την κίνησή τους μέσα σε αυτόν ως φορτισμένα σωματίδια. Με αυτή τη διαδικασία προκαλείται ανάκρουση των πρωτονίων, έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ιχνών, τα οποία δύνανται να καταγραφούν εφόσον μεγεθυνθούν, παρέχοντας εμμέσως πληροφορίες για τα διερχόμενα νετρόνια (Πατήρης, 2009, σ. 139).

2.8 Κανονισμοί & Συστάσεις για την έκθεση σε Ραδόνιο εσωτερικών χώρων

Εξαιτίας του ενδεχόμενου κινδύνου που δύναται να προκληθεί από την έκθεση του γενικού πληθυσμού σε ραδόνιο εσωτερικών χώρων, ορισμένα κράτη, αλλά και διεθνείς οργανισμοί, έχουν θεσπίσει κανονισμούς, έχουν εκδώσει οδηγίες, και έχουν ψηφίσει ανάλογους νόμους, στην προσπάθειά τους να επιτύχουν καλύτερη προστασία των πολιτών από το ραδόνιο. Στις διάφορες νομοθετικές ρυθμίσεις ελέγχου, γενικώς καθορίζονται τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια συγκεντρώσεων ραδονίου, τα οποία εφόσον παραβιαστούν, θα πρέπει να έπονται από συγκεκριμένες ενέργειες. Οι ενέργειες αυτές αφορούν είτε απλό έλεγχο, οπότε τα όρια καλούνται επίπεδα αναφοράς (reference levels-limits), είτε κάποια δράση, και στην

περίπτωση αυτή τα όρια καλούνται επίπεδα δράσης (action levels-limits). Να επισημανθεί πως σχετικά με την έκθεση σε ραδόνιο σε χώρους εργασίας, σε κάποιες περιπτώσεις έχουν λάβει χώρα ειδικές νομοθετικές ρυθμίσεις ή προτάσεις (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 99).

2.8.1 Επιτροπή Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων

Η Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, την 21^η Φεβρουαρίου 1990, εξέδωσε σύσταση αναφορικά με την προστασία του κοινού έναντι έκθεσης σε ραδόνιο στο εσωτερικό των κτηρίων, με κωδικό 90/143/Euratom. Εξαιτίας των ημερήσιων, αλλά και εποχιακών διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων αέριου ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίων, σύμφωνα με τη σύσταση προς όλα τα κράτη-μέλη, οι αποφάσεις σχετικά με την ακτινοπροστασία θα πρέπει γενικά να βασίζονται στις μέσες ετήσιες μετρήσεις των συγκεντρώσεων ραδονίου εντός των κτηρίων μέσω ολοκληρωτικών μεθόδων. Η σύσταση ορίζει επίσης να αναπτυχθούν κριτήρια για τον εντοπισμό περιοχών, καθώς και χαρακτηριστικών των κτηρίων που ενδέχεται να σχετίζονται με υψηλά επίπεδα ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους.

Για τα υφιστάμενα κτήρια προτείνεται ως επίπεδο αναφοράς μια αποτελεσματική ισοδύναμη δόση των 20 mSv ετησίως, η οποία για πρακτικούς σκοπούς μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με τη μέση ετήσια συγκέντρωση αέριου ραδονίου των 400 Bq/m³. Σε περίπτωση υπέρβασης του επιπέδου αναφοράς, ως τεχνικές μετρίασης θα πρέπει να ληφθούν απλά και αποτελεσματικά μέτρα για τη μείωση των συγκεντρώσεων ραδονίου. Ο επείγων χαρακτήρας των δράσεων μετρίασης επιπέδων ραδονίου λαμβάνει υπόψη το βαθμό της υπέρβασης του επιπέδου αναφοράς.

Για τις μελλοντικές κατασκευές προτείνεται ως επίπεδο σχεδιασμού μια αποτελεσματική ισοδύναμη δόση των 10 mSv ετησίως, η οποία για πρακτικούς σκοπούς μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με τη μέση ετήσια συγκέντρωση αερίου ραδονίου των 200 Bq/m³. Το επίπεδο σχεδιασμού θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από τις αρμόδιες αρχές για τη θέσπιση διατάξεων, προτύπων ή οικοδομικών κανονισμών για περιστάσεις όπου το επίπεδο σχεδιασμού θα μπορούσε υπό συνθήκες να ξεπεραστεί (EC, 1990).

2.8.2 Συμβούλιο Ευρωπαϊκής Ένωσης

Το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, την 5^η Δεκεμβρίου 2013, εξέδωσε οδηγία που καθορίζει τα βασικά πρότυπα ασφαλείας για προστασία έναντι κινδύνων που προκύπτουν από έκθεση σε ιονίζουσες ακτινοβολίες, με κωδικό 2013/59/Euratom. Η οδηγία εφαρμόζεται, μεταξύ άλλων, στην έκθεση εργαζομένων ή πολιτών σε ραδόνιο στο εσωτερικό κτηρίων,

στην εξωτερική έκθεση από τα οικοδομικά υλικά, καθώς και σε περιπτώσεις διαρκούς έκθεσης που προκύπτουν από τις επιδράσεις ενός περιστατικού έκτακτης ανάγκης ή μιας παρελθοντικής ανθρώπινης δραστηριότητας.

Σε ό,τι αφορά στο εσωτερικό των κτηρίων, τα κράτη-μέλη θεσπίζουν εθνικά επίπεδα αναφοράς σχετικά με υφιστάμενη έκθεση σε μέση ετήσια συγκέντρωση ενεργότητας ραδονίου στον αέρα, τα οποία δε θα πρέπει να υπερβαίνουν τα 300 Bq/m³. Ακολουθώντας ένα εθνικό σχέδιο δράσης, έκαστο κράτος-μέλος προωθεί δράσεις για τον εντοπισμό κατοικιών όπου οι ετήσιες μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου υπερβαίνουν το επίπεδο αναφοράς, αλλά και για την ενθάρρυνση όπου κρίνεται απαραίτητο, με τεχνικά ή άλλα μέσα, μέτρων μείωσης της συγκέντρωσης ραδονίου στο εσωτερικό των κατοικιών αυτών.

Σχετικά με την έκθεση στο εσωτερικό υφιστάμενων χώρων εργασίας, τα κράτη-μέλη θεσπίζουν εθνικά επίπεδα αναφοράς για τη μέση ετήσια συγκέντρωση ενεργότητας ραδονίου στον αέρα, τα οποία δε θα πρέπει επίσης να υπερβαίνουν τα 300 Bq/m³, εκτός αν αυτό είναι δικαιολογήσιμο από τις επικρατούσες εθνικές συνθήκες.

Συγχρόνως, τα κράτη-μέλη μεριμνούν ώστε να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα με στόχο την πρόληψη εισόδου ραδονίου σε νέα κτήρια. Τα προληπτικά μέτρα μπορεί να περιλαμβάνουν ειδικές απαιτήσεις στους εθνικούς οικοδομικούς κανονισμούς.

Τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα πρέπει να εναρμονισθούν με την εν λόγω οδηγία κατά αργότερο έως τις 6 Φεβρουαρίου 2018, θέτοντας σε εφαρμογή τις απαραίτητες νομοθετικές, κανονιστικές και διοικητικές διατάξεις (EU, 2013).

2.8.3 Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας

Η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (International Commission on Radiological protection – ICRP) εξέδωσε σύσταση με κωδικό ICRP65, για την προστασία του κοινού έναντι Rn-222 τόσο στις κατοικίες, όσο και στην εργασία. Σχετικά με τα επίπεδα δράσης για παρεμβάσεις σε κατοικίες, σύμφωνα με τη σύσταση, ορισμένες στρατηγικές μετρίασης των συγκεντρώσεων ραδονίου σε κατοικίες είναι σχεδόν πάντα δικαιολογημένες, εφόσον υφίστανται άτομα που είναι εκτεθειμένα σε περισσότερο από μια συνεχιζόμενη ετήσια αποτελεσματική δόση των 10 mSv. Στην περίπτωση που η ετήσια αποτελεσματική δόση περιορίζεται σε εύρος 3-10 mSv, συνίσταται να λαμβάνονται δράσεις με απλά διορθωτικά μέτρα μείωσης. Το αντίστοιχο ισοδύναμο μέσο εύρος των συγκεντρώσεων ραδονίου είναι περίπου 200-600 Bq/m³, για συνεχή έκθεση και ετήσια παρουσία 7000 h στο εσωτερικό κατοικιών, με συντελεστή ισορροπίας ραδονίου και θυγατρικών του ίσο με 0.4.

Αναφορικά με τα επίπεδα δράσης για παρεμβάσεις σε χώρους εργασίας, η σύσταση ορίζει ότι οι εργαζόμενοι που δε θεωρούνται επαγγελματικά εκτεθειμένοι σε ακτινοβολία θα πρέπει να αντιμετωπίζονται συνήθως όμοια με τους πολίτες. Υιοθετείται επομένως ένα επίπεδο δράσης για παρέμβαση σε χώρους εργασίας, στο ίδιο επίπεδο αποτελεσματικής δόσης με το επίπεδο δράσης για κατοικίες. Τα επίπεδα δράσης για παρέμβαση σε χώρους εργασίας προκύπτουν εύκολα από το εύρος των επιπέδων δράσης για κατοικίες, πολλαπλασιαζόμενο με το λόγο παραμονής, 7000/2000, και με το λόγο των συντελεστών μετατροπής δόσης, 3.88/5.06. Το προκύπτον εύρος συγκεντρώσεων ραδονίου είναι κατά προσέγγιση 500-1500 Bq/m³. Το αντίστοιχο εύρος ετήσιας αποτελεσματικής δόσης είναι 3-10 mSv. Να τονιστεί ότι σε ορισμένα ορυχεία, ο συντελεστής ισορροπίας ραδονίου και θυγατρικών μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικός από 0.4, όπως λαμβάνεται στις κατοικίες. Σε τέτοιες περιπτώσεις ορυχείων, οι εθνικές αρχές εφόσον κρίνουν, μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα διαφορετικό επίπεδο δράσης όσον αφορά τη συγκέντρωση ραδονίου. Χώροι εργασίας που χρησιμοποιούνται από το κοινό με χαμηλή δημόσια παραμονή, όπως γραφεία, βιβλιοθήκες και θέατρα, δεν χρήζουν ειδικής μεταχείρισης. Κτήρια όπως νοσοκομεία, ιδρύματα και σχολεία, με υψηλή παραμονή του κοινού, πρέπει να αντιμετωπίζονται ως κατοικίες ώστε να καθορίζεται ένα επίπεδο δράσης για τεχνικές μετρίایش. Το όριο δόσης που συνιστά η ICRP για επαγγελματική έκθεση σε ραδόνιο εκφράζεται ως αποτελεσματική δόση των 20 mSv/yr, κατά μέσο όρο για περίοδο 5 ετών, αγγίζοντας τα 100 mSv στα 5 έτη, με την προϋπόθεση ότι η αποτελεσματική δόση δεν θα υπερβαίνει τα 50 mSv σε οποιοδήποτε έτος (ICRP65, 1993, p. 16-17, 19-21).

2.8.4 Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας

Η Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency – IAEA), καθορίζει ένα κατάλληλο επίπεδο αναφοράς για τις συγκεντρώσεις ραδονίου σε κατοικίες, καθώς και σε άλλα κτήρια με υψηλούς συντελεστές πληρότητας για το κοινό, λαμβάνοντας υπόψη τις επικρατούσες κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες, το οποίο γενικά δε θα υπερβαίνει τη μέση ετήσια συγκέντρωση των 300 Bq/m³. Με την παραδοχή ενός συντελεστή ισορροπίας του ραδονίου και των θυγατρικών του, 0.4, και ετήσιας πληρότητας 7000 h στο εσωτερικό των χώρων, η έκθεση σε μέση ετήσια συγκέντρωση ραδονίου των 300 Bq/m³ αντιστοιχεί σε ετήσια αποτελεσματική δόση της τάξης των 10 mSv (IAEA, 2014, p. 100). Το επίπεδο δράσης για το ραδόνιο σε χώρους εργασίας καθορίζεται για έκθεση σε ετήσια μέση συγκέντρωση ραδονίου των 1000 Bq/m³, η οποία, υποθέτοντας ετήσια παραμονή 2000 h στο

χώρο εργασίας και συντελεστή ισορροπίας ραδονίου και θυγατρικών 0.4, ισοδυναμεί με μια ετήσια αποτελεσματική δόση περίπου των 6 mSv (IAEA, 2003, p. 11, 33).

2.8.5 Εθνικές νομοθεσίες & συστάσεις για τον έλεγχο έναντι έκθεσης σε ραδόνιο

Σε παγκόσμιο επίπεδο υπάρχουν διαφοροποιήσεις αναφορικά με τον έλεγχο της έκθεσης σε ραδόνιο εσωτερικών χώρων. Σε ορισμένα κράτη δεν υφίσταται έλεγχος έναντι έκθεσης σε ραδόνιο. Σε άλλα κράτη υιοθετούνται συστάσεις από διεθνείς οργανισμούς, ενώ σε κάποια άλλα κράτη υπάρχουν εθνικές συστάσεις επάνω σε επίπεδα δράσης, εφόσον οι συγκεντρώσεις ραδονίου υπερβαίνουν κάποιο όριο αναφοράς, καθώς και κρατική ευθύνη ελέγχου των δράσεων. Σε ορισμένες χώρες επίσης, συνίστανται ή θεσμοθετούνται διαφορετικά όρια συγκεντρώσεων ραδονίου στις κατοικίες από ότι στους εργασιακούς χώρους (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 100).

Για τα κράτη-μέλη της ΕΕ, η εφαρμογή της νομοθεσίας και των συστάσεων σχετικά με το ραδόνιο στο εσωτερικό κατοικιών, καθώς και η εποπτεία της συμμόρφωσης με τις διατάξεις και συστάσεις, εκτελείται συνήθως από τις κυβερνήσεις ή τα σχετικά υπουργεία. Σε χώρες όπως η Φινλανδία και η Σουηδία, οι τοπικές δημοτικές αρχές έχουν την ευθύνη της εποπτείας, ενώ στο Ηνωμένο Βασίλειο, την ευθύνη έχουν οι περιφερειακές αρχές (Åkerblom, 1999, p. 11). Για τη Φινλανδία, το επίπεδο αναφοράς ραδονίου για νέες κατασκευές ορίζεται στον Φινλανδικό Οικοδομικό Κανονισμό, ενώ το όριο για τα υφιστάμενα κτήρια ορίζεται σε διάταξη του Υπουργείου Κοινωνικών Υποθέσεων και Υγείας (ERRICCA2, 2005, p. 5).

Στις ευρωπαϊκές χώρες εκτός ΕΕ, η εφαρμογή και η εποπτεία εκτελούνται γενικά από τις κυβερνητικές αρχές, ενώ σε επτά χώρες η εποπτεία αποτελεί ευθύνη των ιδρυμάτων ακτινοπροστασίας. Ειδικά στη Νορβηγία, οι τοπικές δημοτικές αρχές εποπτεύουν τους κανονισμούς ραδονίου. Στις Η.Π.Α., το πρόγραμμα ραδονίου είναι σε μεγάλο βαθμό εθελοντικό, ενώ στον Καναδά, η φυσική ραδιενέργεια είναι ζήτημα δημόσιας υγείας, την αρμοδιότητα του οποίου έχουν οι επαρχιακές κυβερνήσεις (Åkerblom, 1999, p. 11). Στην Ελβετία, τα Καντόνια (περιοχές) είναι υπεύθυνα για την επιβολή των επιπέδων αναφοράς του ραδονίου (ERRICCA2, 2005, p. 5).

Σε ό,τι αφορά την έκθεση εργαζομένων σε ραδόνιο, για τα κράτη-μέλη της ΕΕ, η εφαρμογή της νομοθεσίας και των συστάσεων για το ραδόνιο χώρων εργασίας, καθώς και η εποπτεία της συμμόρφωσης με τις διατάξεις και συστάσεις, εκτελείται συνήθως από τις κυβερνήσεις ή τα αρμόδια υπουργεία. Σε χώρες όπως η Δανία και η Φινλανδία, αρμόδιες αρχές είναι τα Εθνικά Ινστιτούτα Ακτινοπροστασίας, τα οποία έχουν επίσης την ευθύνη για την εποπτεία

της εφαρμογής. Στη Σουηδία, η εφαρμογή των κανονισμών για το ραδόνιο εκτελείται από το Εθνικό Συμβούλιο για την επαγγελματική Ασφάλεια και Υγεία, ενώ η επίβλεψη της Ασφάλειας και Υγείας στην εργασία εκτελείται από τα τοπικά δημοτικά γραφεία. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, η ευθύνη για την επιβολή της νομοθεσίας για το ραδόνιο σε χώρους εργασίας διαχωρίζεται μεταξύ της εκτελεστικής αρχής για την Ασφάλεια και την Υγεία σε μεγάλα κτήρια, και των τοπικών αρχών για μικρά κτήρια. Επιπλέον, χώρες όπως η Γαλλία, η Γερμανία, η Ιρλανδία και η Φινλανδία, έχουν πρωτόκολλα για τη μέτρηση του ραδονίου σε εργασιακούς χώρους.

Μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών που δεν ανήκουν στην ΕΕ, οι περισσότερες κυβερνήσεις εφαρμόζουν τη νομοθεσία και τις συστάσεις για το ραδόνιο σε χώρους εργασίας, καθώς και εποπτεύουν την εφαρμογή τους. Στην Ελβετία, η επίβλεψη της εφαρμογής της νομοθεσίας εκτελείται από τον Ελβετικό Εθνικό Οργανισμό Ασφάλισης Ατυχημάτων (Swiss National Accidental Insurance Organization). Στις Η.Π.Α., τη γενική ευθύνη να παρακολουθεί το ζήτημα του ραδονίου, να ενημερώνει το κοινό και να προωθεί τις τεχνικές μετριασμού των συγκεντρώσεων ραδονίου έχει η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency – EPA). Στον Καναδά, σύμφωνα με τον Καναδικό Κώδικα Εργασίας, κανένας υπάλληλος, εκτός από τους εργαζόμενους ατομικής ακτινοβολίας -όπως ορίζεται στους Κανονισμούς για τον Έλεγχο της Ατομικής Ενέργειας-, δεν πρέπει να εκτίθεται κατά τη διάρκεια ενός έτους σε συγκέντρωση ραδονίου που κατά μέσο όρο, πάνω από ένα χρόνο, υπερβαίνει τα 800 Bq/m³. Ο κανονισμός αυτός ισχύει για τους χώρους επιχειρηματικής δραστηριότητας που υπάγονται στη δικαιοδοσία του Ομοσπονδιακού Κώδικα Εργασίας του Καναδά. Πρωτόκολλα για τη μέτρηση ραδονίου σε εργασιακούς χώρους έχουν κράτη εκτός ΕΕ όπως η Νορβηγία και η Σλοβακική Δημοκρατία, αλλά και μη ευρωπαϊκά κράτη, όπως το Ισραήλ και η Συρία (Åkerblom, 1999, p. 17).

Η προστασία έναντι ραδονίου έγκειται στον καθορισμό των ανώτατων επιτρεπόμενων ορίων συγκέντρωσης, η υπέρβαση των οποίων συνιστά ανάληψη δράσης για εφαρμογή τεχνικών μετριασμού. Τα ανώτατα όρια προτείνονται από οργανισμούς στο διεθνές στερέωμα, ωστόσο θεσπίζονται και από διάφορες χώρες (Νικολόπουλος κ.ά., 2015, σ. 101). Στον Πίνακα 2.8.5.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα συνιστώμενα επίπεδα ανάληψης δράσης σχετικά με την έκθεση σε ραδόνιο σε υφιστάμενες κατοικίες και σε κατοικίες υπό κατασκευή, για διάφορες χώρες (WHO, 2007, p. 12-13).

Πίνακας 2.8.5.1: Συνιστώμενα επίπεδα ανάληψης δράσης για υφιστάμενες κατοικίες & κατοικίες υπό κατασκευή, ανά μεμονωμένη χώρα. (Πηγή: WHO, 2007, p. 12-13)

Κράτος	Συνιστώμενα Επίπεδα (Bq/m ³)	
	Υφιστάμενα κτήρια	Νεόδμητα κτήρια
Αυστρία	400	200
Βέλγιο	400	200
Γερμανία	100	100
Δανία	200	200, με υποχρεωτική αεροστεγή κατασκευή
Ελβετία	1000, υποχρεωτικό	400, υποχρεωτικό
Ελλάδα	400	200
Ηνωμένο Βασίλειο	200	200, υποχρεωτικό
Η.Π.Α.	148	148
Ιρλανδία	200	200
Καναδάς	800 Bq/m ³ (υπό αναθεώρηση). Νέο: 200 Bq/m ³	800 (200)
Λιθουανία	400	200
Νορβηγία	200	200, υποχρεωτικό
Ολλανδία	-	30 Bq/m ³ . Σε περίπτωση υπέρβασης θα υπάρξει νέο όριο
Σλοβενία	400	400
Σουηδία	200, υποχρεωτικό	200, υποχρεωτικό
Τσέχικη Δημοκρατία	400	200
Φινλανδία	400	200, υποχρεωτικό

Για υφιστάμενες κατοικίες, σε χώρες μη κράτη-μέλη της ΕΕ όπως η Λευκορωσία, η Εσθονία, η Πολωνία, η Ρωσία και η Σλοβάκικη Δημοκρατία, συνίσταται ένα επίπεδο αναφοράς συγκεντρώσεων ραδονίου των 400 Bq/m³. Απ' την άλλη, το Λουξεμβούργο έχει ένα συνιστώμενο επίπεδο αναφοράς των 150 Bq/m³ (Åkerblom, 1999, p. 9). Για νέες κατοικίες, στη Λετονία επιβάλλεται ως επίπεδο αναφοράς τα 300 Bq/m³.

Εκτός Ευρώπης, η Αυστραλία, το Ισραήλ και η Συρία έχουν ένα ενιαίο συνιστώμενο επίπεδο αναφοράς συγκεντρώσεων ραδονίου, τόσο για υφιστάμενες κατοικίες, όσο και για νεόδμητες κατοικίες, τα 200 Bq/m³ (Åkerblom, 1999, p. 11).

Στην πλειονότητα των χωρών, τα επίπεδα αναφοράς για το ραδόνιο σε υπέργειους χώρους εργασίας είναι υποχρεωτικά, ενώ στην περίπτωση που οι συγκεντρώσεις ραδονίου υπερβαίνουν το καθορισμένο επίπεδο αναφοράς, απαιτείται δράση για τη μείωση του κινδύνου από την έκθεση σε αυτό (ERRICCA2, 2005, p. 8). Μεταξύ των κρατών-μελών της ΕΕ, στην Αυστρία, Ελλάδα και Φινλανδία συνίσταται το ίδιο επίπεδο αναφοράς για τη

συγκέντρωση ραδονίου τόσο σε υφιστάμενους χώρους εργασίας, όσο και σε υφιστάμενες κατοικίες, τα 400 Bq/m³. Από τις χώρες αυτές, στην Αυστρία και στην Ελλάδα συνίσταται χαμηλότερο όριο για νέους χώρους εργασίας, τα 200 Bq/m³. Στην **Ιρλανδία**, το συνιστώμενο επίπεδο αναφοράς για τη συγκέντρωση ραδονίου στα σχολεία είναι 150 Bq/m³, ενώ για τους υπόλοιπους εργασιακούς χώρους είναι 200 Bq/m³ (Åkerblom, 1999, p. 14). Για το **Βέλγιο**, τα επίπεδα αναφοράς σε χώρους εργασίας εκφράζονται με έκθεση σε ραδόνιο των 800 kBq/m³h/yr. Στη **Γαλλία**, τα επίπεδα αναφοράς ισχύουν μόνο για χώρους εργασίας που έχουν σημαντική δημόσια πληρότητα, όπως οι φυλακές, τα νοσοκομεία, οι οίκοι ευγηρίας, τα σχολεία κλπ. Στην περίπτωση που οι συγκεντρώσεις ραδονίου στο εσωτερικό των χώρων είναι υψηλότερες από 400 Bq/m³, πρέπει να εφαρμόζονται απλά μέτρα αποκατάστασης. Ωστόσο, σε δημόσια κτήρια με συγκεντρώσεις ραδονίου άνω των 1000 Bq/m³ πρέπει να εκτελούνται εκτενέστερες εργασίες αποκατάστασης (ERRICCA2, 2005, p. 7-8).

Τα επίπεδα αναφοράς των συγκεντρώσεων ραδονίου μεταξύ των ευρωπαϊκών κρατών που δεν ανήκουν στην ΕΕ αποκλίνουν αρκετά από αυτά των κρατών-μελών της ΕΕ. Ειδικότερα, η **Ελβετία** επιβάλλει ένα ανώτατο όριο των 1000 Bq/m³ για υφιστάμενα και νέα σχολεία, κέντρα καθημερινής φροντίδας όπως παιδικούς σταθμούς και γηροκομεία, καθώς και σε δημοτικά γραφεία, ενώ παράλληλα εφαρμόζει ένα άλλο όριο στους ιδιωτικούς χώρους εργασίας, των 3000 Bq/m³. Η Ελβετία έχει επίσης ένα συνιστώμενο επίπεδο των 400 Bq/m³ για όλους τους τύπους υφιστάμενων και νέων χώρων εργασίας. Η **Νορβηγία** διαθέτει δύο συνιστώμενα επίπεδα αναφοράς για τους υφιστάμενους χώρους εργασίας: 200-400 Bq/m³ για απλά και οικονομικά επανορθωτικά μέτρα, και 400 Bq/m³ για ακριβότερα μέτρα. Η **Σλοβάκικη Δημοκρατία** έχει δύο ξεχωριστά επιβαλλόμενα επίπεδα αναφοράς για τις συγκεντρώσεις ραδονίου. Τα 500-1000 Bq/m³ αφορούν τους υφιστάμενους χώρους εργασίας, ενώ τα 250-1000 Bq/m³ αφορούν τους νέους χώρους εργασίας. Συγκεκριμένα, η χαμηλότερη τιμή αφορά περιπτώσεις όπου ο χρόνος που περνούν οι εργαζόμενοι στο κτήριο υπερβαίνει τις 1000 h, ενώ πάνω από το υψηλότερο επίπεδο, το κτήριο θεωρείται ως χώρος εργασίας με πηγή ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

Εκτός Ευρώπης, το **Ισραήλ** επιβάλλει ένα επίπεδο αναφοράς των 200 Bq/m³ για σχολεία και κέντρα ημερήσιας φροντίδας, και συνιστά ένα επίπεδο αναφοράς των 400 Bq/m³ για τους υπόλοιπους χώρους εργασίας. Για τα νεόδμητα σχολεία και κέντρα καθημερινής φροντίδας, συνίσταται ένα επίπεδο αναφοράς των 40 Bq/m³, ενώ το επίπεδο για άλλους νέους χώρους εργασίας είναι τα 200 Bq/m³. Οι **Η.Π.Α.** έχουν ένα εθνικό επίπεδο αναφοράς που επιβάλλεται στα σχολεία, τα 150 Bq/m³, το οποίο εποπτεύεται σε επίπεδο πολιτειών. Άλλη

αμερικανική νομοθεσία αναφορικά με την έκθεση σε ραδόνιο σε χώρους εργασίας θεσπίζεται και εποπτεύεται σε πολιτειακό και τοπικό επίπεδο. Στον **Καναδά**, το επίπεδο αναφοράς για τις νέες βιομηχανίες που ανήκουν στην κυβέρνηση είναι τα 800 Bq/m³, ενώ κατά τα άλλα, δεν υπάρχουν εθνικά επίπεδα αναφοράς για τους χώρους εργασίας (Åkerblom, 1999, p. 17).

