



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Δ.Π.Μ.Σ Φυσική & Τεχνολογικές Εφαρμογές
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ
ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ**

ΛΕΥΤΕΡΗΣ Ε. ΕΛΜΑΛΗΣ

Επίβλεψη : Αναπλ. Καθηγητής Ε.Π.Χίνης

Συνεργασία : Δρ. Δ.Ι.Καράγγελος

ΑΘΗΝΑ 2011

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στην εργασία περιγράφεται η μέθοδος προσδιορισμού της τιμής της συγκέντρωσης του ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, καθώς και η εφαρμογή της με χρήση παθητικών ανιχνευτών σε κατοικίες στην περιοχή της Αττικής. Επίσης αναλύονται ολοκληρωμένα οι διαδικασίες για ορθή χρήση και έκθεση των ανιχνευτών, οι πειραματικές διαδικασίες και τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των εκθέσεων των ανιχνευτών. Στα πλαίσια της μελέτης πραγματοποιούνται συγκρίσεις με στατιστικά τεστ, και εξάγονται κάποια αποτελέσματα τα οποία μπορεί να αποτελέσουν αντικείμενο έρευνας για μελλοντικούς πειραματιστές.

Για την ολοκλήρωση της εργασίας έλαβα σημαντικότερη βοήθεια και νοιώθω την ανάγκη να εκφράσω τις ευχαριστίες μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας μου Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Ευάγγελο Π. Χίνη, 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.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. κ. Δημήτριο Ι. Καράγγελο για την σημαντικότερη συμβολή του στην επίτευξη της εργασίας με τη σωστή καθοδήγηση σε κάθε φάση της εργασίας και την προσφορά αμέριστης βοήθειας για να επιλυθούν τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μ.Ι.Αναγνωστάκη για την δική του πολύτιμη βοήθεια και στήριξη σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης τον Λέκτορα κ. Ν.Π.Πετρόπουλο για τη συμβουλευτική του βοήθεια σε θέματα θεωρίας αλλά και τεχνικών θεμάτων, απαραίτητα για την διεξαγωγή των πειραματικών διαδικασιών της εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά όλα τα μέλη του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας για την συμμετοχή τους με την τοποθέτηση των ανιχνευτών στις κατοικίες.

Ευχαριστώ επίσης την Φυσικό κ. Π.Κοντάκου για την συνεργασία μας στη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Τέλος ευχαριστώ από καρδιάς την οικογένειά μου για την συμπαράστασή τους συναισθηματικά, ηθικά και οικονομικά. Το αδερφό μου ως πηγή έμπνευσης. Ιδιαίτερα όμως την μητέρα μου που με ανέθρεψε με λακωνική αγωγή και τον πατέρα μου που μου έδωσε κίνητρο για να ανακαλύψω τη Γνώση.