Αξίζει να τονιστεί ότι αρκετές χώρες, όπως η Νορβηγία και η Ελβετία, καθορίζουν συγκριτικά χαμηλά επίπεδα στόχων αναφορικά με την έκθεση σε ραδόνιο για τα νεόδμητα κτήρια, 50 και 100 Bq/m³ αντίστοιχα, έπειτα από μετριασμό ή λήψη προληπτικών μέτρων. Χώρες όπως η Φινλανδία, η Τσέχικη Δημοκρατία, το Κιργιζτάν, η Λετονία, η Νορβηγία, η Σουηδία και η Ελβετία ανήκουν στη μειοψηφία των κρατών όπου υφίστανται επίπεδα δράσης, πέραν των οποίων ο μετριασμός έκθεσης σε ραδόνιο κρίνεται πάντα δικαιολογημένος. Να επισημανθεί ότι σπάνια παρέχεται συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο για την ολοκλήρωση των ενεργειών αποκατάστασης. Παρ' όλα αυτά, στη Φινλανδία επιτρέπεται ένα χρονικό πλαίσιο αναλόγως των επιπέδων ραδονίου που καταμετρείται, και συγκεκριμένα οι κατοικίες με υψηλά επίπεδα ραδονίου άνω των 5000 Bq/m³ συνίστανται να αποκατασταθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την αναγνώριση του προβλήματος. Απ' την άλλη, στην Ελβετία επιτρέπονται γενικά αρκετά χρόνια για την ολοκλήρωση της αποκατάστασης σε υφιστάμενες κατοικίες υψηλών συγκεντρώσεων ραδονίου. Η οικονομική επιβάρυνση για εργασίες μετριασμού και πρόληψης έναντι ραδονίου έγκειται σχεδόν αποκλειστικά στον ιδιοκτήτη της κατοικίας, ενώ πολύ λίγες χώρες, με πιο αξιοσημείωτες την Τσέχικη Δημοκρατία και το Βέλγιο, διαθέτουν προγράμματα κρατικών επιχορηγήσεων, είτε σε εξέλιξη ή παρελθοντικά (WHO, 2007, p. 6, 8). Σε ό,τι αφορά τις Η.Π.Α. γενικά, μόνο οι εργασίες μετριασμού ραδονίου σε σχολεία χρηματοδοτούνται από δημόσιους πόρους (Åkerblom, 1999, p. 17).

Στον Πίνακα 2.8.5.2 παρακάτω, παρουσιάζονται τα επιδιωκόμενα επίπεδα των συγκεντρώσεων ραδονίου σε υφιστάμενα κτήρια έπειτα από μετριασμό, και σε νέα κτήρια για τα οποία γίνεται πρόληψη έναντι ραδονίου, για διάφορες χώρες (WHO, 2007, p. 15).

Πίνακας 2.8.5.2: Επίπεδα στόχων συγκεντρώσεων ραδονίου σε υφιστάμενα κτήρια έπειτα από μετριασμό, και σε νέα κτήρια λόγω πρόληψης. (Πηγή: WHO, 2007, p. 15)

Κράτος	Επίπεδα Στόχων (Bq/m ³)	
	Υφιστάμενα κτήρια έπειτα από μετριασμό Rn	Νέα κτήρια
Αυστρία	400	200
Βέλγιο	200	200
Γερμανία	ετήσια μέση τιμή < 100	ετήσια μέση τιμή < 100
Δανία	-	200

Ελβετία	400	100
Ελλάδα	δεν υπάρχουν επιδιωκόμενοι στόχοι	δεν υπάρχουν επιδιωκόμενοι στόχοι
Ηνωμένο Βασίλειο	όσο το δυνατό λογικά χαμηλότερο	όσο το δυνατό λογικά χαμηλότερο
Η.Π.Α.	δεν υπάρχουν επιδιωκόμενοι στόχοι	δεν υπάρχουν επιδιωκόμενοι στόχοι
Ιρλανδία	200	200
Καναδάς	όσο το δυνατό χαμηλότερο	όσο το δυνατό χαμηλότερο
Λιθουανία	400	200
Νορβηγία	ετήσια μέση τιμή < 200 (καθιστικό, κρεβατοκάμαρες, κλπ.)	50, για μελλοντικές κατοικίες
Σλοβενία	400	400
Σουηδία	δεν υπάρχει επίσημος επιδιωκόμενος στόχος. Μερικές φορές αναφέρονται τα 100 Bq/m ³	δεν υπάρχει επίσημος επιδιωκόμενος στόχος. Μερικές φορές αναφέρονται τα 100 Bq/m ³
Τσέχικη Δημοκρατία	400, ή μείωση του επιπέδου 4 φορές (75%)	200
Φινλανδία	δεν υπάρχει επίσημος επιδιωκόμενος στόχος. Συνίσταται η μείωση όσο το δυνατό χαμηλότερα, αν είναι δυνατό < 200 Bq/m ³	όπου δύναται, να αποφεύγεται η συμβολή του Rn από το έδαφος. Στόχοι συγκεντρώσεων προερχόμενες από κατασκευές από: ξύλο → 20-40 Bq/m ³ , σκυρόδεμα → 40-100 Bq/m ³

Σε ό,τι αφορά χώρους εργασίας κάτω από το έδαφος, στην Πολωνία δεν επιτρέπεται σε κανέναν εργαζόμενο υπογείως να λαμβάνει δόση από ραδόνιο άνω των 20 mSv ανά έτος. Στη Ρουμανία, η επιτρεπόμενη συνολική έκθεση σε ραδόνιο για έναν εργαζόμενο σε υπόγειο χώρο είναι 4 εργάσιμοι μήνες το χρόνο. Στη Γερμανία, σύμφωνα με τη Γερμανική Επιτροπή Ακτινοπροστασίας, για τους εργαζόμενους σε σπηλιές, ορυχεία, υδροηλεκτρικά και ιαματικά λουτρά εφαρμόζεται ένα επίπεδο ελέγχου των 6 mSv ετησίως, που ισοδυναμεί με έκθεση σε ραδόνιο των 2000 kBq/m³h/yr. Το νόμιμο όριο αποτελεσματικής δόσης από την έκθεση σε ραδόνιο για εργαζομένους κάτω από το έδαφος στη Γερμανία είναι 20 mSv ετησίως, που αντιστοιχεί σε έκθεση σε ραδόνιο των 6000 kBq/m³h/yr. Για το Βέλγιο και τη Σουηδία, τα επίπεδα αναφοράς αέριου ραδονίου σε υπόγειους χώρους εργασίας, τα οποία έχουν τεθεί από την εθνική ρυθμιστική αρχή σε μονάδες έκθεσης σε ραδόνιο, ισοδυναμούν με 800 και 2500 kBq/m³h/yr, αντίστοιχα. Αυτά ισοδυναμούν αντιστοίχως με 400 και 1250 Bq/m³ συγκεντρώσεως αέριου ραδονίου, κατά τη διάρκεια των ωρών εργασίας, λαμβάνοντας συντελεστή ισορροπίας ραδονίου και θυγατρικών του ίσο με 0.4, καθώς και 2000 h ετησίως στην εργασία (ERRICCA2, 2005, p. 8, 10).

Στον Πίνακα 2.8.5.3 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα επίπεδα αναφοράς αέριου ραδονίου σε υπόγειους χώρους εργασίας, τα οποία έχουν τεθεί από την εθνική ρυθμιστική αρχή σε μονάδες συγκέντρωσης ραδονίου, για διάφορες χώρες (ERRICCA2, 2005, p. 9).

Πίνακας 2.8.5.3: Επίπεδα αναφοράς αέριου ραδονίου σε υπόγειους χώρους εργασίας σε μονάδες συγκέντρωσης ραδονίου. (Πηγή: ERRICCA2, 2005, p. 9)

Κράτος	Επίπεδα Αναφοράς (Bq/m ³)
	Υπόγειοι χώροι εργασίας
Δανία	400
Ελβετία	3000
Ελλάδα	400
Ηνωμένο Βασίλειο	400
Ιρλανδία	400
Ιταλία	500
Ουγγαρία	1000
Σλοβενία	1000
Τσέχικη Δημοκρατία	1000
Φινλανδία	400

Σχετικά με το πόσιμο νερό, μέχρι τα τέλη του 1998 μόνο 7 χώρες είχαν εισάγει επίπεδα αναφοράς για το ραδόνιο, ενώ άλλες επτά χώρες σχεδίαζαν να εισάγουν τέτοια επίπεδα. Οι επτά χώρες με επίπεδα αναφοράς ήταν η Τσεχική Δημοκρατία, η Φινλανδία, η Νορβηγία, η Ρουμανία, η Ρωσία, η Σλοβάκικη Δημοκρατία και η Σουηδία. Σε μεγάλο βαθμό, οι χώρες αυτές εφοδιάζονται με νερό από πηγές που αντλούν ύδατα από κρυσταλλικό υπόβαθρο, συχνά γρανίτες, με ενισχυμένη περιεκτικότητα ουρανίου. Σε καθεμία από αυτές τις χώρες, υπάρχουν αρκετές χιλιάδες πηγές που περιέχουν νερό με επίπεδα συγκέντρωσης ραδονίου πάνω από 1000 Bq/L, ενώ ταυτόχρονα έχουν βρεθεί αρκετά πηγές με επίπεδα μεγαλύτερα των 20000 Bq/L. Για παράδειγμα, στη Σουηδία υπάρχουν 200000 πηγές που χρησιμοποιούνται ως παροχές νερού για τους πολίτες, από τα οποία το 45% έχουν συγκεντρώσεις ραδονίου άνω των 100 Bq/L, ενώ 10000 από αυτά έχουν συγκέντρωση μεγαλύτερη από 1000 Bq/L.

Από τις προαναφερθείσες χώρες με επίπεδα αναφοράς, η **Τσέχικη Δημοκρατία** έχει ένα επιβαλλόμενο επίπεδο των 300 Bq/L, καθώς και ένα συνιστώμενο επίπεδο των 50 Bq/L για το ραδόνιο σε δημόσια ύδατα, ενώ για τους ιδιοκτήτες ιδιωτικών παροχών νερού υφίστανται δύο συνιστώμενα επίπεδα αναφοράς, αυτό των 1000 Bq/L, όπως και των 200 Bq/L, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά μέτρα μετριασμού ραδονίου (Åkerblom, 1999, p. 19). Συγχρόνως, συνίσταται ως επίπεδο αναφοράς ραδονίου τα 20 Bq/L σε εμφιαλωμένο νερό για βρέφη, με μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο τα 100 Bq/L (ERRICCA2, 2005, p. 12). Η **Φινλανδία**

έχει ένα επιβαλλόμενο επίπεδο των 300 Bq/m³ για τα δημόσια ύδατα, ενώ η **Νορβηγία** έχει ένα συνιστώμενο επίπεδο των 500 Bq/L. Η **Ρωσία** έχει ένα επιβαλλόμενο επίπεδο των 120 Bq/L για όλα τα πόσιμα ύδατα, ανεξάρτητα από το είδος ιδιοκτησίας. Απ' την άλλη, η **Σλοβάκικη Δημοκρατία** έχει ένα συνιστώμενο επίπεδο των 50 Bq/m³ για όλα τα πόσιμα ύδατα, καθώς και ένα επιβαλλόμενο επίπεδο των 1000 Bq/L. Η **Σουηδία** εφαρμόζει δύο όρια. Ένα μεγαλύτερο των 100 Bq/L που ορίζει το νερό ως κατάλληλο προς κατανάλωση με επιφυλάξεις, και ένα άλλο μεγαλύτερο των 1000 Bq/L που ορίζει τα ύδατα ως ακατάλληλα για ανθρώπινη κατανάλωση. Τα σουηδικά όρια είναι υποχρεωτικά για όλα τα δημόσια ύδατα και συνιστώμενα για το πόσιμο νερό ιδιωτικών παροχών (Åkerblom, 1999, p. 19).

Σε ό,τι αφορά χώρες που εισήγαγαν επίπεδα αναφοράς για το πόσιμο νερό μεταγενέστερα, η Γερμανική Επιτροπή Ακτινοπροστασίας συνιστά ένα επίπεδο αναφοράς των 100 Bq/L, το οποίο ισχύει τόσο για τα δημόσια ύδατα, όσο και για τις ιδιωτικές παροχές νερού. Το Ιταλικό Εθνικό Συμβούλιο Υγείας προτείνει ένα επίπεδο αναφοράς των 100 Bq/L για το μεταλλικό νερό, καθώς επίσης συνιστά ότι τα βρέφη δεν θα πρέπει να καταναλώνουν μεταλλικό νερό που περιέχει ραδόνιο με συγκέντρωση άνω των 32 Bq/L. Στην Πολωνία, η δόση ακτινοβολίας από όλα τα ραδιονουκλίδια στο πόσιμο νερό, συμπεριλαμβανομένου του ραδονίου, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0.1 μSv ετησίως (ERRICCA2, 2005, p. 10).

Η Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, την 20^η Δεκεμβρίου 2001, εξέδωσε σύσταση αναφορικά με την προστασία του κοινού έναντι έκθεσης σε ραδόνιο στο πόσιμο νερό, με κωδικό 2001/928/Euratom. Σύμφωνα με τη σύσταση, για συγκεντρώσεις ραδονίου στο πόσιμο νερό μικρότερες από 100 Bq/L, δεν απαιτούνται μέτρα μετριασμού. Αναφορικά με τα ύδατα που παρέχονται στο πλαίσιο εμπορικής ή δημόσιας δραστηριότητας, στην περίπτωση που παρουσιάζουν συγκέντρωση ραδονίου υψηλότερη από 100 Bq/L, τα κράτη-μέλη θα πρέπει να ορίσουν ένα επίπεδο αναφοράς για να κριθεί εάν είναι αναγκαία η λήψη δράσεων μετρίωσης για την προστασία της ανθρώπινης υγείας. Δύναται να υιοθετηθεί επίπεδο αναφοράς υψηλότερο από 100 Bq/L, εφόσον οι εθνικές έρευνες δείξουν ότι είναι απαραίτητο για την εφαρμογή ενός πρακτικού προγράμματος ραδονίου. Είναι αναγκαία ωστόσο η λήψη μέτρων για λόγους ακτινοπροστασίας, όταν η συγκέντρωση ραδονίου στα δημόσια και εμπορικά διανεμημένα ύδατα υπερβαίνει τα 1000 Bq/L. Ειδικά για ιδιωτικές παροχές νερού, πρέπει να χρησιμοποιείται το όριο των 1000 Bq/L για την εξέταση μετριασμού των συγκεντρώσεων ραδονίου, με κριτήριο του επείγοντα χαρακτήρα της τεχνικής μετρίωσης, το βαθμό υπέρβασης της συγκέντρωσης αναφοράς (EC, 2001).

2.9 Ραδόνιο στους χώρους εργασίας και στις κατοικίες στην Ελλάδα

2.9.1 Ελληνικοί Κανονισμοί

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Ακτινοπροστασίας (ΦΕΚ 216Β, 6/3/2001, παράγραφος 1.2.5.7), που είναι πλήρως εναρμονισμένος με την Οδηγία 96/29/EURATOM 31/5/1996 (Σεφτελής, 2007, σ. 101-102; Παπαδάκος κ.ά., 2010, σ. 14-15), σχετικά με την έκθεση εργαζομένων στο ραδόνιο και τα θυγατρικά του σε εργασιακούς χώρους, ισχύουν τα εξής:

- ✧ Οι εργασιακοί χώροι με μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (η οποία αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 h) μικρότερη από 400 Bq/m³, εξαιρούνται περαιτέρω ελέγχου και μέτρων ακτινοπροστασίας.
- ✧ Σε εργασιακούς χώρους με μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (η οποία αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 h) μεγαλύτερη από 400 Bq/m³ και μικρότερη από 1000 Bq/m³, θα πρέπει να διερευνάται η δυνατότητα μείωσης των άνω συγκεντρώσεων με κατάλληλες τεχνικές. Οι χώροι αυτοί χαρακτηρίζονται ως επιβλεπόμενες περιοχές, ενώ τα λαμβανόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας εγκρίνονται από την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ).
- ✧ Οι εργασιακοί χώροι με μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (η οποία αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 h) μεγαλύτερη από 1000 Bq/m³ και μικρότερη από 3000 Bq/m³, χαρακτηρίζονται ως ελεγχόμενες περιοχές και οι πρακτικές αδειοδοτούνται από την ΕΕΑΕ, ενώ ταυτόχρονα τα λαμβανόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας εγκρίνονται από την ΕΕΑΕ.
- ✧ Η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση του ραδονίου σε εργασιακούς χώρους δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 3000 Bq/m³, λαμβανομένων υπόψη των 2000 h διάρκειας εργασίας (ΦΕΚ 216Β, 6/3/2001).

Οι εργασιακές δραστηριότητες στις οποίες δύναται οι φυσικές πηγές ακτινοβολίας να έχουν ως επακόλουθο αξιοσημείωτη αύξηση της έκθεσης σε αυτή των εργαζομένων, η οποία δεν μπορεί παρά να συγκεντρώνει το ενδιαφέρον έναντι ακτινοπροστασίας, αφορούν:

- ✓ Εργασιακές δραστηριότητες στις οποίες τόσο οι εργαζόμενοι, όσο και πιθανώς άτομα του κοινού, είναι εκτεθειμένοι σε ακτινοβολία-γ, σε θυγατρικά του ραδονίου ή/και του θορονίου, είτε σε οποιαδήποτε άλλη έκθεση λόγω διέλευσης ακτινοβολίας στους εργασιακούς χώρους. Τέτοιες δραστηριότητες δύναται να λαμβάνουν χώρα κατά

κύριο λόγο σε ιαματικές πηγές και λουτρά, ορυχεία, σπήλαια, υπόγειους εργασιακούς χώρους, είτε υπέργειους εργασιακούς χώρους σε καθορισμένες ζώνες στη χώρα.

- ✓ Εργασιακές δραστηριότητες όπου χρησιμοποιούνται, είτε αποθηκεύονται υλικά τα οποία στην πλειοψηφία τους δεν θεωρούνται ραδιενεργά, ωστόσο περικλείουν φυσικά ραδιονουκλίδια που προκαλούν σημαντική αύξηση της έκθεσης των εργαζομένων, και πιθανώς και του κοινού, σε ακτινοβολία.
- ✓ Εργασιακές δραστηριότητες οι οποίες έχουν ως επακόλουθο την παραγωγή καταλοίπων, τα οποία κατά κύριο λόγο δεν θεωρούνται ραδιενεργά, ωστόσο περικλείουν φυσικά ραδιονουκλίδια που προκαλούν αξιόλογη αύξηση της έκθεσης των εργαζομένων, και πιθανώς και του κοινού, σε ακτινοβολία (ΦΕΚ 216B, 6/3/2001, §1.2.5.1).

Το Ελληνικό Κράτος εναρμονίστηκε με την οδηγία 2013/59/Euratom90/143/Euratom «Καθορισμός βασικών προτύπων ασφάλειας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες» του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης» εκδίδοντας το Π.Δ. 101/2018 (ΦΕΚ 194^Α/20-11-2018). Στο εν λόγω Π.Δ. αναφέρονται τα παρακάτω επίπεδα αναφοράς:

- **Εθνικό επίπεδο αναφοράς σε εσωτερικούς χώρους εργασίας : ετήσιος μέσος όρος**

300 Bq/m³ · Η τιμή αυτή μπορεί να αλλάξει με απόφαση της ΕΕΑΕ (αρ. 54)

- **Εθνικό επίπεδο αναφοράς μέσα στα κτήρια: ετήσιος μέσος όρος 300 Bq/m³ (αρ.76)**

Το επόμενο βήμα σύμφωνα με το Π.Δ. 101/2018 (ΦΕΚ 194^Α/20-11-2018) είναι η θέσπιση Εθνικού Σχεδίου Δράσης για το Ραδόνιο (αρ. 103 και παράρτημα XVIII).

Ο ρόλος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) στη θέσπιση του Εθνικού Σχεδίου Δράσης για το Ραδόνιο θα είναι καθοριστικός καθώς θα:

- Μέριμνα για την εκτέλεση μετρήσεων σε χώρους εργασίας
- Εντοπισμός κατοικιών με συγκεντρώσεις ραδονίου που υπερβαίνουν το επίπεδο αναφοράς
- Λήψη μέτρων μείωσης συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους κτηρίων
- Παροχή πληροφοριών σε τοπικό και εθνικό επίπεδο για την έκθεση στο ραδόνιο στους εσωτερικούς χώρους – τους κινδύνους για την υγεία – των τεχνικών μεσών μείωσης συγκεντρώσεων

- Προσδιορισμός διαδικασιών για τη λήψη κατάλληλων μέτρων για την αποφυγή εισόδου ραδονίου σε νέα κτήρια (ειδικές απαιτήσεις στον οικοδομικό κανονισμό).

2.9.2 Μελέτες, αποτελέσματα και συμπεράσματα για το ραδόνιο σε χώρους εργασίας, σχολεία και κατοικίες στον Ελλαδικό Χώρο.

1) Η μελέτη των Clouvas et al. (2011, p881-885) για το ραδόνιο στα Ελληνικά σχολεία πραγματοποιήθηκε με 1024 μετρητές σε 512 σχολεία σε οκτώ από τις 13 γεωγραφικές περιοχές της Ελλάδας. Η κατανομή της συγκέντρωσης ραδονίου ταίριαζε με την αναμενόμενη λογαριθμική κατανομή. Το 86% των συγκεντρώσεων ραδονίου ήταν μεταξύ 60-250 Bq/m³ με πιο πιθανή τιμή στα 135 Bq/m³. Ο αριθμητικός και γεωμετρικός μέσος ήταν 149 και 126 Bq/m³ αντίστοιχα. Η μέγιστη μετρηθείσα συγκέντρωση ραδονίου ήταν 958 Bq/m³. Μόνο ένα μικρό ποσοστό (2,7%) των σχολείων ξεπέρασε το όριο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής των 400 Bq/m³, ενώ μόλις ένα 17% ξεπέρασε τα 200 Bq/m³. Στην μελέτη αυτή δεν έγιναν καθόλου μετρήσεις στην νότια Ελλάδα λόγω μικρού υποβάθρου φυσικής ραδιοακτινοβολίας. Όπως ήταν αναμενόμενο καμία συσχέτιση δεν παρατηρήθηκε μεταξύ της συγκέντρωσης ραδονίου και της τιμής γ – ακτινοβολίας. Όμως εάν λάβουμε υπόψη μόνο τις μέσες τιμές για κάθε γεωγραφική περιοχή, τότε παρατηρούμε μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης ραδονίου και γ-ακτινοβολίας. Παρά το γεγονός ότι από τα αποτελέσματα συγκέντρωσης ραδονίου στα σχολεία δεν μπορούμε απευθείας να συνάγουμε αποτελέσματα και για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης στις κατοικίες, αναδεικνύεται η ανάγκη περαιτέρω έρευνας στις κατοικίες της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις).

2) Στην μελέτη των Papaefthymiou et al. (1999) τοποθετήθηκαν 140 μετρητές ραδονίου τυχαία σε κατοικίες της πόλης της Πάτρας, για δυο τριμηνιαίες περιόδους, το διάστημα 1996-1997. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση τιμή συγκέντρωσης ραδονίου ήταν γενικά χαμηλή σε σχέση με τα επιτρεπόμενα όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς το ίδιο ίσχυε ακόμα και για την μέγιστη καταγραφηθείσα συγκέντρωση (180 Bq/m³). Αναλυτικά για την θερινή περίοδο η χαμηλότερη τιμή ήταν 5 Bq/m³, η πλειοψηφία μεταξύ 5-20 Bq/m³ και διακύμανση μέχρι 180 Bq/m³, ενώ για την φθινοπωρινή περίοδο ήταν 7 Bq/m³, 20-40 Bq/m³ και υψηλότερη το 180 Bq/m³, αντίστοιχα. Από τα αποτελέσματα έγινε φανερό ότι οι συνήθεις τιμές συγκέντρωσης ραδονίου καθώς και οι μέσες τιμές ήταν υψηλότερες την περίοδο του φθινοπώρου από ότι του καλοκαιριού, γεγονός που οφείλεται κυρίως στον καλύτερο αερισμό των κατοικιών κατά την θερινή περίοδο. Επίσης παρά το μικρό δείγμα μετρητών, διαπιστώθηκε η μειωτική τάση της συγκέντρωσης ραδονίου σε σχέση με την

αύξουσα στάθμη των ορόφων ενός πολυώροφου κτιρίου. Συμπερασματικά, η συγκέντρωση ραδονίου εξαρτάται κυρίως από την φύση του εδάφους που περιβάλλει την κατοικία αλλά και από τον ρυθμό αερισμού αυτής. Προφανώς οι χαμηλές τιμές οφείλονται στην χαμηλή περιεκτικότητα ουρανίου (^{238}U) του εδάφους της περιοχής μελέτης.

3) Στην μελέτη των Clouvas et al. (2009) που πραγματοποιήθηκε σε 77 σχολεία στην Ξάνθη ο αριθμητικός μέσος συγκέντρωσης ραδονίου ήταν 231 Bq/m³, με διακυμάνσεις τιμών από 45-958 Bq/m³. Τριάντα πέντε (35) από αυτά τα σχολεία είχαν αριθμητικό μέσο πάνω από 200 Bq/m³ και εννιά (9) σχολεία πάνω από 400 Bq/m³. Από συνεχείς μετρήσεις που έγιναν στο σχολείο που παρουσίασε την μεγαλύτερη συγκέντρωση των 958 Bq/m³, βρέθηκε η «πραγματική» συγκέντρωση ραδονίου, που ορίζεται ως η συγκέντρωση ραδονίου του σχολείου μόνο κατά την διάρκεια που αυτό λειτουργεί από καθηγητές και μαθητές. Η μέση «πραγματική» συγκέντρωση για περίοδο δυο εβδομάδων ήταν 104 Bq/m³ ενώ η μέση «κανονική» συγκέντρωση για το ίδιο διάστημα ήταν επτά φορές μεγαλύτερη δηλαδή 700 Bq/m³. Αυτό συμβαίνει γιατί τα σχολεία έχουν την ιδιαιτερότητα ως χώροι εργασίας να παραμένουν κλειστά πολλές ώρες κατά την διάρκεια της μέρας αλλά και μέσα στο χρόνο λόγω των μακροχρόνιων περιόδων διακοπών. Οι Ελληνικοί και διεθνείς κανονισμοί για το ραδόνιο στους χώρους εργασίας αναφέρονται μόνο στην μέση ετήσια συγκέντρωση πράγμα που όπως είδαμε από τα παραπάνω δεν είναι ορθό για όλους τους χώρους όπως τα σχολεία, και θα ήταν προτιμότερο ειδικά για τα σχολεία αυτή να αντικατασταθεί με την μέση «πραγματική» συγκέντρωση σε μελλοντικές νομοθεσίες.

4) Η μελέτη των Ioannidis et al. (2000) αφορά μετρήσεις ραδονίου στο εσωτερικό κατοικιών στην πόλη του Μετσόβου στην βόρεια Ελλάδα. Τοποθετήθηκαν μετρητές CR-39 για περίοδο 3 μηνών και χειμώνα και καλοκαίρι. Επίσης έγινε και γ-φασματοσκοπία εδάφους για μέτρηση της περιεκτικότητας του εδάφους σε ράδιο. Τα επίπεδα συγκεντρώσεων ραδονίου κυμάνθηκαν από 17,6 έως 750,4 Bq/m³ ενώ οι συγκεντρώσεις ραδίου του εδάφους από 4,9 – 97,1 Bq/m³. Η έκθεση των κατοίκων του Μετσόβου σε ίνες αμιάντου (ασβέστου), έχουν δημιουργήσει προβλήματα ασβεστοποιήσεων στον υπεζωκότα σε ποσοστό 46% του πληθυσμού. Επίσης επιπτώσεις όπως η κακοήθεια στο μεσοθηλίωμα παρουσίασε αύξηση 280 φορές από την αναμενόμενη τιμή. Όμως επειδή άλλες μορφές καρκίνου του πνεύμονα (εκτός από το μεσοθηλίωμα) δεν έχουν αναφερθεί σε προηγούμενες εργασίες, από μελέτη στα στατιστικά δεδομένα τα τελευταία 30 χρόνια για όλες τις μορφές καρκίνου του πνεύμονα, βρέθηκε ότι γενικά η τιμή θνησιμότητας από καρκίνο του πνεύμονα δεν ήταν ιδιαίτερα υψηλή. Παρόλα αυτά η αναλογία του καρκίνου του πνεύμονα σε σχέση με

τον συνολικό αριθμό καρκίνων είναι 35,2%, τιμή τριπλάσια από τον μέσο όρο στα υπόλοιπα μέρη του κόσμου (12,8%). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην έκθεση στον αμίαντο. Πάντως συμπεράσματα συνέργειας μεταξύ της έκθεσης στον αμίαντο και το ραδόνιο δεν μπορούν να εξαχθούν από την παρούσα μελέτη, παρά μόνο σε εργαστηριακά πειράματα που έγιναν σε μη ρεαλιστικές μεγάλες τιμές συγκεντρώσεων. Τέλος τονίζουν οι μελετητές ότι συμφωνούν με συμπεράσματα άλλων εργασιών που συνηγορούν ότι οι οικολογικές μελέτες εξαιτίας των εγγενών περιορισμών που έχουν, δεν αποτελούν κατάλληλη βάση υπολογισμού για ποσοτικοποίηση σχέσης καρκίνου του πνεύμονα – έκθεση σε ραδόνιο, αλλά ότι ο μόνος τρόπος για να γίνει κάτι τέτοιο δηλαδή συσχέτιση επιπτώσεων υγείας – έκθεσης σε ραδόνιο, είναι τα case-studies.

5) Από την μελέτη των Nikolopoulos et al. (2014) επισημαίνεται ότι μόνο το 0,1% των Ελληνικών κατοικιών φθάνουν σε υψηλές τιμές συγκέντρωσης ραδονίου. Επίσης, αξιοσημείωτες στατιστικές συσχετίσεις παρατηρήθηκαν μεταξύ συγκέντρωσης ραδονίου στο εσωτερικό κατοικιών και παραγόντων όπως το ύψος-όροφος (level) της κατοικίας καθώς και από τα υλικά της τοιχοποιΐας, σε αντίθεση με άλλους παράγοντες οι οποίοι δεν επηρεάζουν αξιοσημείωτα την συγκέντρωση ραδονίου όπως το είδος του κτιρίου, το έτος κατασκευής και τα υλικά του δαπέδου. Τέλος σημαντικές διαφοροποιήσεις παρατηρήθηκαν μεταξύ των στατιστικών εφαρμοσμένων μεθόδων ανάλυσης δεδομένων.

6) Η μελέτη των Manousakas et al. (2010) πραγματοποιήθηκε σε 42 κατοικίες στην Μεγαλόπολη Πελοποννήσου, η οποία γειτνιάζει με δυο μεγάλες λιγνιτικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και εξετάζει τις μετρήσεις ραδονίου καθώς και τα αποτελέσματα από παράγοντες όπως η εποχή, το ύψος του ορόφου, το έτος κατασκευής. Η μέση ετήσια τιμή συγκέντρωσης βρέθηκε στα 52 Bq/m³, αρκετά χαμηλότερα από τα προτεινόμενα όρια της Ευρωπαϊκής ένωσης. Επίσης φάνηκε ότι η εποχή και το έτος κατασκευής των υπό εξέταση σπιτιών αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά στην Μεγαλόπολη την συγκέντρωση ραδονίου στις κατοικίες ενώ το ύψος του ορόφου όχι. Από τα αποτελέσματα της μελέτης φάνηκε ότι η συγκέντρωση ραδονίου δεν επηρεάζεται από την παρουσία λιγνιτικών μονάδων. Αναλυτικά, παρότι η συγκέντρωση ραδίου είναι ενισχυμένη στα δείγματα ιπτάμενης τέφρας της Μεγαλόπολης, οι ρυθμοί έκλυσης ραδονίου είναι μικρότεροι από τους λιγνίτες της περιοχής. Σύμφωνα με τον Καράγγελο et al(2004) αυτό αποδίδεται στο φαινόμενο της υαλοποίησης της ιπτάμενης τέφρας που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ραδονίου στους κόκκους. Είναι γνωστό ότι τα υλικά των κτιρίων συμβάλλουν στην εκπομπή εσωτερικής ακτινοβολίας εξαιτίας της εκπνοής των θυγατρικών

ισοτόπων από την διάσπαση ραδονίου. Η ακτινοβολία αυτή μπορεί να αυξηθεί όταν προϊόντα με υψηλή φυσική ραδιενέργεια όπως η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται για την παραγωγή κτιριακών υλικών (UNSCEAR,2000). Στην Ελλάδα από τις αρχές του 1980, οι κατοικίες κατασκευάζονταν με τσιμέντο που περιείχε 20% ιπτάμενη τέφρα η οποία με την σειρά της περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις ουρανίου U^{238} και ραδίου Ra^{226} (Papaefthymiou et al., 2007). Η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας ενισχύει την εκπνοή ραδονίου από το σκυρόδεμα και κατά συνέπεια την συγκέντρωση αυτού στο εσωτερικό του κτιρίου. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι τα κτίρια που κτίστηκαν την περίοδο 1930-1955 παρουσιάζουν την υψηλότερη μέση συγκέντρωση ραδονίου που αποδίδεται στην υψηλότερη διαπερατότητα των παλιών κατασκευών ή στην κτιριακή κίνηση με το πέρασμα του χρόνου. Επίσης, κτίρια που κτίστηκαν την περίοδο μετά το 1980 παρουσιάζουν μεγαλύτερη συγκέντρωση από αυτά της περιόδου 1956-1980, πράγμα που μπορεί να οφείλεται στην υψηλότερη περιεκτικότητα ραδίου Ra^{226} στα τσιμέντα που προορίζονταν για κατασκευές κτιρίων εξαιτίας της προσθήκης ιπτάμενης τέφρας (Papaefthymiou and Gouseti, 2008) ή της καλύτερης στεγανότητας των νέων κατασκευών. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και στην Πτολεμαΐδα στην βόρεια Ελλάδα (Psichoudaki and Papaefthymiou, 2008). Τέλος, επειδή το ραδόνιο είναι θυγατρικό του ραδίου, μετρήθηκε και η περιεκτικότητα του ραδίου στο έδαφος της περιοχής. Η μέση τιμή συγκέντρωσης ραδονίου στο κτίριο βρέθηκε χαμηλότερη από τα όρια της Ε.Επιτροπής αλλά ήταν όμως και περίπου ίδια στο έδαφος, λαμβάνοντας υπόψη την χαμηλή διαπερατότητα του εδαφικού υποστρώματος της περιοχής. Οι εποχιακές μετρήσεις παρουσίασαν διαφοροποιήσεις από την γενική τάση με αυξημένη τιμές τον χειμώνα και μειωμένες το καλοκαίρι. Αυτό αποδεικνύει ότι οι διορθωτικοί εποχιακοί συντελεστές δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται παντού στην Ελλάδα.

7) Η μελέτη των Clouvas et al. (2007) πραγματοποιήθηκε σε 561 χώρους εργασίας σε 19 νομούς της Ελλάδας. Από αυτούς, 77% αφορούν χώρους γραφείων καθηγητών σε σχολεία (νηπιαγωγεία, δημοτικά, γυμνάσια) ενώ το υπόλοιπο 23% κυρίως σε γραφεία σε δημόσιες υπηρεσίες και λίγα σε ιδιωτικά ξενοδοχεία και καταστήματα.

Πίνακας 2.9.2.1: Αποτελέσματα της μελέτης των Clouvas et al. (2007).

Table 2. Results of the survey: sample is the number of workplaces.

No.	Prefecture	Sample	AM (Bq m ⁻³)	GM (Bq m ⁻³)	Range (Bq m ⁻³)	>200 Bq m ⁻³	>400 Bq m ⁻³
1	Thessaloniki	25	105	99	55–200	0	0
2	Larisa	31	144	140	108–270	3	0
3	Magnisia	19	108	96	51–288	2	0
4	Serres	25	130	112	32–356	5	0
5	Dodekanisos	49	112	100	35–357	3	0
6	Kozani	15	94	85	49–228	1	0
7	Kavala	31	103	94	36–210	1	0
8	Imathia	15	66	60	37–155	0	0
9	Evros	48	110	101	43–312	3	0
10	Kiklades	44	92	86	51–195	0	0
11	Chalkidiki	36	181	167	56–381	12	0
12	Xanthi	19	229	209	110–458	8	1
13	Kilkis	19	186	175	101–386	6	0
14	Lasithi	11	96	87	38–153	0	0
15	Florina	50	117	114	55–364	3	0
16	Kastoria	45	110	100	35–273	2	0
17	Samos	44	153	119	47–695	6	4
18	Grevena	10	133	131	107–180	0	0
19	Evritania	25	63	57	29–131	0	0
	ALL	561	123	106	29–695	55 (10%)	5 (0.9%)

AM is the arithmetic mean and GM is the geometric mean of radon concentration. The last two columns refer to the number of workplaces with concentrations above 200 Bq m⁻³ and 400 Bq m⁻³, respectively

Η κατανομή της συγκέντρωσης ραδονίου περιγράφεται από την λογαριθμική φυσιολογική κατανομή. Οι περισσότερες τιμές συγκέντρωσης είναι μεταξύ 50-200 Bq/m³, με αριθμητικό μέσο στα 123 Bq/m³. Η μέγιστη τιμή που μετρήθηκε ήταν 695 Bq/m³. Μόνο 10% των χώρων εργασίας ξεπέρασαν τα 200 Bq/m³, ενώ μόνο 1% ξεπέρασε το Ευρωπαϊκό όριο των 400 Bq/m³. Παρά όμως αυτό το ελάχιστο ποσοστό του 1%, από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι κάποιες περιοχές εξακολουθούν να χρίζουν περαιτέρω παρακολούθησης και εξειδικευμένης έρευνας.

8) Από την μελέτη των Papaefthymiou & Georgiou (2007) μετρήθηκαν 53 από τα 66 συνολικά δημοτικά σχολεία για ραδόνιο στην πόλη της Πάτρας την περίοδο 1999-2000. Τα επίπεδα ραδονίου στις τάξεις ήταν γενικά χαμηλά μεταξύ 10-89 Bq/m³, όλα μικρότερα από το όριο της Ευρωπαϊκής επιτροπής. Ο αριθμητικός μέσος της συγκέντρωσης ήταν 35+-17 Bq/m³, που είναι όμοιος με αυτόν για τις κατοικίες στην περιοχή και η ετήσια ενεργός δόση υπολογίστηκε για τους μαθητές σε 0,1+-0,1mSvy⁻¹ ενώ για τους καθηγητές σε 0,2+-0,1 mSvy⁻¹ υποθέτοντας συντελεστή ισορροπίας και πληρότητας ως 0,4 και 12-14% αντίστοιχα. Η μελέτη επίσης ασχολήθηκε με τον συσχετισμό μεταξύ παραμέτρων που μπορούν να επηρεάσουν την συγκέντρωση ραδονίου όπως ο όροφος της τάξης και η ηλικία του κτιρίου σε σχέση με τα υλικά του κτιρίου. Από τα αποτελέσματα βρέθηκε ότι δεν υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ του αριθμού του ορόφου και των υλικών του κτιρίου σε σχέση με την συγκέντρωση ραδονίου. Όσο αφορά την επίδραση του αριθμού του ορόφου σημαντικές

διαφορές υπήρχαν μεταξύ ισογείου και πρώτου ορόφου, ενώ μη σημαντική επίδραση έχει η ηλικία του κτιρίου σε σχέση με τα υλικά του κτιρίου στην συγκέντρωση ραδονίου.

Πίνακας 2.9.2.2: Στατιστικά αποτελέσματα συγκέντρωσης ραδονίου σε διαφορετικούς ορόφους στις αίθουσες διδασκαλίας.

Table 1. Summary statistics of radon concentration levels on different floors of classrooms. Average radon levels are also included.

	Indoor radon concentration level (Bq m ⁻³)				
	N	AM \pm SD	GM \pm GSD	Min	Max
Ground	64	39 \pm 18	34 \pm 2	10	89
First floor	44	32 \pm 13	30 \pm 2	13	64
Second floor	6	23 \pm 5	22 \pm 1	15	28
Average	114	35 \pm 16	32 \pm 2	10	89

N, number of cases; AM, arithmetic mean; SD, arithmetic standard deviation; GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation; min, minimum value; max, maximum value.

Πίνακας 2.9.2.3: Στατιστικά αποτελέσματα συγκέντρωσης ραδονίου σε σχολεία από διαφορετικές Ευρωπαϊκές Χώρες.

Table 2. Indoor radon concentration levels in schools from different European countries.

Country	Radon concentration (Bq m ⁻³)			References
	AM	SD	GM	
Ireland (national survey)	93			Synnot <i>et al.</i> ⁽⁸⁾
Belgium	120			Poffin <i>et al.</i> ⁽²⁾
Croatia	93.4	68.7	70.6	Planinic <i>et al.</i> ⁽³⁾
Slovak Republic	44.8		38.6	Đurčik <i>et al.</i> ⁽⁴⁾
Slovenia (national survey)	168		82	Vaupotič <i>et al.</i> ⁽⁵⁾
Italy (Pordenone Province)	125	140		Giorani <i>et al.</i> ⁽⁷⁾
Italy (Trieste Province)	95	150		Giorani <i>et al.</i> ⁽⁷⁾
Greece (Kalamata)	86		75	Geranios <i>et al.</i> ⁽⁹⁾
Greece (Patras)	35	16	32	Present study

AM, arithmetic mean; SD, arithmetic standard deviation; GM, geometric mean.

9) Η μελέτη των **Nikolopoulos and Louizi (2008)** παρουσιάζει αποτελέσματα συγκέντρωσης ραδονίου στο εσωτερικό χώρων καθώς και στο πόσιμο νερό σε περιοχές της Ελλάδας και της Κύπρου τα οποία προήλθαν από παθητικές και ενεργητικές τεχνικές σε συνδυασμό με υπολογισμούς από την έκθεση και λήψη σε αυτά. Οι παθητικές συγκεντρώσεις ραδονίου στην Κύπρο κυμαίνονται μεταξύ 14+₋₃ και 74 +₋₆ Bq/m³ με αριθμητικό μέσο τα 29,3 Bq/m³. Οι ενεργητικές συγκεντρώσεις στην Αττική κυμαίνονται μεταξύ 5,6+_{-1,8} και 161+₋₁₂ Bq/m³ με αριθμητικό μέσο τα 27,6 Bq/m³, και στην Κρήτη μεταξύ 1,7+_{-0,4} και 141+₋₁₂ με αριθμητικό μέσο 23.4 Bq/m³. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου στο πόσιμο νερό στην Κύπρο κυμάνθηκαν μεταξύ 0,3+_{-0,3} και 20+₋₂ bq/l με A.M 5,9 bq/l και στην Ελλάδα μεταξύ 0,8+_{-0,2} και 24+₋₆ με A.M 5,4 bq/l. Η μελέτη αυτή παρουσιάζει νέα δεδομένα παθητικών μετρήσεων στην Κύπρο όπου σε συνδυασμό με αντίστοιχα δεδομένα που έχουν ήδη δημοσιευθεί (Christofides and Christodoulides,1993) , και τα διαθέσιμα ενεργητικά δεδομένα (Sarrou and Pashalidis, 2003, Anastasiou et al., 2003) και παρέχουν νέες πληροφορίες για την δυναμική του ραδονίου στις κατοικίες στην Κύπρο. Οι μετρήσεις ήταν σημαντικά υψηλότερες στην Κύπρο σε σχέση με αποτελέσματα που έχουν

ήδη δημοσιευτεί παρόλα αυτά όμως σε χαμηλά επίπεδα. Το ίδιο χαμηλές ήταν και οι συγκεντρώσεις ραδονίου στο πόσιμο νερό στην Κύπρο οι οποίες ήταν συγκρίσιμες με τις ήδη δημοσιευμένες. Επίσης γίνεται μια πρώτη προσπάθεια μαθηματικής συσχέτισης της συγκέντρωσης ραδονίου στο εσωτερικό χώρο και της συγκέντρωσης ραδονίου στο πόσιμο νερό στην Αθήνα και στην Κρήτη. Η εργασία επίσης προάγει μια προσέγγιση στον χειρισμό μετρήσεων από ενεργητικές μεθόδους με διαφορετικές συσκευές για την μέτρηση έκθεσης στο ραδόνιο. Πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ ενεργητικών δεδομένων από διαφορετικές συσκευές αλλά και μεταξύ παθητικών δεδομένων. Η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον ως οδηγός για τον σχεδιασμό περαιτέρω μελετών σε Ελλάδα και Κύπρο που θα αφορούν την επιρροή των προσωρινών διακυμάνσεων του ραδονίου και των συσχετιζόμενων με αυτό παραμέτρων, σε σχέση με τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας έκθεσης ραδονίου. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, αφού η πλειοψηφία των υπολογισμών μέτρησης που εφαρμόζονται διεθνώς βασίζονται στους μέσους ετήσιους υπολογισμούς. Συμπερασματικά το ραδόνιο είναι η κύρια πηγή έκθεσης του ανθρώπου σε ακτινοβολία και στην Ελλάδα και στην Κύπρο. Ο κίνδυνος είναι πιο σημαντικός από άλλους τύπους κινδύνων όπως η εσωτερική-εξωτερική γ-ακτινοβολία ή ιατρικές χρήσεις της ακτινοβολίας.

10) Στην μελέτη των Ioannidis et al. (2009) μετρώνται οι συγκεντρώσεις ραδονίου σε κατοικίες και δημόσιους χώρους εργασίας στην πόλη των Ιωαννίνων στην Βόρεια Ελλάδα. Οι μετρήσεις έγιναν σε 87 κατοικίες και 44 δημόσιους χώρους εργασίας. Στους χώρους εργασίας τοποθετήθηκαν μετρητές βραχείας μέτρησης E-PERM (Electret-Passive Integrating Electret Ionization Chambers) 8-10 ημερών ενώ στις κατοικίες μετρητές μακροπρόθεσμης μέτρησης CR-39 πεντάμηνης καταγραφής. Στους δημόσιους χώρους εργασίας φάνηκε ότι η συγκέντρωση ακολουθεί φυσιολογική κατανομή. Όλες οι τιμές βρέθηκαν μικρότερες από τα 400Bq/m³ που είναι και το ανεκτό όριο που έχει θεσπίσει η Ελληνική Επιτροπή Ραδιενέργειας κατόπιν οδηγίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης στους χώρους εργασίας από το 1997. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως παρά τις στατιστικά μικρές εποχιακές διαφορές μεταξύ χειμώνα –καλοκαίρι, η διαφορά ήταν σημαντική μεταξύ του υπογείου και ισογείου ορόφου σε σχέση με τον πρώτο και άνωθεν αυτού ορόφους.

Χρησιμοποιώντας την μέση τιμή 92Bq/m³ συγκέντρωσης ραδονίου και υποθέτοντας συντελεστή πληρότητας 0,22 (π.χ για 1920 ώρες εργασίας / χρόνο), η ετήσια μέση ενεργός δόση στους υπό εξέταση χώρους εργασίας υπολογίζεται ότι είναι 0,64mSvy⁻¹. Η ενεργός δόση είναι μεγαλύτερη για αυτούς που δουλεύουν σε γραφεία και χώρους που βρίσκονται στο

υπόγειο και σε ισόγεια (π.χ 0,90 mSvy-1) από ότι στον πρώτο όροφο και τους άνωθεν αυτού ορόφους (π.χ 0,44 mSvy-1). Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές έχουν προέλθει από βραχυπρόθεσμες μετρήσεις που μπορεί να μην αντικατοπτρίζουν ακριβώς τα επίπεδα ραδονίου στη διάρκεια του έτους.

Εικόνα 14: Σχεδιάγραμμα μεταξύ συγκέντρωσης ραδονίου σε α) εργασιακούς χώρους και β) κατοικίες σε σχέση με την στάθμη ορόφου (υπόγειο, ισόγειο, 1^{ος} όροφος κλπ).

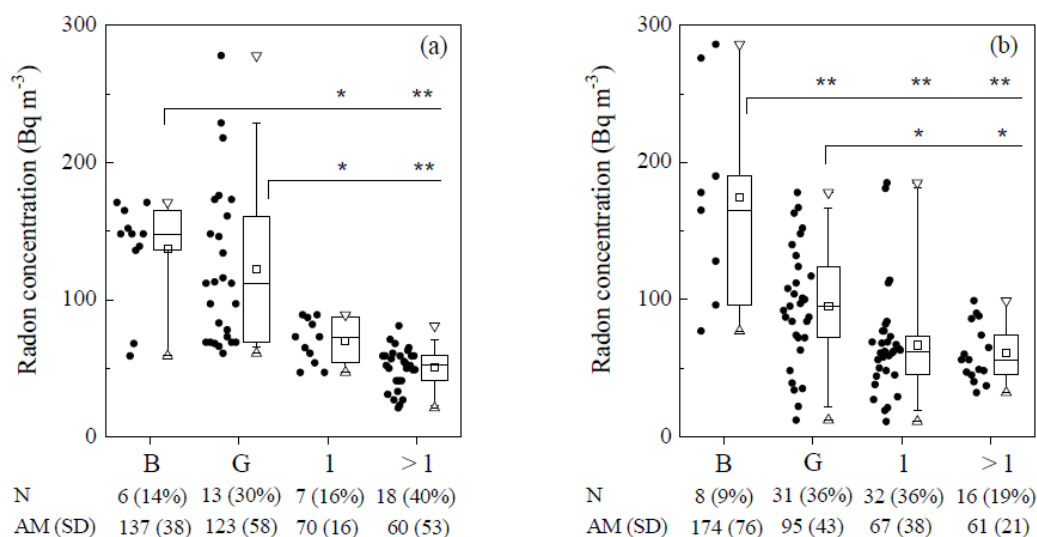


Figure 2. Box-whisker plot of radon concentrations in (a) workplaces and (b) dwellings, broken down by floor level (B=basement; G=ground floor; 1=first floor; >1=above first floor). Open squares=mean value; boxes=25-75% range; whiskers=5-95% range; open triangles=1-99% range; N=number of samples; AM=arithmetic mean (Bq m⁻³); SD=standard deviation (Bq m⁻³). Statistically significant differences (* p<0.001; ** p<0.0001) between floors are also indicated.

Οι συγκεντρώσεις ραδονίου στις κατοικίες ακολουθούν φυσιολογική κατανομή και οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 11-286 Bq/m³ με αριθμητικό μέσο τα 86 Bq/m³. Όλες οι τιμές ήταν κάτω από τα 400 Bq/m³ και μόνο σε δυο υπόγειες κατοικίες οι τιμές ξεπέρασαν τα 200 Bq/m³, που αποτελούν τα όρια για τις υφιστάμενες και μελλοντικές κατασκευές αντίστοιχα (EC,1990). Δεν βρέθηκαν σημαντικές στατιστικές διαφοροποιήσεις μεταξύ καλοκαιρινών και χειμερινών επιπέδων ραδονίου καθώς επίσης και μεταξύ μονοκατοικιών και διαμερισμάτων. Αντίθετα επιβεβαιώνεται μια σημαντική διαφοροποίηση στα επίπεδα ραδονίου μεταξύ των ορόφων με τις μέσες συγκεντρώσεις να μειώνονται από το υπόγειο προς τους άνω ορόφους. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με παλαιότερες μετρήσεις όπως του Nikolopoulos,2002 που μελετήθηκαν 18 κατοικίες στα Ιωάννινα, που βρέθηκαν μεταξύ 26-600 Bq/m³ με A.M τα 89 Bq/m³ αλλά και με τα αποτελέσματα του (Ioannides et al.2000) που διεξήχθη σε 55 κατοικίες στο Μέτσοβο

στο νομό Ιωαννίνων που έδειξαν υψηλότερες τιμές μεταξύ 18-750 Bq/m³ με Α.Μ 170+-132 bq/m

2.10 Πρόληψη και μετριασμός του ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίων

Οι δράσεις για τη μείωση της συγκέντρωσης ραδονίου στο εσωτερικό των κτηρίων είναι κυρίως προσανατολισμένες στον περιορισμό της εισόδου του ραδονίου από το έδαφος. Αυτός ο στόχος μπορεί να επιτευχθεί με την απομάκρυνση της πηγής ραδονίου, την εκτροπή του ραδονίου πριν εισέλθει σε ένα κτήριο, ή/και τη χρήση φραγμών μεταξύ εδάφους και κτηρίου (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 27). Τα συστήματα για την πρόληψη, καθώς και για τον μετριασμό του ραδονίου απαιτούν τα ακόλουθα κριτήρια σχεδιασμού:

- ✧ να είναι ικανά να μειώσουν τις συγκεντρώσεις ραδονίου κάτω από το επίπεδο αναφοράς,
- ✧ να είναι ασφαλή,
- ✧ να είναι ανθεκτικά και λειτουργικά για την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του κτηρίου,
- ✧ να μπορεί να παρακολουθηθεί εύκολα η απόδοσή τους,
- ✧ να αποτελούν ήσυχη και διακριτική επιλογή,
- ✧ να έχουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, και
- ✧ να είναι εύκολη η εγκατάσταση ενός επιπλέον ανεμιστήρα όταν χρησιμοποιούνται παθητικά καταθλιπτικά συστήματα στο έδαφος (WHO, 2009, p. 42-43).