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	6
2	Το Ραδόνιο	8
2.1	Έκθεση του ανθρώπου σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες	8
2.1.1	Φυσικές πηγές ιοντίζουσών ακτινοβολιών	8
2.1.2	Τεχνητές πηγές ιοντίζουσών ακτινοβολιών.....	9
2.1.3	Εξωτερική έκθεση	11
2.1.4	Εσωτερική έκθεση.....	12
2.2	Το ραδόνιο - ιδιότητες και χαρακτηριστικά	14
2.3	Διάχυση ραδονίου και θυγατρικών.....	15
2.3.1	Έδαφος της γης	16
2.3.2	Υδατα	17
2.3.3	Ατμοσφαιρικός αέρας.....	17
2.3.4	Οικοδομικά υλικά	18
2.4	Μηχανισμοί συγκέντρωσης ραδονίου και θυγατρικών στο εσωτερικό χώρων.....	20
2.4.1	Συγκέντρωση ραδονίου.....	20
2.4.2	Συγκέντρωση θυγατρικών	23
2.5	Επιπτώσεις στον άνθρωπο από την έκθεση σε ραδόνιο και διεθνείς επιτροπές ελέγχου	26
2.5.1	Επιπτώσεις από την έκθεση στο ραδόνιο και τα θυγατρικά του....	26
2.5.2	Διεθνείς επιτροπές ελέγχου της έκθεσης στο ραδόνιο και στα θυγατρικά του σε εσωτερικούς χώρους	29
2.6	Τεχνικές μέτρησης της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του.....	31
2.6.1	Τεχνικές μέτρησης με τη χρήση παθητικών ανιχνευτών	32
2.6.2	Τεχνικές μέτρησης με τη χρήση ενεργητικών ανιχνευτών.....	35
3	Επισκοπήσεις και μελέτες σε εσωτερικούς χώρους.....	37
3.1	Μελέτες με χρήση παθητικών ανιχνευτών CR-39	39
3.1.1	Επισκόπηση στην Ελλάδα.....	39
3.1.2	Τεχνική αναφορά για τη Μεγαλόπολη, Ελλάδα	40
3.1.3	Διακρατική συνεργασία για εθνική επισκόπηση της Σερβίας.....	41
3.1.4	Μελέτη σε διάφορες πόλεις της Σερβίας	42
3.1.5	Μελέτη σε περιοχές στη Σλοβενία (M. Humar 1992)	42
3.1.6	Μελέτη σε περιοχές στην Δανία (B. Majborn 1986).....	43
3.1.7	Εθνική επισκόπηση της Βόρειας Ιρλανδίας	44
3.1.8	Εθνική επισκόπηση του Ηνωμένου Βασιλείου	45
3.1.9	Μελέτη στην περιοχή της Σαξονίας στην Αγγλία	45
3.1.10	Μελέτη στην πολιτεία Μισσούρι στις Η.Π.Α.....	46
3.1.11	Μελέτη σε περιοχές στο Μπαγκλαντές.....	47
3.1.12	Μελέτη σε περιοχές στο Πακιστάν.....	47
3.2	Μελέτες με τη χρήση άλλων ανιχνευτών	48

3.2.1	Μελέτη σε κατοικίες στην Πάτρα	48
3.2.2	Μελέτη σε δημοτικά σχολεία στην Πάτρα	49
3.2.3	Μελέτη σε εργασιακούς χώρους στα Ιωάννινα	49
3.2.4	Εθνική επισκόπηση στην Ιταλία	50
4	Έκθεση των ανιχνευτών και μεθοδολογία	51
4.1	Γενικά	51
4.2	Ο σχεδιασμός συνοπτικά	52
4.3	Γιατί χρήση παθητικών ανιχνευτών.....	55
4.4	Γιατί η επιλογή των ανιχνευτών CR-39.....	56
4.5	Διαδικασίες πριν την έκθεση των ανιχνευτών.....	57
4.5.1	Κατασκευή Holder	57
4.5.2	Ασφάλεια, αποθήκευση και διαχείριση των ανιχνευτών	60
4.5.3	Η προετοιμασία των CR-39 πριν την έκθεση	65
4.6	Η έκθεση των ανιχνευτικών διατάξεων σε εσωτερικούς χώρους.....	67
4.6.1	Δοκιμαστική έκθεση στο κτίριο Κ του Ε.Μ.Π.	67
4.6.2	Οι ανιχνευτικές διατάξεις ALPHA-GUARD	71
4.6.3	Έκθεση στο εσωτερικό κατοικιών	73
5	Βασικές πειραματικές διαδικασίες πριν και μετά την έκθεση των ανιχνευτών	81
5.1	Η βαθμονόμηση των ανιχνευτών.....	81
5.2	Η διαδικασία χημικής διάβρωσης – etching	84
5.2.1	Πειράματα χημικής επεξεργασίας	86
5.3	Η διαδικασία της καταμέτρησης των ιχνών α-ακτινοβολίας	88
5.3.1	Πειραματικές διατάξεις.....	88
5.3.2	Τυποποίηση της μεθόδου.....	90
5.3.3	Παράδειγμα μετατροπής πυκνότητας ιχνών σε ραδιενέργεια.....	93
5.3.4	Μέτρηση υποβάθρου	94
6	Ανάλυση των αποτελεσμάτων της έκθεσης.....	95
6.1	Αποτελέσματα προσδιορισμού του υποβάθρου	96
6.2	Αποτελέσματα μετρήσεων στο κτίριο Κ.....	97
6.2.1	Στατιστικό t-test	101
6.2.2	Σχολιασμός αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις στο κτίριο Κ	102
6.3	Αποτελέσματα των μετρήσεων στις κατοικίες	103
6.3.1	Στατιστικό t-test για ανίχνευση ή μη ανίχνευση στις κατοικίες	105
6.3.2	Στατιστικά στοιχεία από την δειγματοληψία	106
6.3.3	Στατιστικό t-test στις συγκεντρώσεις υπογείων-ισογείων με τους ορόφους	106
6.3.4	Στατιστικό t-test δείγματος – αντιδείγματος.....	109
6.3.5	Στατιστικό χ^2 -test ελέγχου προσαρμογής δείγματος σε κατανομή	110
6.3.6	Σχολιασμός αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις στις κατοικίες	114
7	Επίλογος.....	115
7.1	Περίληψη.....	115
7.2	Μελλοντικές μελέτες	116