2.10.1 Πρόληψη έναντι ραδονίου σε νέες δομές

Ο Πίνακας 2.10.1.1 που ακολουθεί, παρουσιάζει τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών συστημάτων ελέγχου ραδονίου έναντι της εισόδου του στο εσωτερικό χώρων, κατά το σχεδιασμό νέων δομών (WHO, 2009, p. 43).

Πίνακας 2.10.1.1: Επιλογές ελέγχου ραδονίου για μια νέα κατασκευή. (Πηγή: WHO, 2009, p. 43)

Επιλογή πρόληψης	Δυνατότητα μείωσης Rn	Μακροχρόνια απόδοση	Ευκολία παρακολούθησης	Ήσυχη & διακριτική επιλογή	Κόστος εγκατάστασης	Κόστος λειτουργίας
Σφράγιση επιφανειών που έρχονται σε επαφή με το έδαφος	καθόλου έως χαμηλή ή μέτρια	συχνά φτωχή έως ικανοποιητική	απαιτείται επανειλημμένος έλεγχος Rn	συνήθως πολύ καλή	μέτριο	πολύ χαμηλό

Φραγμός εισόδου αερίου από το έδαφος	υψηλά μεταβαλλόμενη	σταθερή, αλλά συχνά περιορισμένη μείωση Rn	απαιτείται επανειλημμένος έλεγχος Rn	πολύ καλή	εξαρτάται από φροντίδα & ποιότητα	Καθόλου
Παθητικός εξαερισμός στο κενό χαμηλότερο επίπεδο του κτηρίου	μέτρια έως καλή	πολύ καλή	απαιτείται επανειλημμένος έλεγχος Rn	πολύ καλή	χαμηλό	Χαμηλό
Ενεργητικός εξαερισμός στο κενό χαμηλότερο επίπεδο του κτηρίου	καλή	πολύ καλή	απαιτείται επανειλημμένος έλεγχος Rn	Καλή	μέτριο	Μέτριο
Ενεργητική αποσυμπίεση εδάφους	μέτρια έως μέγιστη	πολύ καλή	αναγκαία δοκιμή πίεσης &/ή Rn	συνήθως πολύ καλή	χαμηλό	Μέτριο
Παθητική αποσυμπίεση εδάφους	χαμηλή έως μέτρια	καλή εφόσον συντηρείται η σφράγιση	απαιτείται επανειλημμένος έλεγχος Rn	συνήθως πολύ καλή	χαμηλό	πολύ χαμηλό
Ισορροπημένος εξαερισμός	χαμηλή έως μέτρια	καλή εφόσον λειτουργεί & συντηρείται	απαιτείται επανειλημμένος έλεγχος Rn	συνήθως πολύ καλή	χαμηλό έως υψηλό	μέτριο έως υψηλό

Στο σημείο αυτό, θα αναλυθούν συνοπτικά οι σημαντικότερες στρατηγικές πρόληψης έναντι εισόδου ραδονίου στο εσωτερικό κτηρίων.

- Σφράγιση επιφανειών που έρχονται σε επαφή με το έδαφος

Η σφράγιση των επιφανειών που διαχωρίζουν το εσωτερικό κτηρίων από το έδαφος μπορεί να βελτιώσει την απόδοση άλλων στρατηγικών πρόληψης όπως τα παθητικά και ενεργητικά καταθλιπτικά συστήματα εδάφους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η στεγανοποίηση μειώνει την απώλεια κλιματιζόμενου αέρα από τους εσωτερικούς χώρους, η οποία μπορεί να είναι σημαντική, και αυξάνει την αναστροφή της πίεσης αέρα από το έδαφος προς το εσωτερικό κτηρίων. Ως μία αυτόνομη στρατηγική πρόληψης, η στεγανοποίηση επιφανειών που έρχονται σε επαφή με το έδαφος έχει περιορισμένη δυναμική έναντι μείωσης του ραδονίου, ιδίως με την πάροδο του χρόνου.

- Φραγμοί και μεμβράνες

Οι φραγμοί ή οι μεμβράνες μεταξύ εδάφους και των εσωτερικών χώρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αυτόνομη στρατηγική πρόληψης του ραδονίου ή σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές όπως η παθητική ή ενεργητική αποσυμπίεση του εδάφους. Οι μεμβράνες μπορούν ταυτόχρονα να συμβάλλουν στη μείωση της εισόδου υγρασίας στους εσωτερικούς χώρους. Υποστηρίζεται ωστόσο, ότι είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθούν αεροστεγείς μεμβράνες υπό κοινές συνθήκες κατασκευής. Επιπλέον, οι φραγμοί ενδέχεται να είναι πιο αποτελεσματικοί σε μέτρια κλίματα με μικρές διαφορές πίεσης λόγω θερμοκρασίας.

- ο *Εξαερισμός σε κενούς χώρους*

Ο εξαερισμός σε μη χρησιμοποιούμενους χώρους μεταξύ εδάφους και κατειλημμένων χώρων μπορεί να μειώσει τις συγκεντρώσεις ραδονίου στο εσωτερικό, μειώνοντας τη συγκέντρωση R_n κάτω από τον κατειλημμένο χώρο. Η αποτελεσματικότητα της στρατηγικής εξαρτάται από την αεροστεγανότητα του δαπέδου πάνω από τον αεριζόμενο κενό χώρο. Όσον αφορά στην αποτελεσματικότητα του παθητικού εξαερισμού, αυτή εξαρτάται από τη διανομή των αεραγωγών γύρω από την περίμετρο του κενού χώρου. Μια παραλλαγή αυτής της προσέγγισης αφορά τη χρήση ανεμιστήρα για την πίεση ή αποσυμπίεση του κενού χώρου.

- ο *Εξαερισμός σε κατειλημμένους χώρους*

Η ανταλλαγή μεταξύ αέρα εσωτερικού χώρου και ατμοσφαιρικού αέρα είναι επιθυμητή για την καλύτερη ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Ενώ ο εξαερισμός είναι σημαντικός για την πρόληψη έναντι ραδονίου, ωστόσο δύναται να οδηγήσει σε απώλειες ενέργειας, ειδικά σε ακραία κλίματα. Παρ' όλα αυτά, εάν η κύρια πηγή ραδονίου είναι τα οικοδομικά υλικά, ο εξαερισμός είναι απαραίτητος (WHO, 2009, p. 47-48).

- ο *Ενεργητική αποσυμπίεση εδάφους*

Επειδή η πίεση ενός κτηρίου είναι μικρότερη από την πίεση στο αέριο ραδόνιο του εδάφους, το αέριο ραδόνιο εισέρχεται στο κτήριο. Για να μειωθεί η είσοδος ραδονίου στο κτήριο, είναι απαραίτητη η μείωση της διαφοράς πίεσης μεταξύ εδάφους και κτηρίου. Για την αποσυμπίεση του εδάφους πρέπει να διατηρηθεί μια ζώνη στο υποκείμενο έδαφος σε χαμηλότερη διαφορά πίεσης από το κτήριο, μέσω ενός μικρού ανεμιστήρα ή μιας αεριζόμενης καπνοδόχου. Στην περίπτωση που το κτήριο διαθέτει δάπεδο από σκυρόδεμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ανεμιστήρας για να αναρροφήσει αέρα κάτω από το δάπεδο και να τον εξαερίσει στην ατμόσφαιρα. Συνήθως κατασκευάζεται ένα φρεάτιο ραδονίου, το οποίο συνίσταται σε έναν κατάλληλο ανεμιστήρα συνδεδεμένο μέσω σωλήνα με μια οπή στο έδαφος, ώστε να αναρροφά αέρα και να δημιουργεί αρνητική πίεση στην οπή. Όσο πιο

διαπερατό είναι το υλικό κάτω από την πλάκα δαπέδου, τόσο πιο αποτελεσματικό είναι το φρεάτιο. Για μια μονοκατοικία, ένας αποτελεσματικός ανεμιστήρας εξαγωγής ραδονίου μπορεί να έχει ονομαστική ισχύ περίπου 60 Watt, και σωλήνα διαμέτρου 110 mm. Πρόληψη εισόδου ραδονίου σε μια κατοικία μπορεί να επιτευχθεί επίσης μέσω της υπερπίεσης από έναν ανεμιστήρα τοποθετημένο στη σοφίτα της κατοικίας (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 28).

Τα συστήματα ενεργητικής αποσυμπίεσης εδάφους είναι απλά στην εγκατάσταση και παρέχουν μεγαλύτερη μείωση του ραδονίου σε σύγκριση με τα παθητικά συστήματα. Τα βασικά στοιχεία που τα χαρακτηρίζουν, είναι:

- Τα σημεία εκρόφησης ραδονίου βρίσκονται κάτω από το δάπεδο που είναι σε επαφή με το έδαφος, και συνδέονται με ένα συνεχές, ομοιόμορφο διαπερατό στρώμα αδρανών, ή με το σύστημα ελέγχου υπόγειων υδάτων ή με φρεάτιο.
- Το σημείο απορροής τοποθετείται κατά τρόπο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιεί την ανθρώπινη έκθεση, όπως για παράδειγμα άνω της υψηλότερης οροφής. Σε περίπτωση απόρριψης του συστήματος στο επίπεδο του εδάφους, δύναται να επανεμφανιστεί το ραδόνιο στο κτήριο.
- Ο ανεμιστήρας συνεχούς λειτουργίας τοποθετείται έξω και πάνω από τον κλιματιζόμενο χώρο της κατοικίας. Ειδικά στις νέες κατασκευές, η χρήση ενός διαπερατού στρώματος, αλλά και η στεγανοποίηση παρέχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούνται μικρότεροι και πιο ενεργειακά αποδοτικοί ανεμιστήρες.
- Η παρακολούθηση της απόδοσης του συστήματος, όπως της διαφοράς πίεσης στο σωλήνα εξαερισμού κάτω από τον ανεμιστήρα, πραγματοποιείται με μανόμετρο.
- Τα συστήματα ενεργητικής αποσυμπίεσης εδάφους θα πρέπει να επισημαίνονται σε κάθε προσιτό επίπεδο, ώστε να αποφεύγεται η σύγχυση με το σύστημα υδραυλικών εγκαταστάσεων.
 - ο Παθητική αποσυμπίεση εδάφους

Τα συστήματα παθητικής αποσυμπίεσης εδάφους χρησιμοποιούνται σε νέες κατασκευές. Σαν τεχνική είναι παρόμοια με την ενεργητική αποσυμπίεση εδάφους, με τις ακόλουθες εξαιρέσεις:

- Η αποτελεσματικότητα του συστήματος εξαρτάται από τη θερμική πλευστότητα του αέρα στο σωλήνα εξαερισμού, καθώς και την ικανότητά του να αποσυμπίεζει ελαφρά το έδαφος κάτω από το κτήριο. Ειδικότερα, το σύστημα θα πρέπει να έχει

μια ομοιόμορφη διαπερατή στρώση κάτω από όλα τα στοιχεία που έχουν άμεση επαφή με το έδαφος. Ταυτόχρονα, ο σωλήνας εξαερισμού θα πρέπει να εκτείνεται κυρίως εντός του θερμαινόμενου τμήματος του κτηρίου, ενώ τυχόντα τμήματά του σε μη θερμαινόμενες περιοχές θα πρέπει να μονώνονται. Επίσης, η διαδρομή του σωλήνα εξαερισμού θα πρέπει να επιτρέπει την εύκολη εγκατάσταση ενός ανεμιστήρα, στην περίπτωση που το παθητικό σύστημα αποσυμπίεσης εδάφους δεν επιτύχει επαρκή μείωση του ραδονίου. Η απορροή του σωλήνα εξαερισμού πρέπει να λαμβάνει χώρα άνω της υψηλότερης οροφής.

- ♦ Τα στοιχεία του κτηρίου που έρχονται σε επαφή με το έδαφος πρέπει να σφραγίζονται ώστε να αποφεύγεται η διείσδυση αέριου ραδονίου από το έδαφος.
- ♦ Η παρακολούθηση της απόδοσης του συστήματος γίνεται μέσω περιοδικής ή συνεχούς παρακολούθησης του ραδονίου.

Σε μια νέα κατασκευή, η παθητική αποσυμπίεση εδάφους δύναται να μειώσει το ραδόνιο κατά περίπου 50%. Σε έναν σωστό σχεδιασμό και εγκατάσταση του συστήματος, δύνανται να χρησιμοποιηθούν μικροί ανεμιστήρες, των 75 W ή λιγότερο, για την ενεργοποίηση του συστήματος. Η χρήση μικρότερων ανεμιστήρων εξοικονομεί λειτουργικά κόστη που σχετίζονται με την ενέργεια (WHO, 2009, p. 45-46).

2.10.2 Μετριάσμός ραδονίου σε υφιστάμενες κατοικίες

Η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας μετρίασης του ραδονίου σε υφιστάμενα κτήρια ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του εγκατεστημένου συστήματος και την ποιότητα της εγκατάστασης. Για να αποφασισθεί ο τρόπος μετρίασης ραδονίου ή να προσδιοριστεί η αποτελεσματικότητα οποιασδήποτε δράσης μετριασμού, οι μετρήσεις ραδονίου πρέπει να τηρούν τα αναγνωρισμένα πρωτόκολλα μέτρησης και το εφαρμοστέο επίπεδο αναφοράς της περιοχής. Οι στρατηγικές μετρίασης πρέπει να προσαρμόζονται στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ενός κτηρίου, στα κλιματικά χαρακτηριστικά της ζώνης, στις πηγές ραδονίου στη συγκεκριμένη οικία, καθώς και στους μηχανισμούς μεταφοράς του, προκειμένου να είναι οικονομικά αποδοτικές (WHO, 2009, p. 49, 51).

Στον Πίνακα 2.10.2.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συνηθέστεροι τύποι τεχνικών μετρίασης του ραδονίου, η απόδοση αυτών και τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας αυτών (WHO, 2009, p. 51).

Πίνακας 2.10.2.1: Συνήθεις τεχνικές μετρίασης ραδονίου, απόδοση και κόστος. (Πηγή: WHO, 2009, p. 51)

Τεχνική	Τυπική μείωση Rn (%)	Τυπικό κόστος εγκατάστασης (€)	Τυπικό ετήσιο κόστος λειτουργίας (€)
Ενεργητική αποσυμπίεση εδάφους: υψηλό έως χαμηλό πορώδες υποπλάκας	50-99	850-2700	50-275
Ενεργητική αποσυμπίεση εδάφους: πολύ χαμηλό πορώδες υποπλάκας	50-99	850-2700	50-275
Ενεργητική αποσυμπίεση εδάφους: αποσυμπίεση υπομεμβράνης	50-99	1100-2700	50-275
Υπόγειος ενεργητικός εξαερισμός	50-99	550-1600	50-275
Υπόγειος παθητικός εξαερισμός	0-50	0-550 εάν τοποθετηθούν πρόσθετοι αεραγωγοί	Μεταβλητό
Άντληση ραδονίου από πηγάδια	60-95	2150-4300	Μεταβλητό
Πίεση εδάφους	50-99	550-1600	50-275
Πίεση εδάφους σε επαφή με κατειλημμένο χώρο	50-99	550-1600	150-550
Παθητικός εξαερισμός σε κατειλημμένο χώρο	μεταβαλλόμενη / προσωρινή	Καθόλου	100-750
Ενεργητικός εξαερισμός σε κατειλημμένο χώρο	30-70	225-2700	7-550

Παρακάτω θα αναλυθούν λεπτομερέστερα οι βασικότερες στρατηγικές μετριασμού συγκεντρώσεων ραδονίου στο εσωτερικό υφιστάμενων κτηρίων.

- *Ενεργητική αποσυμπίεση εδάφους*

Η ενεργητική αποσυμπίεση εδάφους είναι η πιο κοινή τεχνική μετριασμού των συγκεντρώσεων ραδονίου σε υφιστάμενα κτήρια, με υψηλή αξιοπιστία. Η διαμόρφωση ενός τέτοιου συστήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά θεμελίωσης του κτηρίου. Οι κύριες δυσκολίες εφαρμογής της μεθόδου σε υφιστάμενα κτήρια αναφέρονται παρακάτω:

- Το υλικό κάτω από το χαμηλότερο επίπεδο του κτηρίου ενδέχεται να έχει περιορισμένη διαπερατότητα, και ως εκ τούτου να καθίσταται απαραίτητη η κατασκευή φρεατίου ή στομίου εκρόφησης ή να κρίνεται απαραίτητη η αλλαγή μεγέθους του ανεμιστήρα της ενεργητική αποσυμπίεσης εδάφους.

- Δύναται να υπάρχει δυσκολία στη σφράγιση των ανοιγμάτων μεταξύ εδάφους και κατειλημμένου χώρου.
- Δύναται να υπάρχει δυσκολία στην κατασκευή της διαδρομής των σωληνώσεων εξαέρωσης.
- *Εξαερισμός κατειλημμένων χώρων*

Ο εξαερισμός κατειλημμένων χώρων μπορεί να είναι ενεργητικός με χρήση ανεμιστήρα, ή παθητικός με χειρονακτική χρήση παραθύρων ή αεραγωγών. Οι τεχνικές εξαερισμού για τη μείωση ραδονίου είναι συχνότερες σε μηχανικά αεριζόμενους χώρους σχολείων και μεγάλα κτήρια, παρά σε μικρές κατοικίες. Ο εξαερισμός με ανεμιστήρα δύναται να μειώσει τη διαφορά πίεσης μεταξύ εδάφους και κατειλημμένου χώρου, καθώς και να αραιώσει το ραδόνιο εσωτερικού χώρου μετά την είσοδό του. Τέτοια συστήματα εξαερισμού είναι ιδιαίτερος χρήσιμα εφόσον εμπλέκονται ένας ή περισσότεροι από τους κάτωθι παράγοντες:

- Η κύρια πηγή ραδονίου προέρχεται από τα οικοδομικά υλικά.
- Το κτήριο είναι κατασκευασμένο σε περιοχή στην οποία επικρατεί κλίμα όπου δεν κυριαρχεί η θέρμανση ή η ψύξη.
- Υπάρχουν πολλαπλά προβλήματα στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα.
- Η ενεργητική αποσυμπίεση εδάφους δεν είναι εφικτή, είτε δε μειώνει ικανοποιητικά τις συγκεντρώσεις ραδονίου.

Ο μηχανικός εξαερισμός μπορεί να λάβει χώρα με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Ως εξαερισμός ο οποίος αποσυμπίεζει τον εσωτερικό χώρο σε σχέση με το έδαφος και το εξωτερικό περιβάλλον, και σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιείται για έλεγχο του ραδονίου, και ιδιαίτερος ποτέ σε κλίματα που κυριαρχούν η θέρμανση ή η ψύξη.
- Ως εξαερισμός τροφοδοσίας, ο οποίος πιέζει τον εσωτερικό χώρο σε σχέση με το έδαφος και το εξωτερικό περιβάλλον, καθώς και να αραιώνει το ραδόνιο μετά την είσοδό του. Για την αποτελεσματικότητα του συστήματος, τα φίλτρα του εξαερισμού θα πρέπει να διατηρούνται από τους κατοίκους, και ταυτόχρονα όλα τα παράθυρα και οι πόρτες θα πρέπει να παραμένουν κλειστά. Σε ψυχρότερα κλίματα, οι ανεμιστήρες πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με θερμαντικά στοιχεία.
- Ως εξισορροπημένος εξαερισμός, ο οποίος δεν συμπίεζει ούτε αποσυμπίεζει τον εσωτερικό χώρο σε σχέση με το έδαφος και το εξωτερικό περιβάλλον. Με αυτό το

σύστημα, το ραδόνιο αραιώνεται αφού εισέλθει στο κτήριο. Σε κλιματολογικές συνθήκες θέρμανσης ή/και ψύξης, ο εξισορροπημένος εξαερισμός συχνά πραγματοποιείται με ανεμιστήρα ανάκτησης θερμότητας ή ενέργειας, για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας (WHO, 2009, p. 52-53).

Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, για να αντισταθμιστεί το κόστος θέρμανσης λόγω του αυξημένου αερισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ισορροπημένο σύστημα μηχανικού αερισμού με ανάκτηση θερμότητας. Παρ' όλα αυτά, τυχόντα ποσοτικά στοιχεία σχετικά με την αποτελεσματικότητα τέτοιων συστημάτων είναι μάλλον ανεπαρκή.

Να τονιστεί ότι υπάρχουν ορισμένες πρακτικές δυσκολίες στον καθορισμό της αύξησης του ρυθμού εξαερισμού σε μια οικία, αλλά και του τρόπου με τον οποίο μπορεί να παρασχεθεί, ώστε να αποτελεί αποδεκτή λύση από τους διαμένοντες στην οικία (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 28).

- *Σφράγιση επιφανειών*

Στα θεμέλια μιας κατοικίας συνήθως υπάρχουν ορισμένα ανοίγματα από όπου μπορεί να διεισδύσει το αέριο ραδόνιο του εδάφους. Ανάμεσα στα ανοίγματα περιλαμβάνονται κόμβοι μεταξύ τοίχων και δαπέδων, κενά μεταξύ τμημάτων του δαπέδου και της πλάκας, ανοίγματα που έχουν σχεδιασθεί για την παροχή υπηρεσιών. Ως τεχνική μετρίασης της εισόδου ραδονίου στο εσωτερικό του κτηρίου μπορεί να εφαρμοστεί η πλήρωση των κενών και ανοιγμάτων χρησιμοποιώντας υλικά στεγανοποίησης, όπως η *εποξειδική ρητίνη*. Η χρήση ενός άκαμπτου στεγανωτικού υλικού είναι ακατάλληλη, καθώς οι ρωγμές είναι σε συνεχή κίνηση εξαιτίας κλιματικών μεταβολών, και λόγω συστολής-διαστολής. Ως εναλλακτική λύση μπορεί να εφαρμοστεί η *κάλυψη με πλαστικό* στο πάτωμα, εφιστώντας ιδιαίτερη προσοχή να σφραγίσει με ακρίβεια τις διασταυρώσεις μεταξύ τοίχων-δαπέδου. Η διάρκεια της μετρίασης του ραδονίου δεν είναι καλά τεκμηριωμένη. Μειονέκτημα της μεθόδου μπορεί να είναι η πιθανή εκπομπή πτητικού οργανικού άνθρακα από τα υλικά στεγανοποίησης (Bochicchio *et al.*, 1995, p. 29). Η σφράγιση ανοιγμάτων σε επιφάνειες ανάμεσα σε εσωτερικούς χώρους και το έδαφος είναι μια αμφιλεγόμενη τεχνική μετρίασης του ραδονίου όταν εφαρμόζεται αυτόνομα, έχοντας συνήθως περιορισμένη αποτελεσματικότητα. Όταν συνδυάζεται με ενεργητική αποσυμπίεση εδάφους, η σφράγιση βελτιώνει την απόδοση του συστήματος (WHO, 2009, p. 53).

- *Επεξεργασία νερού*

Σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις όπου σημαντικές συγκεντρώσεις ραδονίου εισέρχονται σε μια κατοικία από το νερό που αντλείται από ιδιωτικό πηγάδι, και στη συνέχεια το ραδόνιο απελευθερώνεται στον εσωτερικό αέρα, συνίσταται η επεξεργασία του νερού. Οι μέθοδοι επεξεργασίας για τη μείωση του ραδονίου στην είσοδό του στην κατοικία, είναι:

- ♦ Εξαερισμός σε σφραγισμένη δεξαμενή, όπου ο αέρας διοχετεύεται μέσω του νερού, είτε το νερό εξαερώνεται ή διαστέλλεται, ενώ το ραδόνιο εξέρχεται από το νερό στο εξωτερικό περιβάλλον.
- ♦ Διήθηση με ενεργό κοκκώδη άνθρακα, η οποία γενικά είναι λιγότερο ακριβή, αλλά συντελεί σε μικρότερη μείωση του ραδονίου (WHO, 2009, p. 53).

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή της περιοχής μελέτης: περιοχή ν. Χανίων

3.1 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά περιοχής Ν. Χανίων

Ο νομός Χανίων μεταξύ του νομού Ρεθύμνου προς τα ανατολικά, του κρητικού πελάγους προς τα δυτικά και βόρεια και του λιβυκού πελάγους προς τα νότια, αποτελεί μετά την εφαρμογή του προγράμματος Καλλικράτης μία από τις τέσσερις περιφερειακές ενότητες της περιφέρειας Κρήτης και περιλαμβάνει τους δήμους Αποκορώνου, Γαύδου, Καντάνου, Σελίνου, Κισσάμου, Πλατανιά, Σφακίων και Χανίων. Εκτός από τα νησιά Γαύδο και Γαυδοπούλα, στο νομό ανήκουν και αρκετές νησίδες (Ελαφονήσι, Σούδα, Πρασονήσι κ.ά) και βραχονησίδες κοντά στις ακτές του. Πρωτεύουσα του νομού είναι τα Χανιά και δεύτερη μεγαλύτερη πόλη η Σούδα. Ο πληθυσμός του νομού ανέρχεται σε 156.585 κατοίκους (2011) και η έκτασή του είναι 2.376 τ.χλμ. Το έδαφος είναι κατά το 1/5 σχεδόν πεδινό (πεδιάδες Χανίων, Κισσάμου, Αποκορώνου), κατά το 1/5 σχεδόν ημιορεινό και κατά τα 3/5 σχεδόν ορεινό. Μεγάλα υδάτινα ρεύματα δεν υπάρχουν στο νομό, υπάρχουν όμως πολλές πηγές, συνδεδεμένες με την τεράστια λεκάνη απορροής των Λευκών Ορέων (800τ.χλμ), ενώ η λίμνη Κουρνά στην επαρχία Αποκορώνου, στο βορειοδυτικό άκρο του νομού, αποτελεί εμφάνιση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.

Στο ανάγλυφό του δεσπόζουν τα Λευκά Όρη (ή Μαδάρες), με ψηλότερη κορυφή τις Πάχνες (2.454 μ.). Στα Λευκά Όρη βρίσκεται και το φαράγγι της Σαμαριάς, που εκτείνεται από τα βόρεια προς τα νότια, ανατολικά του Βολακιά, και καταλήγει στο χωριό Αγία Ρουμέλη. Δυτικότερα σχηματίζεται το δεύτερο μεγάλο φαράγγι της Κρήτης, του Νίμπρου ή Ίμπρου. Στα ημιορεινά υπάρχουν μικρά οροπέδια και κοιλάδες, όπως το οροπέδιο του Ομαλού (1.100 μ.), βορειοδυτικά των Λευκών Ορέων, το οροπέδιο του Ασκύφου στα ανατολικά, η κοιλάδα της Καντάνου και το παράκτιο υψίπεδο της Χώρας Σφακίων. Στις βόρειες ακτές του νομού υπάρχουν δύο κόλποι (Κισσάμου και Χανίων), καθώς και ο βαθύς όρμος της Σούδας. Τα Λευκά Όρη χωρίζουν το νομό σε δύο εντελώς διαφορετικές περιοχές. Το τμήμα της παραλιακής ζώνης, με 415 χλμ. ακτών, είναι πεδινό ή σχεδόν πεδινό, πλουσιότερο και πιο πυκνοκατοικημένο, ενώ η αραιοκατοικημένη κατά κανόνα ορεινή ενδοχώρα αποτελεί μία από τις πιο αυθεντικές περιοχές της Κρήτης. Ο Δήμος Αποκορώνου, που αποτελεί και την βασική περιοχή μελέτης, είναι Δήμος της περιφέρειας Κρήτης που συστάθηκε με το

πρόγραμμα Καλλικράτης από την συνένωση των πρώην δήμων Αρμένων, Φρέ, Βάμου, Γεωργιουπόλεως και Κρυονερίδας και της κοινότητας Ασή Γωνιάς. Η έκταση του Δήμου είναι 323.13 τ.χλμ και ο πληθυσμός του 12.807 κάτοικοι σύμφωνα με την απογραφή του 2011. Έδρα του είναι οι Βρύσες και ιστορική έδρα ο Βάμος. Ο Αποκόρωνας είναι η περιοχή που καταλαμβάνει το βορειοανατολικό τμήμα του νομού Χανίων, από τους πρόποδες των Λευκών Ορέων μέχρι τις βόρειες ακτές της Κρήτης. Χαρακτηριστικό της περιοχής είναι οι καταπράσινοι λόφοι με τις εύφορες εκτάσεις γης, λόγω της ύπαρξης νερού που προέρχεται από πηγές ή που κατεβαίνει από τα βουνά, δημιουργώντας έτσι την μοναδική φυσική λίμνη της Κρήτης, και ποτάμια τα οποία διατρέχουν την περιοχή, μέχρι να βρουν διέξοδο στην θάλασσα.

3.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής ν. Χανίων

3.2.1 Γεωλογική επισκόπηση - γεωλογικό περίγραμμα της Κρήτης

Κατά τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, οι γνώσεις μας για την γεωλογική δομή της Κρήτης έχουν αυξηθεί σημαντικά. Τα αποτελέσματα των ερευνών στα πλαίσια μεγάλου αριθμού προγραμμάτων ευρωπαϊκών και εθνικών ερευνητικών ιδρυμάτων αλλά και μεμονωμένων ερευνητών, οδήγησε στην έκδοση του πρώτου συνοπτικού γεωλογικού χάρτη της Κρήτης το 1977 σε κλίμακα 1/200.000. Όπως φαίνεται στον χάρτη αυτόν αλλά και στους επόμενους που εκδόθηκαν από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας κλίμακας 1:500.000, Εικόνα 17), το μεγαλύτερο ποσοστό προνεογενούς ηλικίας πετρωμάτων που δομούν και εμφανίζονται στην Κρήτη, ανήκουν σε μια ακολουθία μεταμορφωμένων πετρωμάτων που για δεκαετίες ήταν γνωστή στη βιβλιογραφία σαν «Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι», η παλαιογεωγραφική τοποθέτηση των οποίων παραμένει ένα ανοικτό γεωλογικό κεφάλαιο. Παρόμοια είναι τα προβλήματα που σχετίζονται με τα καλύμματα της ενότητας του Τρυπαλίου και του Φυλλιτικού Καλύμματος..

Εικόνα 15: Τμήμα του γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:500.000. με κίτρινες και πράσινες αποχρώσεις οι λεκάνες του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς αντίστοιχα (Μπορνόβας et al., 1983).



Πιο ειδικά, η Κρήτη συγκροτείται από την κατώτερη τεκτονική ενότητα η οποία αποτελείται από ένα αυτόχθονο έως παραυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων που περιλαμβάνει την μεταμορφωμένη Ομάδα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων (Plattenkalk) με ηλικία από το Άνω Πέρμιο έως το Ολιγόκαινο.

Με τεκτονική επαφή, ακολουθεί ένα αλλόχθονο σύστημα επωθημένο πάνω στο (παρα)αυτόχθονο, υπό τη μορφή αλληπαλλήλων τεκτονικών καλυμμάτων αλπικών ενοτήτων, και με χαρακτηριστική λεπιοειδή διάταξη. Τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο τοποθετούνται με την ακόλουθη σειρά από το υποκείμενο προς το υπερκείμενο:

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

Ακολούθως, η Ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών (Φυλλιτικό Κάλυμμα κατά Dornsierpen & Manutsoglu 1994) με ηλικία Άνω Πέρμιο έως και το Κάρνιο όπου στα κατώτερα τμήματα παρουσιάζονται εντός δολομιτών και ραουβάκων εμφανίσεις γύψου και ανυδρίτου και στα ανώτερα εναλλαγές φυλλιτών με στρώσεις χαλαζιτών και στρώσεις μετα-ηφαιστίων.

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

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

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

- Οφειολιθικό κάλυμμα με σερπεντινωμένους περιδοτίτες, γάββρους, διορίτες, δολερίτες και διαβάσες, ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού.
- Κάλυμμα Αστερούσιων με μετα-ιλυολιθικούς, διμαρμαρυγιακούς, χλωριτικούς, επιδοιτικούς γνευσίους και σχιστολίθους, αμφιβολίτες και μάρμαρα ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού.
- Κάλυμμα Βάτου με εναλλαγές τεφρών ιλυολίθων και πάγκους από ψαμμιτικούς ασβεστολίθους και ψαμμίτες ηλικίας Ανωτέρου Ιουρασικού.
- Κάλυμμα Άρβης με βασάλτες σε «μαξιλαροειδείς λάβες» ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού.

Τέλος, πάνω από τους αλπικούς σχηματισμούς βρίσκονται πετρώματα του Νεογενούς και Τεταρτογενούς τα οποία συνήθως έχουν κυμαινόμενο πάχος και εξάπλωση στις διάφορες περιοχές της Κρήτης. Τα πετρώματα αυτά σχετίζονται με τις μετεορεγενετικές διεργασίες που επέδρασαν στην περιοχή. Οι απόψεις για το είδος, την διαδοχή και εύρος αυτών των διεργασιών δίστανται στην βιβλιογραφία.

Οι εφελκυστικές τάσεις που έλαβαν χώρα στην περιοχή της Κρήτης είχαν ως συνέπεια τη δημιουργία μεγάλων βυθισμάτων, ως αποτέλεσμα της δράσης μεγάλων ρηγμάτων με κύριες διευθύνσεις Β-Ν και Α-Δ. Οι κυριότερες λεκάνες που πληρώθηκαν με ιζήματα του Νεογενούς είναι οι λεκάνες Ηρακλείου, Μεσσαράς, Ιεράπετρας και του βορείου τμήματος Νομών Ρεθύμνου και Χανίων. Τα νεογενή αυτά ιζήματα επικάθονται ασύμφωνα στους αλπικούς σχηματισμούς και είναι χερσαίας, ποτάμιας, υφάλμυρης και θαλάσσιας προέλευσης. Παρουσιάζουν ανομοιομορφία ως προς την ηλικία τους και ως προς τη λιθολογία τους. Κατά Meulenkamp (1979) οι σχηματισμοί του Νεογενούς έχουν ομαδοποιηθεί σε λιθοφασικές ομάδες (Εικόνα 18):

Η Ομάδα Πρίνα αποτελείται από ασβεστολιθικά μαύρα χονδρόκοκκα λατυποπαγή και λατυποκροκαλοπαγή με ασβεστιτικό υλικό συγκόλλησης ενώ εμπεριέχει ολισθόλιθους προνεογενών ασβεστόλιθων. Αποτελεί τη βάση των Νεογενών ιζημάτων στις περιοχές της ανατολικής και δυτικής Κρήτης, ή μεταβαίνει πλευρικά ως προς την αμέσως Νεότερη. Η ηλικία της Ομάδας Πρίνα προσδιορίζεται στο Μέσο Μειόκαινο και το περιβάλλον απόθεσης χαρακτηρίζεται μη θαλάσσιο ως υφάλμυρο ή ρηχό θαλάσσιο (Meulenkamp, 1979; Φυτρολάκης, 1980).

Η Ομάδα Τεφελίου τοποθετείται ασύμφωνα είτε πάνω στην Ομάδα Πρίνα, είτε απευθείας πάνω στο προνεογενές υπόβαθρο. Αποτελείται από χαλαρά θαλάσσια και ποταμολιμναία κροκαλοπαγή, άμμους, αργίλους και ιλύ. Η ηλικία τους τοποθετείται από το Σερραβάλλιο έως το Άνω Τορτόνιο (Meulenkamp, 1979; Βασιλάκης 2006). Η Ομάδα Τεφελίου αποτελείται από τους σχηματισμούς Βιάννου, Σκινιά και Αμπελούζου.

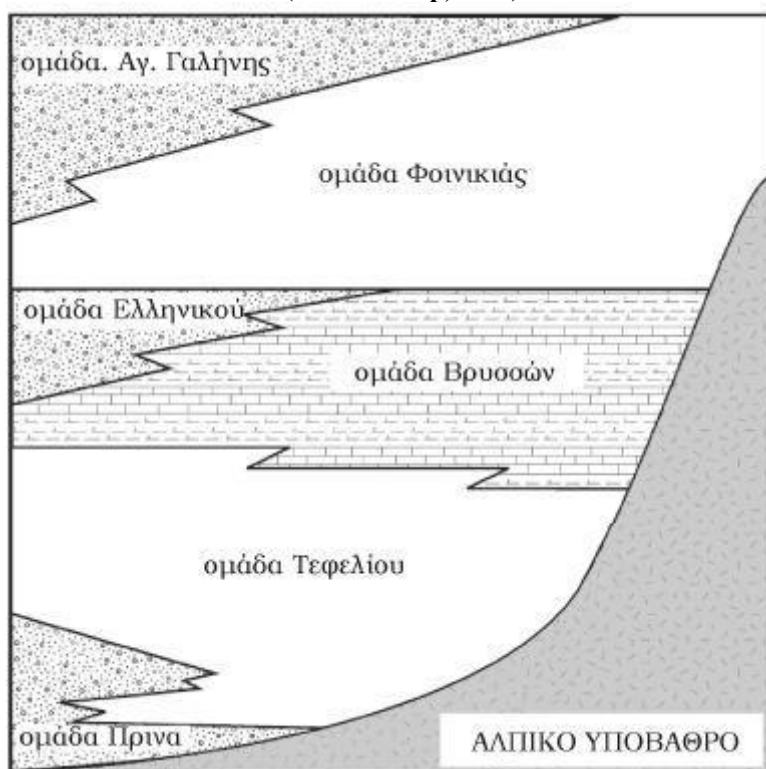
Η Ομάδα Βρυσών συντίθεται από το σχηματισμό της Αγίας Βαρβάρας και τοποθετείται υπερκείμενη είτε της Ομάδας Τεφελίου είτε του αλπικού υποβάθρου. Αποτελείται από θαλάσσιους βιοκλαστικούς ή υφαλογενής ασβεστόλιθους εναλλαγές φυλλωδών και ομογενών μαργών, οι οποίες κατά τόπους εμπεριέχουν παρεμβολές γύψων. Η ηλικία της Ομάδας των βρυσών τοποθετείται στο Άνω Τορτόνιο έως το Κάτω Μεσσήνιο (Meulenkamp, 1979).

Η Ομάδα Ελληνικού παρουσιάζεται τοποθετημένη ασύμφωνα σε παλαιότερους Νεογενής σχηματισμούς ή κατά θέσεις, απευθείας επάνω στο υπόβαθρο ή επάνω στην ομάδα Βρυσών στην οποία όμως κατά τόπους παρεμβάλετε. Περιλαμβάνει ερυθρωπά χερσαίας προέλευσης κροκαλοπαγή, ποταμολιμναίες σχετικώς λεπτόκοκκες αποθέσεις και ενίοτε υφάλμυρες και λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις με εμπεριεχόμενα λεπτά στρώματα γύψου. Η Ομάδα Ελληνικού αποτέθηκε κατά τη διάρκεια της κρίσης αλατότητας του Μεσσηνίου με την ηλικία της να προσδιορίζεται στο Άνω Μεσσήνιο. Στις περιοχές της κεντρικής και ανατολικής Κρήτης δεν υπάρχουν εμφανίσεις της Ομάδας Ελληνικού.

Η Ομάδα Φοινικιάς συντίθεται από το σχηματισμό της Φοινικιάς και τοποθετείται επί των στρωμάτων της Ομάδας Ελληνικού, Βρυσών ή του προνεογενούς υποβάθρου. Αποτελείται από ανοιχτής θάλασσας αργίλους και μάργες οι οποίες ενίοτε παρουσιάζουν πυριτικές ενστρώσεις ενώ τμήμα της βάσης της Ομάδας Φοινικιάς, περιέχει ένα λατυποπαγές αποτελούμενο από ιζήματα του Μειόκαινου και του Κατώτερου Πλειόκαινου. Η ηλικία της Ομάδας της Φοινικιάς είναι Πλειοκαινική.

Η Ομάδα Αγίας Γαλήνης συντίθεται από το σχηματισμό της Αγίας Γαλήνης και βρίσκεται υπερκείμενη της Ομάδας της Φοινικιάς και κατά ένα μέρος αποτελεί πλευρική αντιστοιχία της. Εμπεριέχει χονδροκλαστικά υλικά, χερσαία ερυθρά κροκαλοπαγή και ποταμοδελταϊκές άμμους και αργίλους. Αποτελεί την τελευταία ενότητα του Νεογενούς στην Κρήτη η οποία ανήκει στο Άνω Πλειόκαινο ή πιθανά στο Άνω Πλειστόκαινο (Meulenkamp, 1979; Ten Veen & Kleinspehn, 2003).

Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση της λιθοστρωματογραφίας της Κρήτης, με τις μεγαλύτερες ομάδες σχηματισμών του Νεογενούς και το προνεογενές υπόβαθρο (αδιαίρετο). Παρουσιάζεται η μεταξύ τους σχέση όσο αναφορά τη κατακόρυφη και οριζόντια θέση αλλά και την αλληλοπαρεμβολή τους (Meulenkamp, 1979)



Επάνω στους σχηματισμούς του Νεογενούς ή απευθείας στο προνεογενές υπόβαθρο υπέρκεινται ασύμφωνα τα ιζήματα του Τεταρτογενούς. Πρόκειται για συγκεκολλημένους ή ασύνδετους χερσαίους σχηματισμούς η ηλικία των οποίων τοποθετείται στο Πλειστόκαινο και νεότερη, ενώ οι μορφές τους ποικίλουν σε πλευρικά κορήματα σε κλιτύες, σε αλλουβιακά ριπίδια στις εξόδους χειμάρρων και σε αλλουβιακές αποθέσεις (Meulenkamp, 1979; Φυτρολάκης, 1980).

3.2.2 Γεωλογικό περίγραμμα της ευρύτερης περιοχής μελέτης (Ανατολική περιοχή)

Βασική πηγή πληροφόρησης για την γεωλογική δομή της περιοχής, αποτέλεσε ο υφιστάμενος γεωλογικός χάρτης του Ι.Γ.Μ.Ε., φύλλο Χανιά, 1971(Γεωλογική χαρτογράφηση

από Ε.Δ. Καραγεωργίου, τα έτη 1951-1969. Στρωματογραφία: Σ. Τσαϊλά-Μονώπολη), απόσπασμα του οποίου, με την περιοχή έρευνας παρατίθεται στους ακόλουθους χάρτες (Εικόνες 19 και 20). Σύμφωνα με τα φύλλα χάρτη για την περιοχή έρευνας, απαντούν οι ακόλουθοι σχηματισμοί:

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ-ΟΛΟΚΑΙΝΟ

Αλλουβιακές προσχώσεις (Qal1) μικρού πάχους, αποτελούμενες κυρίως από πηλούς, αργίλλους, άμμους και χάλικες, αποτυπώνονται κυρίως στο Νοτιοανατολικό τμήμα του χάρτη.

Προσχωματικές αποθέσεις ερυθρογής (Qtr), παρατηρούνται εντός των καρστικών εγκοίλων των ανθρακικών σχηματισμών στην ευρύτερη περιοχή.

ΤΡΙΤΟΓΕΝΕΣ-ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ

Μάργες (Mim). Εμφανίζονται κυρίως στο Βόρειο και το Νοτιοανατολικό τμήμα του χάρτη. Είναι κιτρινόφαιες έως λευκοκίτρινες, οι οποίες σε πολλές θέσεις εναλλάσσονται με μαργαϊκούς ψαμμίτες και πλακώδεις μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Εγκλείουν απολιθώματα θαλάσσιων μαλακίων.

Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι (Mik). Έχουν αποτεθεί έπειτα από επίκλιση επάνω στους ασβεστόλιθους της Τρίπολης. Ανάμεσα στους δύο σχηματισμούς κατά θέσεις είναι δυνατόν να παρατηρηθεί το ψαμμιτομαργαϊκό κροκαλοπαγές επίκλισης. Είναι ασβεστόλιθοι συμπαγείς, λευκοκίτρινοι έως λευκότεφροι, οι οποίοι εγκλείουν θαλάσσια απολιθώματα Ελασματοβραχίων, Εχινόδερμων, Βρυοζών, Εχίνων και θραύσματα οστρακοδέρμων.

ΜΕΣΟΖΩΙΚΟ-ΤΡΙΑΔΙΚΟ(:)-ΚΡΗΤΙΑΙΚΟ

ΖΩΝΗ ΤΡΙΠΟΛΕΩΣ

Σύμφωνα με το φύλλο χάρτη για την περιοχή έρευνας, απαντούν κυρίως **ασβεστόλιθοι της ζώνης Τριπόλεως (TR-Kk)**. Πρόκειται για ασβεστόλιθους συμπαγείς, λευκόφαιους έως υποκύανους, μικροκρυσταλλικούς έως στιφρούς, συνήθως με θραύσματα ρουδιστών, ορισμένες φορές λατυποπαγείς, κατά τόπους δολομιτιωμένους, ισχυρά καρστικοποιημένους. Πιθανόν αυτοί να περιλαμβάνουν και κατώτερα μέλη, Ιουρασικής έως Τριαδικής ηλικίας, χωρίς όμως αυτό να έχει αποδειχθεί παλαιοντολογικά. Η ηλικία τους είναι Τριαδικό(:)-Κρητιδικό.

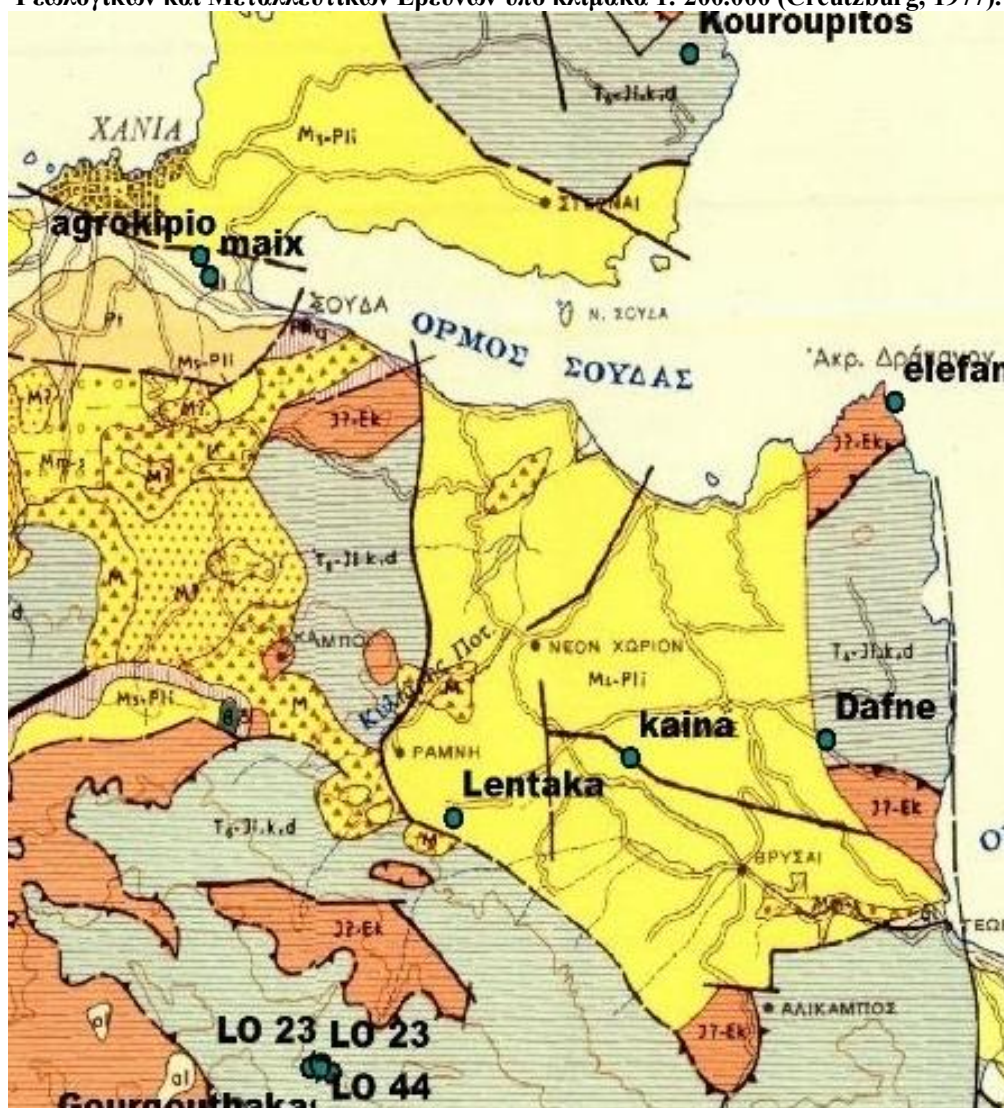
ΠΑΛΑΙΟΖΩΙΚΟ-ΜΕΣΟΖΩΙΚΟ(:)

ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΣΧΙΣΤΩΔΟΥΣ ΚΡΗΤΗΣ

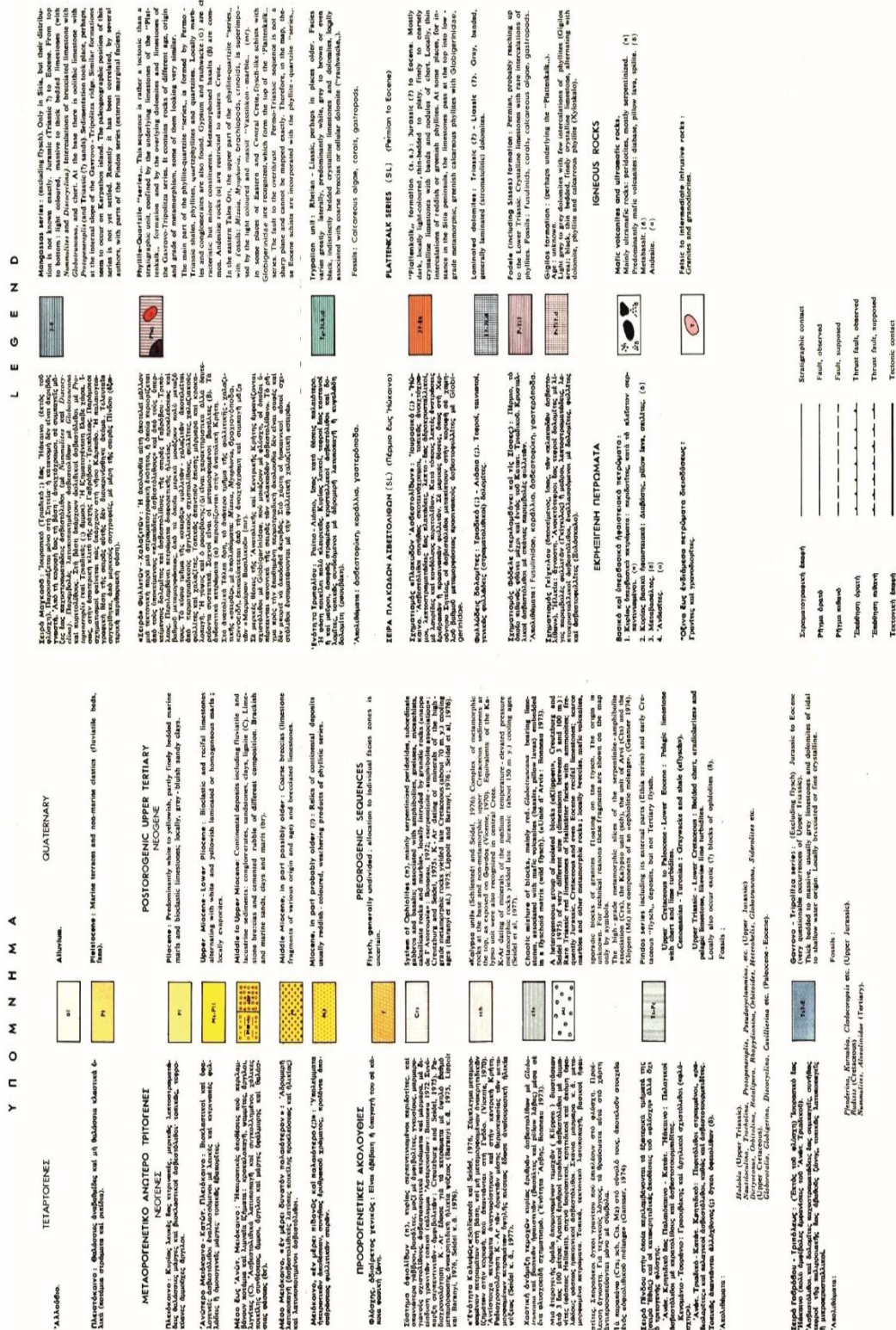
Οι ασβεστόλιθοι της ζώνης Τριπόλεως υπέρκεινται με ανώμαλη τεκτονική επαφή **ασβεστόλιθων του μεταμορφωμένου κρυσταλλοσχιστώδους υπόβαθρου της Κρήτης (Pz-Mzk)**. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί εμφανίζονται στο Νοτιοδυτικό τμήμα του χάρτη (περιοχή

Κεφάλια). Πρόκειται για ασβεστόλιθους συμπαγείς, κρυσταλλικούς, λευκούς έως λευκόφαιους, κατά τόπους υπομέλανους, κυανόφαιους, λεπτοπλακώδεις, ορισμένες φορές δολομιτικούς ή και κατά τόπους δολομίτες του αυτόχθονου συστήματος της νήσου Κρήτης. Η ηλικία τους δεν έχει προσδιοριστεί. Πιθανόν να είναι ηλικίας Παλαιοζωϊκού-Μεσοζωϊκού(;).