1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της τιμής της συγκέντρωσης του ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους με χρήση παθητικών ανιχνευτών.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφεται το πρόβλημα από την συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών του. Γίνεται αναφορά για το τι είναι εξωτερική και εσωτερική ακτινοβολία και πως εκτίθεται ο άνθρωπος. Επιπλέον αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του ραδονίου ως στοιχείο, η παραγωγή και διάχυσή του με τα θυγατρικά του, καθώς επίσης και οι μηχανισμοί συγκέντρωσής του σε εσωτερικούς χώρους. Τέλος γίνεται αναφορά σε διεθνείς και εθνικούς οργανισμούς που έχουν συσταθεί και μέσα στα γενικά θέματα περί ακτινοβολιών ασχολούνται με το πρόβλημα της συγκέντρωσης του ραδονίου.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται εκτενής βιβλιογραφική αναφορά σε μελέτες προσδιορισμού της συγκέντρωσης του ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Αυτές οι μελέτες πραγματοποιήθηκαν σε διακρατικό ή εθνικό επίπεδο από πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα ή κρατικούς οργανισμούς. Οι περισσότερες μελέτες πραγματοποιήθηκαν με χρήση παθητικών ανιχνευτών αλλά γίνεται αναφορά και σε μελέτες με χρήση ενεργητικού τύπου ανιχνευτικές διατάξεις.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία προετοιμασίας και έκθεσης των ανιχνευτικών δοσιμέτρων. Γίνεται εκτενής αναφορά στους παθητικούς ανιχνευτές ραδονίου CR-39 οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή της παρούσας μελέτης. Σε πρώτη φάση εκτέθησαν και μετρήθηκαν ανιχνευτές που τοποθετήθηκαν στο κτίριο Κ του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π. των οποίων οι τιμές συγκρίθηκαν με μετρήσεις από ενεργητικούς ανιχνευτές. Σε δεύτερη φάση οι παθητικοί ανιχνευτές εκτέθησαν σε εσωτερικούς χώρους σε κατοικίες.

Στο 5^ο κεφάλαιο αναλύονται όλες οι πειραματικές διαδικασίες που χρειάζονται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων από την χρήση των παθητικών ανιχνευτών. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στην βαθμονόμηση των ανιχνευτών, στο προσδιορισμό του υποβάθρου, την διαδικασία χημικής διάβρωσης των ανιχνευτών και στην ανάγνωση των ιχνών από α-σωματίδια στην επιφάνεια των ανιχνευτών.