Εικόνα 17: Απόσπασμα από τον Γενικό Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδος, Νήσος Κρήτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών υπό κλίμακα 1: 200.000 (Creutzburg, 1977).

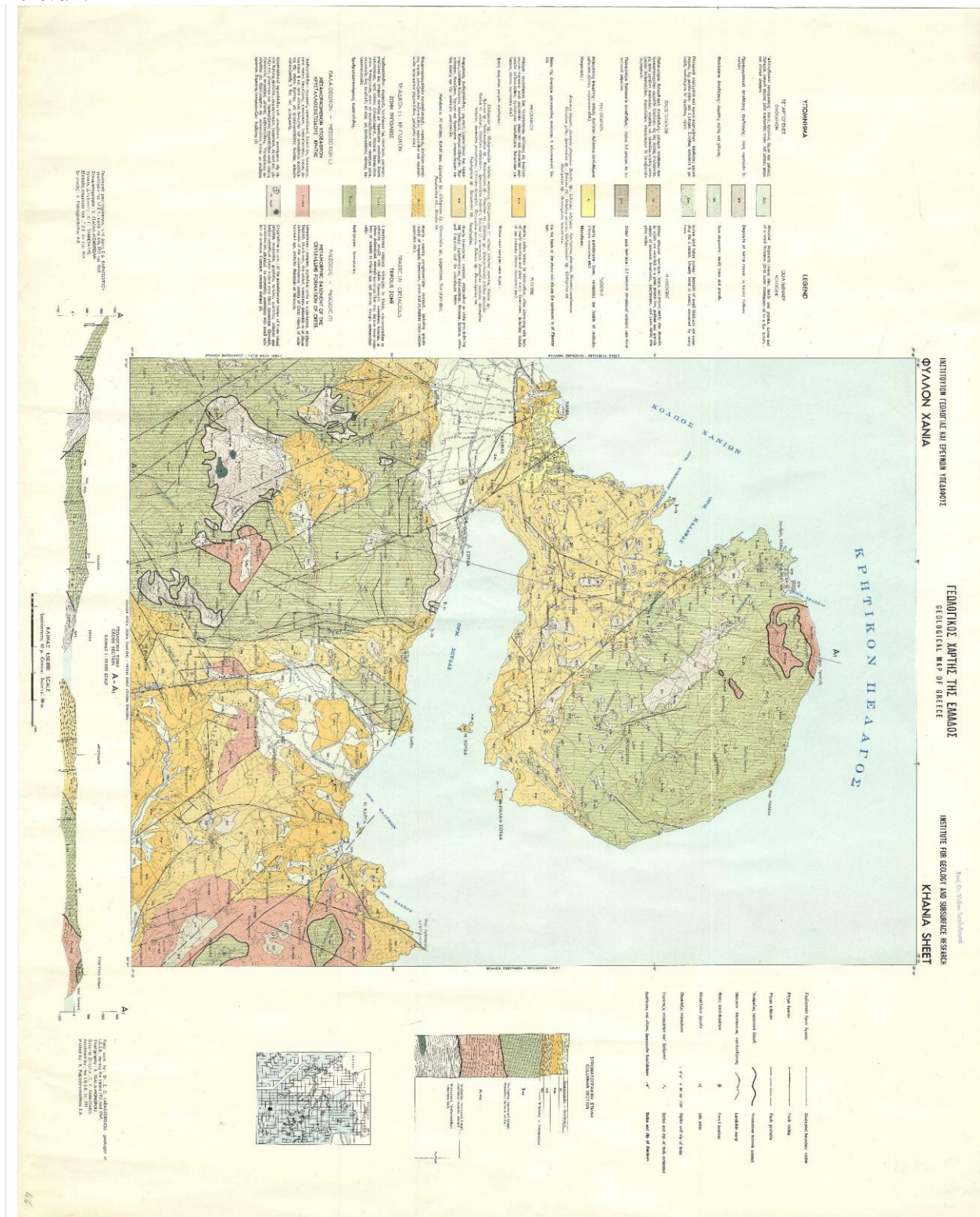


Εικόνα 18: Υπόμνημα γενικού Γεωλογικού Χάρτη Ελλάδος, Νήσος Κρήτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών (Creutzburg, 1977).



Εικόνα 18: Γεωλογικός χάρτης του Ι.Γ.Ε.Υ., φύλλο Χανιά, (Καραγεωργίου 1971)

Εικόνα 19



3.3 Κλιματολογικά χαρακτηριστικά περιοχής ν. Χανίων

3.3.1 Γενικά κλιματολογικά χαρακτηριστικά της Κρήτης

Ο τύπος κλίματος της Κρήτης είναι ένας μεταβατικός ενδιάμεσος τύπος μεταξύ του χερσαίου Μεσογειακού και του ερημοειδούς Μεσογειακού, στο οποίο υπάγεται κυρίως το νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού. Το κύριο χαρακτηριστικό του κλίματος είναι η γλυκύτητα και η ηπιότητα. Η ψυχρή εποχή είναι ήπια και σε αυτό συντελεί η συχνή άφιξη στην περιοχή των θερμών και υγρών ΝΔ αερίων μαζών. Από την άποψη της ηπιότητας και των μεταβολών το κλίμα της Κρήτης θεωρείται προνομιούχο και οφείλεται στην κεντρική θέση που κατέχει η νήσος στην ανατολική Μεσόγειο. Ο χειμώνας αρχίζει συνήθως κατά τα μέσα Δεκεμβρίου και είναι ήπιος. Η μέση θερμοκρασία εμφανίζεται μεγαλύτερη στα ανατολικά από ότι στα δυτικά και μεγαλύτερη στα νότια από ότι στα βόρεια. Η εικόνα διαφοροποιείται σημαντικά στα ορεινά, στα οποία οι μέσες θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες, οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις εντονότερες και οι θερμοκρασίες ιδιαίτερα των χειμερινών μηνών σημαντικά χαμηλότερες. Θερμότερος μήνας του έτους είναι ο Αύγουστος με μέση θερμοκρασία 27,13°C. Οι θερμοκρασίες αυτές προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό και τη χρονική διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου, η οποία σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης καλύπτει 4 τουλάχιστον μήνες (Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος και Σεπτέμβριος). Η ηλιοφάνεια είναι ιδιαίτερα υψηλή σε ολόκληρη την Κρήτη. Ο μέσος ετήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας ανέρχεται σε 2.700 περίπου ώρες στη βόρεια Κρήτη (2.707 ώρες στο Ηράκλειο, 2.699 ώρες στη Σητεία, 2.765 ώρες στη Σούδα και 2.592 ώρες στο Ρέθυμνο (μέσος όρος 8 ετών μόνο). Στη νότια Κρήτη ο μέσος ετήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας είναι κατά 10% τουλάχιστον υψηλότερος ανερχόμενος σε 3.000 περίπου ώρες (3.068 ώρες στην Ιεράπετρα και 2.948 ώρες στο Τυμπάκι). Η μέση νέφωση κυμαίνεται μεταξύ περίπου 5 όγδοα τον Ιανουάριο και 0,6-1 όγδοο τον Ιούλιο. Ο μέσος αριθμός αιθριών ημερών (νέφωση μεταξύ 0 και 1,5 όγδοα) κυμαίνεται μεταξύ 3 ημερών περίπου τον Ιανουάριο και 28 ημερών τον Ιούλιο στις πεδινές περιοχές. Στις ορεινές περιοχές ο αριθμός των αιθριών ημερών κατά τους θερινούς μήνες είναι κατά 30% μικρότερος. Η ομίχλη (όπως και η πάχνη) είναι επίσης εξαιρετικά σπάνια στην Κρήτη. Αντίθετα, συχνότερη είναι η εμφάνιση υδροσταγόνων πάνω στις επιφάνειες του εδάφους, δηλαδή η δρόσος. (Αγγελίδης et al, σελ 215-220, 2017).

Η Κρήτη γενικώς παρουσιάζει σημαντική ανισοκατανομή του ετήσιου όγκου βροχόπτωσης τόσο γεωγραφικά (από ανατολικά προς δυτικά), όσο και φυσιογραφικά (πεδινές προς ορεινές περιοχές), εμφανίζοντας βροχοβαθμίδα (αύξηση της βροχόπτωσης με το υψόμετρο) από τις μεγαλύτερες της Ελλάδας, εάν όχι τη μεγαλύτερη: 61 mm / 100 m. Η μέση μηνιαία

βροχόπτωση είναι μέγιστη το Δεκέμβριο (97,30 mm) ή τον Ιανουάριο (106,87 mm) και ελάχιστη τον Ιούλιο (0,04 mm) και τον Αύγουστο (2,95 mm) οι οποίοι είναι σχεδόν άνομβροι σε ολόκληρη την πεδινή Κρήτη. Ο μηνιαίος αριθμός ημερών βροχής κυμαίνεται μεταξύ 15 ημερών περίπου κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο και 0,3 ημέρες τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Ο αριθμός των ημερών βροχής δεν διαφέρει σημαντικά μεταξύ των ορεινών και των πεδινών σταθμών. Στους ορεινούς μάλιστα σταθμούς ο αριθμός ημερών βροχής εμφανίζεται ίσος ή και μικρότερος του αριθμού ημερών βροχής στους πεδινούς σταθμούς, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες. Ο μέσος αριθμός ημερών βροχής στην Κρήτη ανέρχεται σε 90 περίπου ημέρες (25% του έτους).

3.3.2 Κλιματολογικά χαρακτηριστικά του Νομού Χανίων

Γενικά το κλίμα του νομού Χανίων είναι εύκρατο μεσογειακό, με ήπιους χειμώνες και ζεστά και ξηρά καλοκαίρια. Το φθινόπωρο και το χειμώνα επικρατούν βόρειοι και βορειοδυτικοί άνεμοι, ενώ το καλοκαίρι οι ασθενείς άνεμοι προσφέρουν σχετική δροσιά. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερες στην περιοχή των Λευκών Ορέων, ενώ στα μεγαλύτερα υψόμετρα δεν λείπουν και τα χιόνια (Νοέμβριος-Μάιος). Οι βροχοπτώσεις είναι περισσότερες από την υπόλοιπη Κρήτη, λόγω των Λευκών Ορέων που αιχμαλωτίζουν τα υγρά ρεύματα από το Ιόνιο Πέλαγος, αλλά και λόγω της ασβεστολιθικής σύστασης του εδάφους. Σε αυτήν τη σύσταση του εδάφους οφείλονται, εξάλλου, οι πολλές πηγές του νομού. Από τον Απρίλιο έως και τον Σεπτέμβριο οι βροχοπτώσεις είναι ελάχιστες, ενώ ηλιοφάνεια υπάρχει στο 70% των ημερών του έτους.

Για την περαιτέρω ανάλυση των μετεωρολογικών χαρακτηριστικών και την περιγραφή του κλίματος της περιοχής των Χανίων, χρησιμοποιήθηκαν τα μετεωρολογικά και κλιματολογικά στοιχεία του παρακάτω Μετεωρολογικού Σταθμού (ΜΣ), του οποίου φορέας λειτουργίας είναι το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ).

Πίνακας 3.3.2.1: Μετεωρολογικοί Σταθμοί Κρήτης ΕΕΑ

α/α	Μετεωρολογικός Σταθμός (ΜΣ)	Κωδικός ΜΣ	Υψόμετρο (m)	Θέση	Γεωγραφικό πλάτος (N)	Γεωγραφικό μήκος (E)	Χρονική περίοδος στοιχείων
1	Χανίων	LG25	137	Πολυτεχνειούπολη	35° 32' 00"	24° 04' 09"	2/2006-4/2017
2	Ηρακλείου	LG30	115	Κνωσός - Μουσείο Φυσικής Ιστορίας	35° 18' 44"	25° 09' 22"	5/2006-4/2017
3	Αγίου Νικολάου	LGJ9	30	Κτίριο Νομαρχίας	35° 12' 00"	25° 42' 00"	11/2009-4/2017

Το σύνολο των στοιχείων που έχουν καταγραφεί στον παραπάνω Μετεωρολογικό Σταθμό (θερμοκρασία, βροχοπτώσεις, ταχύτητα ανέμου) δίνονται στους παρακάτω Πίνακα 3.3.2.1.

Πίνακας 3.3.2.1: Γενικά κλιματολογικά στοιχεία Μ.Σ Χανίων

Μέσος Όρος περιόδου 02/2006 έως 04/2017							
ΜΗΝΕΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ °C			Μέσο ύψος βροχόπτωσης (mm)	Μέση σχετική υγρασία %	Ταχύτητα Ανέμου (κόμβοι)	Επικρατούσα Διεύθυνση Ανέμου
	Μέση	Μέση Μέγιστη	Μέση Ελάχιστη				
Ιανουάριος	11,56	21,11	4,27	114,36	8,19	66,71	ΝΔ
Φεβρουάριος	12,02	22,45	4,63	97,94	8,91	68,79	ΝΔ
Μάρτιος	13,68	25,11	6,53	50,53	8,89	65,71	ΝΔ
Απρίλιος	16,58	28,98	9,43	25,20	8,44	61,41	ΝΔ
Μάιος	20,21	32,62	12,13	17,98	7,88	52,54	ΝΔ
Ιούνιος	24,52	37,20	16,24	1,80	7,51	52,82	ΝΔ
Ιούλιος	26,76	37,01	19,63	0,04	7,15	44,64	ΒΔ
Αύγουστος	26,89	36,22	20,32	3,35	6,75	42,72	ΒΔ
Σεπτέμβριος	23,97	35,09	17,00	12,62	7,18	47,84	ΝΔ
Οκτώβριος	19,95	31,27	12,57	87,01	6,80	55,59	ΝΔ
Νοέμβριος	16,33	26,55	9,36	59,13	6,15	55,15	ΝΔ
Δεκέμβριος	12,95	22,89	5,30	107,62	7,65	62,16	ΝΔ
Μ.Ο. Έτους	18.79	29.71	11.45	577.58	7.63	56.34	ΝΔ

Σύμφωνα με τα στοιχεία του Μ.Σ. Χανίων του ΕΑΑ, για την χρονική περίοδο Φεβρουάριος 2006 έως Απρίλιος 2017, η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 18,79°C. Ο θερμότερος μήνας είναι ο Αύγουστος με μέση θερμοκρασία 26,89 °C, ενώ ο ψυχρότερος είναι ο Ιανουάριος με μέση θερμοκρασία 11,56 °C (βλ. Πίνακα 6-2). Τη μεγαλύτερη μέση μέγιστη θερμοκρασία παρουσιάζει ο μήνας Ιούνιος με 37,20 °C ενώ τη μικρότερη μέση μέγιστη θερμοκρασία παρουσιάζει ο μήνας Ιανουάριος με 21,11 °C. Τη μεγαλύτερη μέση ελάχιστη θερμοκρασία παρουσιάζει ο μήνας Αύγουστος με 20,32 °C ενώ τη μικρότερη μέση ελάχιστη θερμοκρασία παρουσιάζει ο μήνας Ιανουάριος με 4,27 °C.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που έγιναν στο Μ.Σ. Χανίων για την χρονική περίοδο 2006-2017,

παρατηρήθηκε ότι η συνολική μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 577,58 mm. Όπως είναι λογικό, οι μήνες του χειμώνα παρουσιάζουν το μεγαλύτερο μέσο ύψος βροχόπτωσης με μέγιστη τιμή για τον μήνα Ιανουάριο 114,36 mm. Υψηλές βροχοπτώσεις πέραν των μηνών του χειμώνα παρουσιάζει και ο μήνας Οκτώβριος με μέσο ύψος 87,01 mm. Το μικρότερο μέσο ύψος βροχόπτωσης παρουσιάζει ο μήνας Ιούλιος με 0,04 mm.

Από τα στοιχεία που έχουν καταγραφεί στον Μ.Σ. Χανίων προκύπτει, ότι στην περιοχή μελέτης οι άνεμοι έχουν επικρατούσα διεύθυνση Νοτιοδυτική (ΝΔ) για τους περισσότερους μήνες του έτους. Το εύρος της μέσης μηνιαίας έντασης κυμαίνεται από 6,15 έως 8,91 km/h. Η μέση ετήσια ένταση ανέμου είναι 7,63 km/h.

Πιο αναλυτικά, ο μήνας με την μεγαλύτερη μέση ένταση ανέμου για το χρονικό διάστημα των τιμών μας είναι ο Φεβρουάριος με 8,91 km/h ενώ ο μήνας με την μικρότερη μέση ένταση ανέμου είναι ο Νοέμβριος με 6,15 km/h. (Αγγελίδης et al, σελ 215-220, 2017).

Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία συλλογής δεδομένων & πληροφοριών

4.1 Εξοπλισμός

Για τις ανάγκες μέτρησης και επεξεργασίας συγκεντρώσεων ραδονίου στην παρούσα εργασία τοποθετήθηκαν δεκαοκτώ δοσίμετρα τύπου CR-39. Αναλυτικά στοιχεία για αυτόν τον παθητικό πυρηνικό ανιχνευτή ιχών αυτού του τύπου (SSNTD) αναφέρονται και στην παράγραφο 2.7.3. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου ανιχνευτή έγινε με κριτήρια το χαμηλό κόστος, την ευκολία χρήσης, μεταφοράς και τοποθέτησης, τον μικρό όγκο και βάρος, την μέτρηση ολοκληρωτικής τιμής της συγκέντρωσης ραδονίου, την αυτονομία και την ανεξαρτησία τους από ηλεκτρικό ρεύμα.

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

Οι συγκεκριμένοι ανιχνευτές CR-39 αποτελούνται από ένα μικρό κομμάτι πλαστικού- φιλμ, διαστάσεων 13 × 37 mm και πάχους 1 mm, προμηθευόμενο από τη TASL-UK. Ο ανιχνευτής δρα σε θάλαμος διάχυσης ραδονίου αποκλείοντας την είσοδο στα θυγατρικά του ραδονίου, την σκόνη και την υγρασία επιτρέποντας αποκλειστικά την είσοδο στο ραδόνιο. Τα φιλμ αυτά τοποθετούνται σε μικρό δοχείο, όπως αυτό της εικόνας 19. Η οπή του τελευταίου καλύπτεται από φίλτρο που αποτρέπει την είσοδο θυγατρικών και σκόνης. Κατά τη διάρκεια τοποθέτησης του μετρητή στο πεδίο, σωματίδια 2α, προερχόμενα από τη διάσπαση του ραδονίου και των θυγατρικών του, προσπίπτουν στο φιλμ και αφήνουν ίχνη. Μετά την πάροδο του χρόνου έκθεσης (διάρκειας 1-12 μήνες) ο ανιχνευτής αφαιρείται και υποβάλλεται σε χημική διαδικασία επιλεκτικής διάβρωσης (*chemical etching*) με διάλυμα σταθερής θερμοκρασίας. Με κατάλληλη βαθμονόμηση η πυκνότητα ιχών του ανιχνευτή (ίχνη/cm²) μετατρέπεται σε συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m³) του εσωτερικού αέρα του χώρου που ήταν τοποθετημένοι και εκφράζει τη μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου που είναι και η πλέον αντιπροσωπευτική.

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

Για την αποφυγή σφαλμάτων, το πρώτο βήμα, αυτό της εγκατάστασης του ανιχνευτή, θα πρέπει να πραγματοποιείται όπως ορίζεται στο πρότυπο ISO 11665-1. Στην ειδική περίπτωση των εσωτερικών μετρήσεων (*indoor*), αλλά και γενικά, ο ανιχνευτής πρέπει να τοποθετηθεί σε μια σαφή επιφάνεια μεταξύ 1-2 m πάνω από το έδαφος, υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- α) Σε ελεύθερο χώρο τουλάχιστον 20 cm γύρω από τον ανιχνευτή για να αποφευχθεί η επίδραση του θορονίου από τα τοιχώματα
- β) Ο ανιχνευτής θα πρέπει να είναι μακριά από πηγές θερμότητας (καλοριφέρ, καμινάδα, ηλεκτρικές συσκευές, τηλεόραση, άμεσο ηλιακό φως, κλπ) στην περίπτωση των κτηρίων και από περιοχές κυκλοφορίας αέρα, όπως πόρτες και παράθυρα και φυσικές πηγές εξαερισμού. Στην περίπτωση των σπηλαίων δηλαδή, μακριά από την είσοδο του, καθώς τα αποτελέσματα θα επηρεαστούν από τον εξωτερικό αέρα.
- γ) Ο ανιχνευτής δεν πρέπει να διαταραχθεί κατά τη διάρκεια της μέτρησης από πτώσεις αντικειμένων ή μετακινήσεις, ώστε να αποφευχθεί η αλλαγή των συνθηκών δειγματοληψίας,
- δ) Ο ανιχνευτής θα πρέπει επίσης να είναι ασφαλής κατά τη διάρκεια της μέτρησης, προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε ζημιά. Οι παθητικές τεχνικές αυτών των ανιχνευτών είναι απλές, με ανταγωνιστικό κόστος αλλά και κατάλληλες για ερευνητική εργασία μακροχρόνιων μετρήσεων. Τα αποτελέσματα μέτρησης ραδονίου με παθητικούς ανιχνευτές αποδίδονται σε Bq/m³ και αντιστοιχούν στην μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου του εσωτερικού αέρα ενός χώρου. (Τσουκαλά Δ, 2017)

Εικόνα 20: Παθητικός ανιχνευτής πυρηνικών ιχνών CR-39 που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.



4.2 Διαδικασία μετρήσεων

Μετά την προμήθεια των μετρητών πυρηνικών ιχνών CR-39 (δοσιμέτρων) από το ΕΚΕΦΕ(Εθνικό Κέντρο Ερευνών Φυσικών Επιστημών) Δημόκριτος, αυτοί τοποθετούνται σε κάποιο κατάλληλο σημείο του εσωτερικού χώρου των κτιρίων, αφήνοντας στην κρίση του μελετητή την επιλογή αυτής της «καταλληλότητας» για καλύτερη λήψη αποτελεσμάτων. Η επιλογή ενός τέτοιου σημείου τοποθέτησης του μετρητή, αφενός εξαρτάται από το είδος και την χρήση του χώρου και αφετέρου από άλλους δευτερογενείς παράγοντες όπως η απόσταση από εξωτερικά κουφώματα, η αποφυγή επαφής με υγρά, φωτιά, εστίες θέρμανσης, κλπ.

Το δοσίμετρο παραμένει σε αυτό το σημείο του χώρου για χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από 3 μήνες έως και 1 χρόνο. Στην συνέχεια το δοσίμετρο επιστρέφεται για την εργαστηριακή του επεξεργασία και μέτρηση. Τα αποτελέσματα ανακοινώνονται εγγράφως στους ενδιαφερόμενους και η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι διαπιστευμένη από τον ΕΣΥΔ, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 11665 (ΕΕΑΕ).

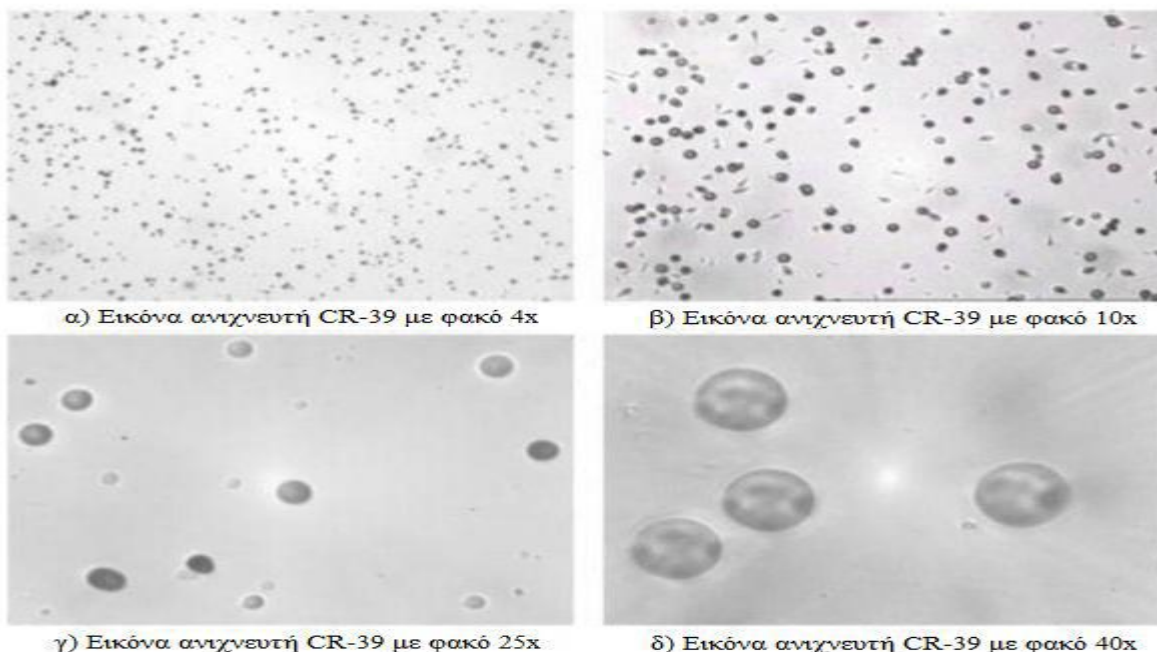
Όσον αφορά την βαθμονόμηση, το σύστημα μέτρησης δηλαδή αισθητήρας και σύστημα ανίχνευσης, θα πρέπει να ρυθμίζεται όπως ορίζεται στο πρότυπο ISO 11665-1. Η σχέση μεταξύ της φυσικής ποσότητας που καταγράφεται από τον ανιχνευτή όπως ο αριθμός ιχνών, αριθμός των ηλεκτρικών φορτίων, καταμέτρηση παλμών και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

4.3 Επεξεργασία μετρήσεων

Η μέθοδος επεξεργασίας και μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου βασίστηκε στην μέθοδο που περιγράφει το NRPB-R283 «NRPB Etched-Track Detector for Area Monitoring of Radon» (G.D Hardcastle et al.1996) προσαρμοσμένη και εναρμονισμένη με το ISO 11665-4:2012. Πρόκειται για ένα δοσίμετρο τύπου NRPB/SSI που περιέχει TASTRAK CR-39 στοιχείο, διαστάσεων 13x37 mm και πάχους 1 mm.

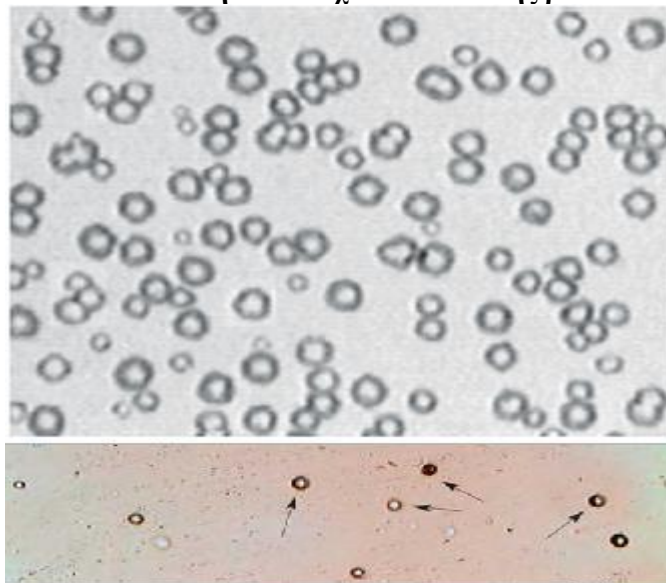
Ολόκληρος ο ανιχνευτής δρά σαν θάλαμος διάχυσης ραδονίου αποκλείοντας την είσοδο στην σκόνη, την υγρασία και τα θυγατρικά του. Πραγματοποιείται χημική διάβρωση με τοποθέτηση του στοιχείου σε καυστικό νάτριο NaOH 5N για έξι ώρες στους 77°C. Το διαβρωμένο στοιχείο ελέγχεται στο μικροσκόπιο (σε μεγένθυση 4x) που είναι συνδεδεμένο με μια ψηφιακή κάμερα και ένα λογισμικό αποθηκεύει τις διαδοχικές λήψεις και αθροίζει τα ίχνη σε επιφάνεια εμβαδού 0,4cm² (0,8cm² για το υπόβαθρο).

Εικόνα 21: Στιγμιότυπα από ίχνη διασπάσεων ραδονίου σε διαφορετικές μεγεθυντικές αναλύσεις (Νικολόπουλος,2000)



Μια τυπική εικόνα μικροσκοπίου των ιχνών διάσπασης ραδονίου φαίνεται στην εικόνα 22 παραπάνω. Τα ίχνη στις περισσότερες περιπτώσεις είναι α) κυκλικά β) σχετικώς ελλειψοειδή γ) αιχμηρής μορφής και δ) σχήματος πεπλατυσμένου κώνου. Όμως εκτός από τα ίχνη διάσπασης ραδονίου, υπάρχουν και αρκετά ίχνη τα οποία οφείλονται σε καταστροφές του υλικού, τα οποία ονομάζονται «θόρυβος» και δεν σχετίζονται με δίοδο σωματιδίων άλφα. Από τα ίχνη αυτά μερικά μοιάζουν με αχνά μικρά ίχνη διάσπασης ραδονίου ενώ άλλα είναι μεγάλα και σκούρα. Επίσης μπορεί να διακρίνονται και πολύ μεγάλα ίχνη γνωστά ως κρατήρες (craters) τα οποία για μεγάλα χρονικά διαστήματα διάβρωσης μοιάζοντας με μεγάλα ίχνη ραδονίου ενδέχεται να καταμετρηθούν (Τσουκαλά Δ. (2013), Νικολόπουλος,2000).

Εικόνα 22: Τυπική εικόνα ιχνών διάσπασης ραδονίου σε μετρητή CR-39.



Το λογισμικό επιπλέον δίνει την δυνατότητα ορισμού των κριτηρίων επιλογής των ιχνών όπως διάμετρο, μέγεθος και στρογγυλότητα. Σε κάθε διάβρωση προστίθενται 2 στοιχεία εκτεθειμένα σε πρότυπη άλφα πηγή για τον έλεγχο των σωστών συνθηκών διάβρωσης όπως η μορφολογία και το πλήθος των ιχνών. Σε περίπτωση απόκλισης το λογισμικό μπορεί να προσαρμόζεται κατάλληλα σύμφωνα με τα κριτήρια διαχωρισμού.

Ο τύπος της μέσης συγκέντρωσης ραδονίου C δίνεται από τον τύπο:

$$C = (ng - nb) / t \cdot Sssndt \cdot Fc$$

Όπου:

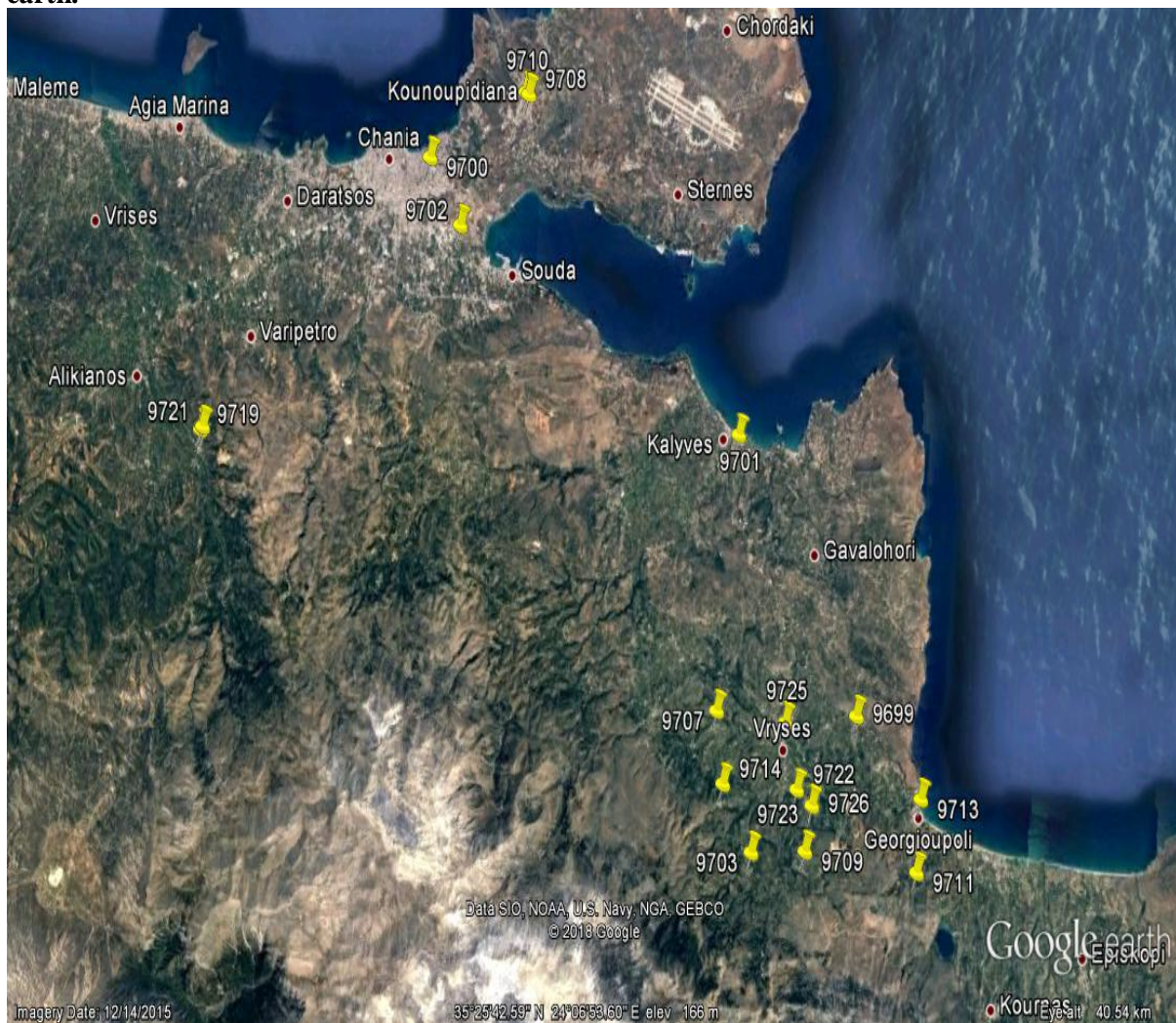
- Fc συντελεστής βαθμονόμησης
- ng ο αριθμός των ιχνών
- nb μέσος όρος των ιχνών του υποβάθρου
- $Sssndt$ επιφάνεια που μετρήθηκε (cm²)

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

5.1 Γεωγραφικός προσδιορισμός θέσεων ανιχνευτών

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια καταγραφής μετρήσεων συγκέντρωσης ραδονίου σε δημόσια και ιδιωτικά κτίρια και χώρους που αφορούν την ανατολική (πεδινή) περιοχή του Νομού Χανίων. Κυρίως εξετάστηκαν οι βορειοανατολικές περιοχές του νομού λόγω μεγαλύτερου πληθυσμού, γεωλογικού ενδιαφέροντος και υποψίας ραδονίου. Οι περιοχές αυτές είναι η πόλη των Χανίων, ο μεγάλος οικισμός των Κουνουπιδιανών στην περιοχή του Ακρωτηρίου, και κυρίως μελετήθηκαν οικισμοί της επαρχίας Αποκορώνου όπου υπάρχουν δεδομένα για την ύπαρξη αυξημένων συγκεντρώσεων ραδονίου από παλιότερες δημοσιεύσεις ερευνών που είχαν πραγματοποιηθεί στην περιοχή (Νικολόπουλος, 2000).

Εικόνα 23: Εικόνα γεωγραφικού προσδιορισμού θέσεων ανιχνευτών μέσω πλατφόρμας google earth.



Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 23 παραπάνω, τοποθετήθηκαν συνολικά δεκαοκτώ (18) παθητικοί ανιχνευτές τύπου CR-39, στις θέσεις που περιγράφονται παρακάτω:

- 2 ανιχνευτές στην περιοχή της πόλης των Χανίων, εκ των οποίων ο ένας τοποθετήθηκε σε υπόγειο τεχνικό γραφείο και ο άλλος σε ισόγειο γραφείο στο κτίριο του Μ.Α.Ι.Χ (Μεσογειακό Αγρονομικό Ινστιτούτο Χανίων).
- 2 ανιχνευτές στην περιοχή Ακρωτηρίου Χανίων στον οικισμό Κουνουπιδιανά, εκ των οποίων ένας τοποθετήθηκε σε υπόγειο εργαστήριο και ο δεύτερος σε ισόγεια οικία.
- 2 ανιχνευτές στην περιοχή του οικισμού Φουρνές, στην ευρύτερη περιοχή του κάμπου των Χανίων, εκ των οποίων ο ένας τοποθετήθηκε σε ισόγειο καφενείο ενώ ο δεύτερος σε ισόγεια οικία
- 2 ανιχνευτές στον οικισμό Μάζα Αποκορώνου, ο πρώτος σε ισόγειο καφενείο και ο δεύτερος σε ισόγεια οικία
- 1 ανιχνευτής στον οικισμό Νίππος Αποκορώνου σε ισόγεια οικία
- 1 ανιχνευτής στον οικισμό Βαφές Αποκορώνου σε ισόγεια οικία
- 1 ανιχνευτής στον οικισμό Μαθές Αποκορώνου σε ισόγεια οικία
- 1 ανιχνευτής στον οικισμό Φίλιππος Αποκορώνου σε ισόγεια οικία
- 1 ανιχνευτής στον οικισμό Αλικάμπος Αποκορώνου σε ισόγεια οικία
- 1 ανιχνευτής στον οικισμό Βρύσσεσ Αποκορώνου σε ισόγεια οικία
- 1 ανιχνευτής στον οικισμό Καλύβες Αποκορώνου σε ισόγεια οικία
- 1 ανιχνευτής στον οικισμό Καλαμίτσι Αμυγδάλου Αποκορώνου σε ισόγεια οικία
- 1 ανιχνευτής στον οικισμό Εμπρόσνερος Αποκορώνου σε ισόγεια οικία
- 1 ανιχνευτής στον οικισμό Γεωργιούπολη Αποκορώνου σε ισόγεια οικία

Σε συνέχεια των παραπάνω παρουσιάζονται και σε μορφή πίνακα οι θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν οι ανιχνευτές.

Πίνακας 5.1.1: Οικισμοί τοποθέτησης μετρητών – είδος και χρήση χώρων – γεωγραφικές συντεταγμένες φ και λ μετρητών – συντεταγμένες χ και γ σε ΕΓΣΑ 87.

Α/Α	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ-ΟΙΚΙΣΜΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΧΩΡΟΥ	ΓΕΩ/ΦΚΟ ΠΛΑΤΟΣ(φ)	ΓΕΩ/ΦΚΟ ΜΗΚΟΣ (λ)
1	ΦΟΥΡΝΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΚΑΦΕΝΕΙΟ	35°26'16.25"N	23°56'24.83"E
2	ΦΟΥΡΝΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°26'19.02"N	23°56'27.92"E
3	ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΚΑΦΕΝΕΙΟ	35°21'29.09"N	24°12'47.70"E
4	ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°21'27.64"N	24°12'47.55"E
5	ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°21'40.61"N	24°12'23.65"E
6	ΜΑΘΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°20'34.61"N	24°15'37.81"E
7	ΓΕΩΡΓΙΟΥΠΟΛΗ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°21'40.05"N	24°15'41.25"E
8	ΑΛΙΚΑΜΠΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°20'46.96"N	24°12'38.97"E
9	ΚΑΛΥΒΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°26'53.48"N	24°10'30.85"E
10	ΒΡΥΣΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°22'39.28"N	24°12'1.91"E
11	ΒΑΦΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°21'40.58"N	24°10'26.58"E
12	ΚΑΛΑΜΙΤΣΙ ΑΜΥΓΔΑΛΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°22'50.57"N	24°13'52.53"E
13	ΝΙΠΠΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°22'44.81"N	24°10'12.88"E
14	ΕΜΠΡΟΣΝΕΡΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°20'41.93"N	24°11'14.81"E
15	ΧΑΝΙΑ-ΚΕΝΤΡΟ	ΥΠΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ	35°30'38.42"N	24° 2'5.24"E
16	ΚΟΥΝΟΥΠΙΔΙΑΝΑ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	35°31'41.78"N	24° 4'37.05"E
17	ΚΟΥΝΟΥΠΙΔΙΑΝΑ	ΥΠΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ	35°31'43.48"N	24° 4'32.09"E
18	ΧΑΝΙΑ - ΜΑΙΧ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ ΜΑΙΧ	35°29'39.96"N	24° 2'57.10"E

Α/Α	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ-ΟΙΚΙΣΜΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΧΩΡΟΥ	Χ (ΕΓΣΑ'87)	Υ (ΕΓΣΑ'87)
1	ΦΟΥΡΝΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΚΑΦΕΝΕΙΟ	494426.33	3921313.40
2	ΦΟΥΡΝΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	494504.29	3921398.68
3	ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΚΑΦΕΝΕΙΟ	519225.53	3912486.19
4	ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	519221.84	3912441.51
5	ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	518617.84	3912839.79
6	ΜΑΘΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	523522.99	3910818.12
7	ΓΕΩΡΓΙΟΥΠΟΛΗ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	523604.50	3912834.33
8	ΑΛΙΚΑΜΠΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	519007.97	3911187.84
9	ΚΑΛΥΒΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	515754.16	3922472.80
10	ΒΡΥΣΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	518065.55	3914646.09
11	ΒΑΦΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	515663.48	3912833.19
12	ΚΑΛΑΜΙΤΣΙ ΑΜΥΓΔΑΛΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	520855.77	3914999.98
13	ΝΙΠΠΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	515314.34	3914811.29
14	ΕΜΠΡΟΣΝΕΡΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	516884.02	3911028.62
15	ΧΑΝΙΑ-ΚΕΝΤΡΟ	ΥΠΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ	503005.90	3929388.99
16	ΚΟΥΝΟΥΠΙΔΙΑΝΑ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	506828.36	3931343.10
17	ΚΟΥΝΟΥΠΙΔΙΑΝΑ	ΥΠΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ	506703.41	3931395.37
18	ΧΑΝΙΑ - ΜΑΙΧ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ ΜΑΙΧ	504313.11	3927588.55

5.2 Αποτελέσματα μετρήσεων

Με σκοπό την καλύτερη ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες τα αποτελέσματα των μετρήσεων που κατέγραψαν οι μετρητές καθώς και η χρονική διάρκεια της κάθε μέτρησης.

Πίνακας 5.2.1: Κωδικός αριθμός μετρητών – διάρκεια μέτρησης.

A/A	αρ.μετρητή	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ-ΟΙΚΙΣΜΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΧΩΡΟΥ	έναρξη	λήξη
1	9719	ΦΟΥΡΝΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΚΑΦΕΝΕΙΟ	23/02/2017	25/05/2017
2	9721	ΦΟΥΡΝΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	23/02/2017	25/05/2017
3	9723	ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΚΑΦΕΝΕΙΟ	24/02/2017	25/05/2017
4	9726	ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	24/02/2017	25/05/2017
5	9722	ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	24/02/2017	25/05/2017
6	9711	ΜΑΘΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	24/02/2017	25/05/2017
7	9713	ΓΕΩΡΓΙΟΥΠΟΛΗ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	24/02/2017	25/05/2017
8	9709	ΑΛΙΚΑΜΠΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	02/03/2017	25/05/2017
9	9701	ΚΑΛΥΒΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	02/03/2017	25/05/2017
10	9725	ΒΡΥΣΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	02/03/2017	25/05/2017
11	9714	ΒΑΦΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	02/03/2017	25/05/2017
12	9699	ΚΑΛΑΜΙΤΣΙ ΑΜΥΓΔΑΛΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	02/03/2017	25/05/2017
13	9707	ΝΙΠΠΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	02/03/2017	25/05/2017
14	9703	ΕΜΠΡΟΣΝΕΡΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	02/03/2017	25/05/2017
15	9700	ΧΑΝΙΑ-ΚΕΝΤΡΟ	ΥΠΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ	02/03/2017	25/08/2017
16	9708	ΚΟΥΝΟΥΠΙΔΙΑΝΑ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	06/03/2017	28/08/2017
17	9710	ΚΟΥΝΟΥΠΙΔΙΑΝΑ	ΥΠΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ	06/03/2017	25/08/2017
18	9702	ΧΑΝΙΑ - ΜΑΙΧ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ ΜΑΙΧ	13/03/2017	25/08/2017

Πίνακας 5.2.2: Αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης ραδονίου.

A/A	αρ.μετρητή	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ-ΟΙΚΙΣΜΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΧΩΡΟΥ	Συγκέντρωση ραδονίου Bq/m ³	uncertainty
1	9719	ΦΟΥΡΝΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΚΑΦΕΝΕΙΟ	162	11
2	9721	ΦΟΥΡΝΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	207	13
3	9723	ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΚΑΦΕΝΕΙΟ	124	8
4	9726	ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	352	23
5	9722	ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	96	6
6	9711	ΜΑΘΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	87	6
7	9713	ΓΕΩΡΓΙΟΥΠΟΛΗ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	86	6
8	9709	ΑΛΙΚΑΜΠΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	103	7
9	9701	ΚΑΛΥΒΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	139	9
10	9725	ΒΡΥΣΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	112	7
11	9714	ΒΑΦΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	81	5
12	9699	ΚΑΛΑΜΙΤΣΙ ΑΜΥΓΔΑΛΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	626	41
13	9707	ΝΙΠΠΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	242	16
14	9703	ΕΜΠΡΟΣΝΕΡΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	135	9
15	9700	ΧΑΝΙΑ-ΚΕΝΤΡΟ	ΥΠΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ	137	9
16	9708	ΚΟΥΝΟΥΠΙΔΙΑΝΑ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	117	8
17	9710	ΚΟΥΝΟΥΠΙΔΙΑΝΑ	ΥΠΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ	196	13
18	9702	ΧΑΝΙΑ - ΜΑΙΧ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ ΜΑΙΧ	64	4

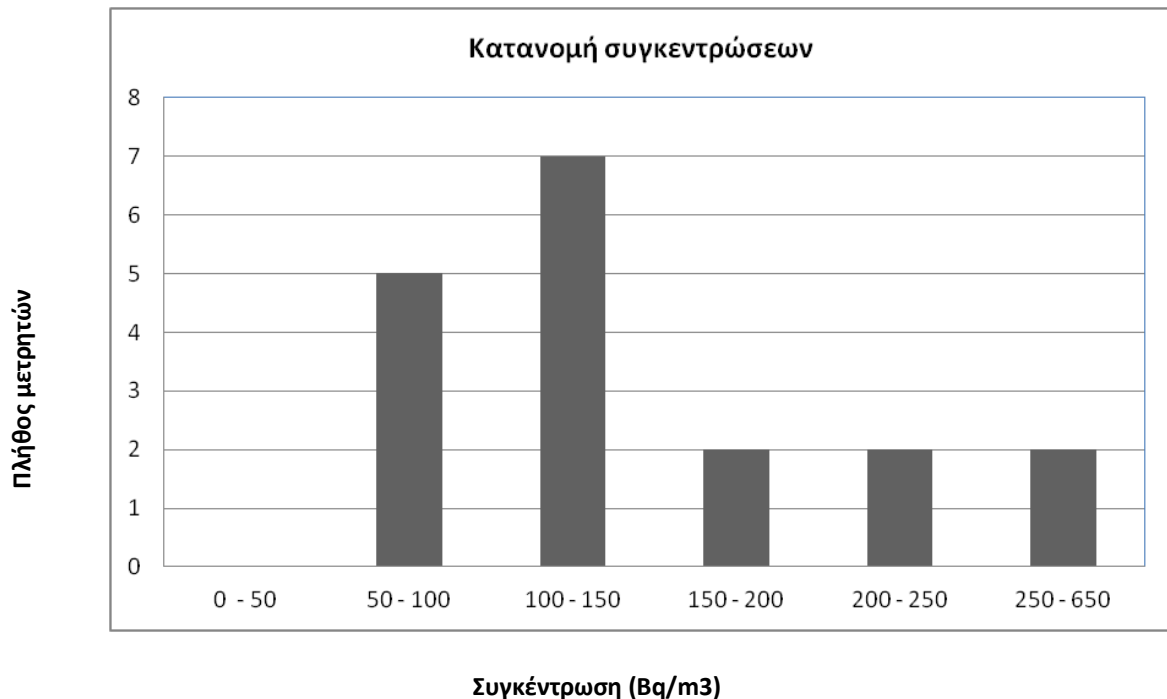
Από τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι οι συγκεντρώσεις ραδονίου στις υπό εξέταση περιοχές είναι ικανοποιητικές, με την πλειονηφία των μετρήσεων να είναι μικρότερες από το όριο επικινδυνότητας των 200 Bq/m³, εκτός από δύο μεγάλες μετρήσεις στον οικισμό **Μάζα Αποκορώνου (352 Bq/m³)** και στον οικισμό **Καλαμίτσι Αμυγδάλου (626 Bq/m³)**.

Η κατανομή συγκεντρώσεων γίνεται ως εξής:

Συγκέντρωση Bq/m ³		Πλήθος μετρητών	%
0	50	0	0
50	100	5	27.78%
100	150	7	38.89%
150	200	2	11.11%
200	650	4	22.22%

Αναλυτικότερα, από τις **18 μετρήσεις** που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψε **αριθμητικός μέσος (Α.Μ)** τα **170 Bq/m³**, τιμή αρκετά υψηλή, αλλά κάτω από το όριο των 200 Bq/m³. Παρόλα αυτά, μόλις **τέσσερις (4)** συνολικά ξεπέρασαν το όριο των 200 Bq/m³, δηλαδή ποσοστό **22 %**. Η πρώτη, στον οικισμό Φουνέ στον κάμπο των Χανίων, οριακά στα 207 Bq/m³, η δεύτερη στον οικισμό Νίππος Αποκορώνου, στα 242 Bq/m³, η τρίτη στον οικισμό **Μάζα Αποκορώνου** στα **352 Bq/m³** και η τέταρτη και πολύ μεγαλύτερη στον οικισμό

Καλαμίτσι Αμυγδάλου Αποκορώνου στα **626 Bq/m³**. Αντίθετα, η πλειοψηφία των μετρήσεων (**78%**) κυμάνθηκε σε φυσιολογικά επίπεδα μεταξύ 64 Bq/m³ και 196 Bq/m³, με την χαμηλότερη τιμή να καταγράφεται μέσα στην πόλη των Χανίων, στην περιοχή του Μ.Α.Ι.Χ σε ισόγειο χώρο γραφείου δίπλα στο σπήλαιο.



Για τον υπολογισμό της ενεργής δόσης σε mSv και την αξιολόγηση των μετρηθέντων τιμών με σκοπό την εκτίμηση της επικινδυνότητας στους χώρους αυτούς, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση:

$$E_{eff} \text{ (mSv/y)} = C * E * F * T * D_{cf} \quad (1)$$

όπου συμβολίζεται με **CRn** η τιμή συγκέντρωσης του ραδονίου (Bq/m³), **E** ο παράγοντας ισοδυναμίας (*Equilibrium factor*) μεταξύ του ραδονίου και των θυγατρικών του, **F** ο παράγοντας πληρότητας (*occupancy factor*), **T** ο συνολικός χρόνος έκθεσης στο συγκεκριμένο περιβάλλον ραδιενέργειας (h/y), **D_{cf}** ο παράγοντας μετατροπής της ενεργού δόσης (*dose conversion factor*) (Papachristodoulou et al., 2004). Ορίζοντας τον παράγοντα μετατροπής της ενεργής δόσης (**D_{cf}**) ίσο με 1.68ε-5 mSv / (Bq*h/m³) (ICRP 126,2018), τον παράγοντα πληρότητας **F** ίσο με 1 και τον παράγοντα ισοδυναμίας **E** ίσο με 0.4, μια τιμή που έχει χρησιμοποιηθεί συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία. Κάνοντας την παραδοχή ότι στους χώρους κατοικίας, στους χώρους αναψυχής (καφενεία, καφετέρια κλπ) και στους χώρους εργασίας, ως ημερήσιος χρόνος παραμονής είναι οι 10, 3, και 8 ώρες αντίστοιχα, για 365 μέρες, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω στον πίνακα 19, σε mSv/year.

Πίνακας 3 :Τιμές ενεργής δόσης ακτινοβολίας στους χώρους που έγιναν οι μετρήσεις σύμφωνα με την εξίσωση 1

Α/Α	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ-ΟΙΚΙΣΜΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΧΩΡΟΥ	Ώρες έκθεσης (h)	Συγκέντρωση ραδονίου Bq/m ³	Ενεργός δόση (mSv)
1	ΦΟΥΡΝΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΚΑΦΕΝΕΙΟ	1460	162	1.58
2	ΦΟΥΡΝΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	207	5.06
3	ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΚΑΦΕΝΕΙΟ	1460	124	1.21
4	ΜΑΖΑ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	352	8.61
5	ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΑΠΟΚΟΡΩΝΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	96	2.35
6	ΜΑΘΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	87	2.12
7	ΓΕΩΡΓΙΟΥΠΟΛΗ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	86	2.09
8	ΑΛΙΚΑΜΠΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	103	2.51
9	ΚΑΛΥΒΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	139	3.40
10	ΒΡΥΣΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	112	2.73
11	ΒΑΦΕΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	81	1.99
12	ΚΑΛΑΜΙΤΣΙ ΑΜΥΓΔΑΛΟΥ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	626	15.31
13	ΝΙΠΠΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	242	5.91
14	ΕΜΠΡΟΣΝΕΡΟΣ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	135	3.29
15	ΧΑΝΙΑ-ΚΕΝΤΡΟ	ΥΠΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ	2040	137	1.87
16	ΚΟΥΝΟΥΠΙΔΙΑΝΑ	ΙΣΟΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑ	3650	117	2.86
17	ΚΟΥΝΟΥΠΙΔΙΑΝΑ	ΥΠΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ	2040	196	2.68
18	ΧΑΝΙΑ - ΜΑΙΧ	ΙΣΟΓΕΙΟ ΓΡΑΦΕΙΟ ΜΑΙΧ	2040	64	0.88

Σύμφωνα με την I.C.R.P. και τη δημοσίευση 65 προτείνεται ως επιτρεπτό για την ετήσια ενεργή δόση τιμές που κυμαίνονται από 3-10 mSv. Οι κανονισμοί που αφορούν την προστασία από ραδιενεργή ακτινοβολία γίνονται συνεχώς πιο αυστηροί. Η I.C.R.P., το 1993, με σκοπό να μειώσει το βαθμό επικινδυνότητας από την έκθεση σε ραδιενεργή ακτινοβολία στο αέρα του εσωτερικού κτηρίων και εργασιακών χώρων πρότεινε όρια 200-600 Bq/m³ για κατοικίες και 500-1500 Bq/m³ για εργασιακούς χώρους, για τη συγκέντρωση ραδονίου. Το 2009, η WHO μείωσε ακόμα περισσότερο τα προτεινόμενα όρια στα 300 Bq/m³ για τις κατοικίες και τα 1000 Bq/m³ για εργασιακούς χώρους, τα οποία συνεχίζει να αναφέρει η I.C.R.P., το 2014 (ICRP 2014, Publication 126).

Πίνακας 4: Όρια ασφαλείας για την ακτινοβολία ραδονίου (I.C.R.P.,2014 και WHO,2009)

	Επίπεδο αναφοράς (Bq/m ³)	Ετήσια Ενεργή Δόση (mSv)
Κατοικίες	300	10
Χώροι εργασίας	1000	20

Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ως όριο για τη δόση που δέχεται το κοινό το 1 mSv ανά έτος, ενώ το όριο της ενεργού δόσης για επαγγελματική έκθεση μικρότερη των 6 mSv απαιτείται δοσιμετρία χώρου και συνεχής έλεγχος. Για δόση που κυμαίνεται μεταξύ των 6-20 mSv ανά

έτος σε επαγγελματικούς χώρους απαιτείται ατομική δοσιμετρία. Για περιπτώσεις που οι τιμές που ξεπερνούν τα 20 mSv θεωρούνται καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και απαιτείται αυστηρός σχεδιασμός και μέτρα προστασίας (Επ. εφημερίδα L13 Ε.Ε., 2014). Εκτιμώντας τα αποτελέσματα της ενεργού δόσης στους χώρους που τοποθετήθηκαν τα δοσίμετρα, διαπιστώνουμε ότι οι τιμές σε όλους τους χώρους είναι χαμηλότερες από το όριο ασφαλείας και δεν αποτελούν κίνδυνο για την υγεία των κατοίκων, εκτός από την τιμή 15,31(mSv)>10(mSv) στην περιοχή Καλαμίτσι Αμυγδαλού της επαρχίας Αποκόρωνα, όπου απαιτούνται μέτρα προστασίας για τους κατοίκους της οικείας αυτής.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

6.1 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

Το πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει ουσιαστικά μελέτες και εκτενή βιβλιογραφική αναφορά σε παρόμοιες μελέτες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο εξωτερικό αλλά και στον Ελλαδικό χώρο. Οι μελέτες αυτές που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2 είναι ποικίλου βεληνεκούς. Οι μεγάλες εθνικές επισκοπήσεις γίνονται συνήθως σε χώρες που τους απασχολεί το πρόβλημα ραδονίου λόγω υψηλών συγκεντρώσεων στο υπέδαφος ή λόγω των οικοδομικών υλικών που χρησιμοποιούν στην κατασκευή των χώρων διαμονής και εργασίας τους. Εκτός αυτών, μικρότερες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί με χρήση παθητικών ανιχνευτών σε επιμέρους περιοχές ή πόλεις για ερευνητικούς σκοπούς. Στην δική μας περίπτωση, η επιμέρους περιοχή μελέτης αφορά κυρίως την βορειοανατολική πλευρά του Ν.Χανίων (επαρχία Αποκόρωνα Χανίων). **Το δεύτερο μέρος** της εργασίας περιελάμβανε έκθεση σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών ή/και δημόσιων κτηρίων σε διάφορες περιοχές της Ανατολικής (πεδινής) περιοχής του Νομού Χανίων. Οι χώροι ήταν κυρίως ισόγειες οικίες και τα δοσίμετρα τοποθετήθηκαν σε σημεία όπου περνάνε οι κάτοικοι περισσότερο χρόνο. Η επιλογή τοποθέτησης των σημείων εσωτερικά των χώρων που εκτέθηκαν οι ανιχνευτές ήταν η κατάλληλη λόγω της διαφορετικότητας των συνθηκών εξαερισμού, θερμοκρασίας και υγρασίας. Τα αποτελέσματα γενικά έδειξαν φυσιολογικές τιμές συγκέντρωσης ραδονίου, πιο χαμηλές από το όριο επικινδυνότητας των 200 Bq/m³. Εξαίρεση αποτέλεσαν δύο μετρήσεις, η πρώτη σε μία ισόγεια κατοικία στην οποία ανιχνεύτηκε μέση τιμή συγκέντρωσης 626 Bq/m³, τιμή πολύ μεγαλύτερη από το όριο επικινδυνότητας, και η δεύτερη σε ισόγεια κατοικία με τιμή συγκέντρωσης 352 Bq/m³. Όσο αφορά την εκτίμηση κινδύνου μέσω των αποτελεσμάτων της ενεργού δόσης στους χώρους που τοποθετήθηκαν τα δοσίμετρα, διαπιστώνουμε ότι οι τιμές σε όλους τους χώρους είναι χαμηλότερες από το όριο ασφαλείας και δεν αποτελούν κίνδυνο για την υγεία των κατοίκων, εκτός από την τιμή 15,31(mSv)>10(mSv) στην περιοχή Καλαμίτσι Αμυγδαλού της επαρχίας Αποκόρωνα, όπου απαιτούνται μέτρα προστασίας για τους κατοίκους της οικίας αυτής.

Βέβαια επειδή η τιμή αυτή ιδιαίτερα υψηλή θα αποτελούσε ενδιαφέρον η περαιτέρω έρευνα για τα αίτια εμφάνισης τέτοιας υψηλής συγκέντρωσης στο χώρο. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι επιβεβαιώνεται η αυξημένη συγκέντρωση ραδονίου στην περιοχή γύρω από το χωριό Βρύσες, πράγμα που είχε εντοπιστεί και από την εργασία του κ.Νικολόπουλου (2000 και

2002) , πράγμα που σημαίνει ότι έχει σχέση με το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής και την ενδεχόμενη επιπρόσθετη παρουσία ραδιενεργών. Με εξαίρεση αυτό το σημείο τα αποτελέσματα έδειξαν με χρήση στατιστικού τεστ ότι η συγκέντρωση ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή σε σχέση με το πλήθος των ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκαν.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Τα αποτελέσματα από τις εκθέσεις και τις μετρήσεις από την παρούσα εργασία έχουν την προοπτική να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Βέβαια μία επιπλέον μέτρηση με δεύτερη μέθοδο χωρίς την χρήση των παραπάνω παθητικών ανιχνευτών θα ήταν πολύ χρήσιμη για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αξιοπιστία των μετρήσεων (χρήση ενεργητικών ανιχνευτών – σύγκριση αποτελεσμάτων ενεργητικών-παθητικών) . Σχετικά με την περίπτωση έκθεσης σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών προτείνεται μία διάρκεια έκθεσης με CR-39 τουλάχιστον εξαμηνιαία – ένα τρίμηνο καλοκαίρι, ένα τρίμηνο χειμώνα. Επιπρόσθετα πρέπει να υπάρχει μεγάλο πλήθος δειγματοληψίας από διαφορετικές περιοχές ανάλογα βέβαια το είδος και τον σκοπό της έρευνας, ώστε να προκύπτουν καλύτερα στατιστικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις. Επιπλέον χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο αριθμό δοσιμέτρων σημεία που μπορούν να ερευνηθούν είναι η εξάρτηση της συγκέντρωσης ραδονίου από τις παραμέτρους έτους κατασκευής κατοικίας, είδος κατοικίας και γεωγραφική τοποθεσία έκθεσης. **Αντικείμενο μελλοντικής έρευνας** μπορεί να αποτελέσει μια ενδεδειγμένη μελέτη σε σημεία που παρουσιάστηκαν πολύ υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου από την μέση τιμή των λοιπών μετρήσεων, όπως το **Καλαμίτσι Αμυγδάλου** και η **Μάζα Αποκορώνου**. Μπορεί έτσι να διαπιστωθεί αν τα αίτια αυτής της απόκλισης των τιμών οφείλονται σε αστοχία μέτρησης, σε άλλο εξωτερικό παράγοντα ή αν τελικά η μέτρηση είναι αληθής και αξιόπιστη.

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία - Αναφορές

Ξενόγλωσση Αρθρογραφία

Ahmed, J.U. (1994). Radon in the human environment: Assessing the picture. *IAEA Bulletin*, 36 (2): 32-35.

Alavanja, M.C.R., Brownson, R.C., Lubin, J.H., Berger, E., Chang, J., Boice, J.D. Jr. (1994). Residential Radon Exposure and Lung Cancer Among Nonsmoking Women. *Journal of the National Cancer Institute*, 86 (24): 1829-1837.

Al-Jarallah, M.I., Fazal-ur-Rehman, Abdalla, K. (2008). Comparative study of short- and long-term indoor radon measurements. *Radiation Measurements*, 43: S471-S474.

Al-Khateeb, H.M., Aljarrah, K.M., Alzoubi, F.Y., Alqadi, M.K., Ahmad, A.A. (2017). The correlation between indoor and in soil radon concentrations in a desert climate. *Radiation Physics and Chemistry*, 130: 142-147.

Allen, M.D. and Raabe, O.G. (1985). Slip Correction Measurements of Spherical Solid Aerosol Particles in an Improved Millikan Apparatus. *Aerosol Science and Technology*, 4: 269-286.

Auvinen, A., Mäkeläinen, I., Hakama, M., Castrén, O., Pukkala, E., Reisbacka, H., Rytömaa, T. (1996). Indoor Radon Exposure and Risk of Lung Cancer: a Nested Case-Control Study in Finland. *Journal of the National Cancer Institute*, 88 (14): 966-972.

Bohicchio, F., McLaughlin, J.P., Walsh, C. (2003). Comparison of radon exposure assessment results: ^{210}Po surface activity on glass objects vs. contemporary air radon concentration. *Radiation Measurements*, 36: 211-215.

Bossey, P. and Lettner, H. (2007). Investigations on indoor radon in Austria, Part 1: Seasonality of indoor radon concentration. *Journal of Environmental Radioactivity*, 98: 329-345.

Burke, Ó. and Murphy, P. (2011). Regional variation of seasonal correction factors for indoor radon levels. *Radiation Measurements*, 46: 1168-1172.

Cartwright, B.G., Shirk, E.K., Price, P.B. (1978). A nuclear-track-recording polymer of unique sensitivity and resolution. *Nuclear Instruments and Methods*, 153: 457-460.

- Cassou, R.M. and Benton, E.V. (1978). Properties and applications of CR-39 polymeric nuclear track detector. *Nucl. Track Detection*, 2: 173-179.
- Cheng, Y.-S., Allen M.D., Gallegos, D.P., Yeh, H.-C. and Peterson, K. (1988). Drag Force and Slip Correction of Aggregate Aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 8: 199-214.
- Cohen, B.L. (1990). A Test of the Linear-No Threshold Theory of Radiation Carcinogenesis. *Environmental Research*, 53: 193-220.
- Collignan, B., Le Ponner, E., Mandin, C. (2016). Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics. *Journal of Environmental Radioactivity*, 165: 124-130.
- De Francesco, S., Tommasone, F.P., Cuoco, E., Tedesco, D. (2010). Indoor radon seasonal variability at different floors of buildings. *Radiation Measurements*, 45: 928-934.
- Dornsiepen, U.F & Manutsoglu E. (1994). Zur Gliederung der Phyllit-Decke Kretas und des Peloponnes. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 145: 286-304.
- Dubois, G., Bossew, P., Tollefsen, T., De Cort, M. (2010). First steps towards a European atlas of natural radiation: status of the European indoor radon map. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101: 786-798.
- Eatough, J.P. and Henshaw, D.L. (1993). Radon and monocytic leukaemia in England. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 47: 506-507.
- Gillmore, G.K., Phillips, P.S., Denman, A.R. (2005). The effects of geology and the impact of seasonal correction factors on indoor radon levels: a case study approach. *Journal of Environmental Radioactivity*, 84: 469-479.
- Groves-Kirkby, C.J., Denman, A.R., Phillips, P.S., Crockett, R.G.M., Woolridge, A.C., Tornberg, R. (2006). Radon mitigation in domestic properties and its health implications—a comparison between during-construction and post-construction radon reduction. *Environment International*, 32: 435-443.
- Jostes, R.F. (1996). Genetic, cytogenetic, and carcinogenic effects of radon: a review. *Mutation Research*, 340: 125-139.
- Knutson, E.O., George, A.C. and Tu, K.W. (1997). The Graded Screen Technique for Measuring the Diffusion Coefficient of Radon Decay Products. *Aerosol Science and Technology*, 27: 604-624.

- Kurttio, P., Salonen, L., Ilus, T., Pekkanen, J., Pukkala, E., Auvinen, A. (2006). Well water radioactivity and risk of cancers of the urinary organs. *Environm. Research*, 102: 333-338.
- Malet, J., Michielsen, N., Boulaud, D. and Renoux, A. (2000). Mass Transfer of Diffusive Species with Nonconstant In-Flight Formation and Removal in Laminar Tube Flow: Application to Unattached Short-Lived Radon Daughters. *Aerosol Science and Technology*, 32: 168-183.
- Manutsoglu et al (1995)
- Mifune, M., Sobue, T., Arimoto, H., Komoto, Y., Kondo, S., Tanooka, H. (1992). Cancer Mortality Survey in a Spa Area (Misasa, Japan) with a High Radon Background. *Japanese Journal of Cancer Research*, 83: 1-5.
- Mostafa, A.M.A., Yamazawa, H., Uosif, M.A.M., Moriizumi, J. (2015). Seasonal behavior of radon decay products in indoor air and resulting radiation dose to human respiratory tract. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8: 142-147.
- Nikolopoulos, D., Louizi, A., Koukouliou, V., Serefoglou, A., Georgiou, E., Ntalles, K., Proukakis, C. (2002). Radon survey in Greece–risk assessment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 63: 173-186.
- Papaefthymiou, H., Mavroudis, A., Kritidis, P. (2003). Indoor radon levels and influencing factors in houses of Patras, Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, 66: 247-260.
- Papastefanou, C. and Stoulos, S. (1994). Indoor radon progeny measurements in an urban polluted area. *The Science of the Total Environment*, 144: 117-120.
- Pershagen, G., Åkerblom, G., Axelson, O., Clavensjö, B., Damberg, L., Desai, G., Enflo, A., Lagarde, F., Mellander, H., Svartengren, M., Swedjemarm, G.A. (1994). Residential radon exposure and lung cancer in Sweden. *The New England Journal of Medicine*, 330 (3): 159-164.
- Rahman, S.U., Anwar, J., Matiullah (2008). Measurement of indoor radon concentration levels in Islamabad, Pakistan. *Radiation Measurements*, 43: S401-S404.
- Riley, W.J., Gadgil, A.J., Bonnefous, Y.C., Nazaroff, W.W. (1996). The effect of steady winds on Radon-222 entry from soil into houses. *Atmospheric Environment*, 30 (7): 1167-1176.

- Stephan, G., Oestreicher, U., Lehmann, R. (2005). Chromosome aberrations in peripheral lymphocytes of individuals living in dwellings with an increased level of indoor radon concentrations. *International Congress Series*, 1276: 29-32.
- Stojanovska, Z., Januseski, J., Bossew, P., Zunic, Z.S., Tollefsen, T., Ristova, M. (2011). Seasonal indoor radon concentration in FYR of Macedonia. *Radiation Measurements*, 46: 602-610.
- Swedjemark, G.A., Wahren, H., Mäkitalo, A., Tell, W. (1989). Experience from indoor radon-daughter limitation schemes in Sweden. *Environment International*, 15: 253-260.
- Tanner, A.B. (1980). Radon Migration in the Ground: A Supplementary Review. *Proceedings of the 3rd Natural Radiation Environment International Symposium*, 1, April 23-28, 1978, Houston, TX, USA, pp. 5-56.
- Tollefsen, T., Cinelli, G., Bossew, P., Gruber, V., De Cort, M. (2014). From the European Indoor Radon Map towards an Atlas of Natural Radiation. *Radiation Protection Dosimetry*, 162 (1-2): 129-134.
- Tymen, G., Kerouanton, D., Huet, C. and Boulaud D. (1999). An Annular Diffusion Channel Equipped with a Track Detector Film for Long-Term Measurements of Activity Concentration and Size Distribution of Nanometer ²¹⁸Po Particles. *J. Aerosol Sci.*, 30 (2): 205-216.
- Vázquez-López, C., Fragoso, R., Golzarri, J.I., Castillo-Mejía, F., Fujii, M., Espinosa, G. (2001). The atomic force microscope as a fine tool for nuclear track studies. *Radiation Measurements*, 34: 189-191.
- Wichmann, H.E., Schaffrath Rosario, A., Heid, I.M., Kreuzer, M., Heinrich, J., Kreienbrock, L. (2005). Increased lung cancer risk due to residential radon in a pooled and extended analysis of studies in Germany. *Health Physics*, 88 (1): 71-79.
- Žunić, Z.S., Yarmosenko, I.V., Kelleher, K., Paridaens, J., Mc Laughlin, J.P., Čeliković, I., Ujić, P., Onischenko, A.D., Jovanović, S., Demajo, A., Birovljev, A., Bochicchio, F. (2007). Comparison of retrospective and contemporary indoor radon measurements in a high-radon area of Serbia. *Science of the Total Environment*, 387: 269-275.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Åkerblom, G. (1999). *Radon Legislation and National Guidelines*, SSI Report no. 99:18, Swedish Radiation Protection Institute, Sweden.

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

Bohicchio, F., McLaughling, J.P., Piermattei, S. (1995). *Radon in indoor air*, Report No 15 EUR 16123EN, Luxembourg: Commission of the European Communities.

EC (1990). *Commission Recommendation of 21st February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon*, 90/143/Euratom, Official Journal of the European Communities, L80: 26-28. Διαθέσιμο διαδικτυακά στη διεύθυνση:

<https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/260b2024-21d9-4de5-ae3f-d7867a15d221>

EC (2001). *Commission Recommendation of 20th December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies*, 2001/928/Euratom, Official Journal of the European Communities, L344: 85-88. Διαθέσιμο διαδικτυακά στη διεύθυνση:

http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2001.344.01.0085.01.ENG

EnVIE (2007). *Co-ordination Action on Indoor Air Quality and Health Effects*, Proceedings of the First EnVIE Conference on Indoor Air Quality and Health for EU Policy, 12-13 June 2007, Helsinki, Finland. Διαθέσιμο διαδικτυακά στη διεύθυνση:

https://paginas.fe.up.pt/~envie/documents/EnVIE_conf_proceedings_30-08-2007.pdf

ERRICCA2 (2005). *An Evaluation of Radon Reference Levels and Radon Measurement Techniques and Protocols in European Countries*, European Radon Research and Industry Collaboration Concerted Action, European Commission Contract No: FIRI-CT-2001-20142, Radiological Protection Institute of Ireland. Διαθέσιμο διαδικτυακά στη διεύθυνση:

https://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII_ERRICA_Measure_Report_05.pdf

EU (2013). *Council Directive of 5th December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom*, 2013/59/Euratom, Official Journal of the European Union, L13: 1-73.

Διαθέσιμο διαδικτυακά στη διεύθυνση:

<https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/CELEX-32013L0059-EN-TXT.pdf>

IAEA (2003). *Radiation Protection against Radon in Workplaces other than Mines*, International Atomic Energy Agency, Safety Report Series No. 33, Vienna, Austria.

IAEA (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*, International Atomic Energy Agency, General Safety Requirements Part 3, Vienna, Austria.

ICRP65 (1993). *Protection Against Radon-222 at Home and at Work*, ICRP Publication 65, Ann. ICRP 23(2), Pergamon, Oxford.

ICRP126 (2014). *Radiological Protection against Radon Exposure*, ICRP Publication 126, Ann. ICRP 43 (3), SAGE Publications Ltd, UK.

UNSCEAR (1988). *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with annexes, United Nations, New York.

UNSCEAR (1993). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, United Nations, New York.

UNSCEAR (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, Volume I: Sources, United Nations, New York.

WHO (2007). *International Radon Project: Survey on Radon Guidelines, Programmes and Activities*, World Health Organization, Final Report, Document Production Services, Geneva, Switzerland. Διαθέσιμο διαδικτυακά στη διεύθυνση:

http://www.who.int/ionizing_radiation/env/radon/IRP_Survey_on_Radon.pdf

WHO (2009). *Handbook on indoor radon: A public health perspective*, World Health Organization, Geneva, Switzerland. Διαθέσιμο διαδικτυακά στη διεύθυνση:

http://www.who.int/ionizing_radiation/env/9789241547673/en/

Ελληνική Βιβλιογραφία

ADT-Ωμέγα ATE – Θαλής μελετητική ΕΕ - Α. Περδίου -Π.Τσίτουρα - Ι. Αγγελίδης - Ε. Μιχαηλίδου - Κ. Χατζηπαρασκευάς. (2017) κατάρτιση σχεδίου διαχείρισης κινδύνων

πλημμύρας λεκανών απορροής ποταμών του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης – Φαση II-Στάδιο II

Βογιάννης Ε.Γ. (2005). *Το ραδόνιο στα ιαματικά λουτρά*, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σχολή Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη.

Καράγγελος Δ.Ι. (2008). *Ραδιοπεριβαλλοντική και συνακόλουθες εφαρμογές*, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα.

Καραγεωργίου Ε.Δ. (1971). *Βασικός γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος*, κλίμακας 1:50.000, φύλλο Χανιά, ΙΓΕΥ, Αθήνα.

Κοντάκου Π. (2011). *Ανάπτυξη Μεθόδου Ανίχνευσης Ραδονίου με χρήση Παθητικών Ανιχνευτών*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μπορνόβας, Ι. et al. (1983). *Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας*, κλίμακα 1:500.000. Έκδοση ΙΓΜΕ. Αθήνα.

Νικολόπουλος Δ.Ν. (2000). *Μελέτη της Έκθεσης του Ελληνικού Πληθυσμού στο Ραδόνιο-222*, Διδακτορική Διατριβή, Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, Πανεπιστημίου Αθηνών.

Νικολόπουλος Δ., Κόττου Σ., Γιαννακόπουλος Π. (2015). *Ακτινοβολίες περιβάλλοντος και άνθρωπος*, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Ζωγράφου, Αθήνα.

Οικονομόπουλος Ε. (2008). *Μελέτη των περιβαλλοντικών συνθηκών έκλυσης του χημικού στοιχείου ^{222}Rn και η πιθανή συσχέτισή της με τη σεισμικότητα της περιοχής Μεγάρων*, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Πάτρα.

Παπαδάκος Γ., Γκαβέλα Σ., Κώνστας Χ., Ρούνη Π., Βραχόπουλος Μ. (2010). Σημειώσεις για το σεμινάριο: *Τεχνικές Μετρήσεων & Όργανα για την Ενεργειακή Επιθεώρηση στα Κτήρια και στη Βιομηχανία (Κωδ. ΕΝΕΡ7)*, ΙΕΚΕΜ ΤΕΕ, Αθήνα.

Πατήρης Δ.Α. (2009). *Μελέτη της συμπεριφοράς των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα*, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Σχολή Θετικών Επιστημών.

Σεμερτζίδου Π. (2013). *Διασπορά ραδιενεργών ρύπων στην ατμόσφαιρα μετά το πυρηνικό ατύχημα στην Fukushima*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Θεσσαλονίκη.

Σεφτελής Ι.Β. (2007). *Μεταβολές της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στον υπαίθριο επιφανειακό αέρα*, Διδακτορική Διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Ξάνθη.

Στούλος Σ. (1998). *Το ραδόνιο στις κατοικίες σαν συνάρτηση της ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών και άλλων φυσικών παραμέτρων*, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών.

Τσουκαλά Δ. (2013). *Μετρήσεις ραδονίου και αξιολόγηση αποτελεσμάτων σε σπήλαια και ζώνες ρηγμάτων στην Κρήτη*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Ορυκτών Πόρων

ΦΕΚ 216B, 6/3/2001. *Κανονισμός Ακτινοπροστασίας*, διαθέσιμος διαδικτυακά στη διεύθυνση: http://www.elinyae.gr/el/lib_file_upload/b216_01.1127808638026.pdf, (Τελευταία επίσκεψη 10-08-2017).

ΦΕΚ 194^Α/20-11-2018. *«Προσαρμογή της ελληνικής νομοθεσίας στην Οδηγία 2013/59/Ευρατόμ του Συμβουλίου, της 5ης Δεκεμβρίου 2013, για τον καθορισμό βασικών προτύπων ασφάλειας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες»*

Ιστοσελίδες

- ❖ <https://eeae.gr/χάρτης-ραδονίου>, (Τελευταία επίσκεψη 14-12-2017).
- ❖ <http://evgpot.weebly.com/piepsilon943rhoalphamualpha-1.html>, (Τελευταία επίσκεψη 22-09-2017).
- ❖ <http://www.keelpno.gr/Portals/0/Αρχεία/ΚΕΠΠΧ/Ραδόνιο.pdf>, (Τελευταία επίσκεψη 23-08-2017).
- ❖ <http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/Decay%20Chains.html>, (Τελευταία επίσκεψη 11-08-2017).
- ❖ https://www.researchgate.net/figure/239815223_fig1_Figure-1-Photograph-showing-two-activated-charcoal-canisters-The-opened-canister-shows, (Τελευταία επίσκεψη 22-09-2017).