Στο 6^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση των αποτελεσμάτων από την έκθεση των ανιχνευτών στο κτίριο Κ και στις κατοικίες. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει συγκριτικά στατιστικά τεστ μεταξύ τιμών ενδιαφέροντος και συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο επίλογος, οι βιβλιογραφικές αναφορές και το παράρτημα.

2 Το Ραδόνιο

2.1 Έκθεση του ανθρώπου σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες

Είναι γνωστό πως ο άνθρωπος όπως και κάθε έμβιος οργανισμός δέχεται ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Άλλωστε τα πάντα, η γη, ο αέρας, η χλωρίδα, η πανίδα περιέχουν ραδιενέργεια που οφείλεται σε φυσικές ή και σε ανθρωπογενείς πηγές (R.L.Kathren 1984).

Ο άνθρωπος από την αρχή της καταγραφής της ιστορίας μέχρι σχετικά πρόσφατα αγνοούσε την ύπαρξη αυτών των ακτινοβολιών και των επιδράσεών τους. Η αρχή έγινε με την ανακάλυψη των ακτίνων Χ από τον Γερμανό φυσικό Wilhelm Röntgen το 1895 ενώ το φαινόμενο της ραδιενεργούς διάσπασης παρατηρήθηκε πρώτα από τον Γάλλο φυσικό Henri Becquerel. Στη συνέχεια στις αρχές του 20^{ου} αιώνα έγιναν οι μεγαλύτερες έρευνες που έχουν οδηγήσει στη σημερινή γνώση για την ραδιενέργεια.

Σήμερα ο άνθρωπος δέχεται ακτινοβολία από ένα μεγάλο σύνολο φυσικών και τεχνητών πηγών που βρίσκονται διεσπαρμένες στο περιβάλλον του. Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες ανάλογα με την πηγή από την οποία εκπέμπονται διακρίνονται σε φυσικές και σε τεχνητές ακτινοβολίες.

2.1.1 Φυσικές πηγές ιοντίζουσών ακτινοβολιών

Φυσικές πηγές ιοντίζουσών ακτινοβολιών είναι γενικά το γήινο και το κοσμικό περιβάλλον στο σύνολό τους. Στο κοσμικό περιβάλλον εκπέμπεται και απορροφάται αέναα ακτινοβολία από τα ουράνια σώματα στα οποία πραγματοποιούνται θερμοπυρηνικές αντιδράσεις. Η κοσμική ακτινοβολία ανάλογα με το είδος των σωματιδίων διακρίνεται σε φωτονιακή και σωματιδιακή. Η φωτονιακή αποτελείται από φωτόνια διαφόρων ενεργειών ενώ η σωματιδιακή από φορτισμένα σωματίδια διαφόρων ενεργειών (ακτινοβολία παγιδευμένων

σωματιδίων, γαλαξιακή, ηλιακή). Επιπρόσθετα, η κοσμική ακτινοβολία διακρίνεται σε πρωτογενή και δευτερογενή. Πρωτογενής είναι η κοσμική ακτινοβολία πριν εισχωρήσει στην γήινη ατμόσφαιρα, ενώ δευτερογενής είναι τα παράγωγα των αντιδράσεων της πρώτης όταν αλληλεπιδρά με την ατμόσφαιρα.

Στο γήινο περιβάλλον συγκαταλέγονται τα συστατικά του φλοιού της γης (έδαφος, ύδατα) αλλά και ο ατμοσφαιρικός αέρας πάνω στην επιφάνειά της. Η μέση ενεργός δόση ενός ατόμου που οφείλεται στις φυσικές πηγές ραδιενέργειας του γήινου περιβάλλοντος είναι 2.4 mSv κάθε χρόνο (ΕΕΑΕ). Ο άνθρωπος εκτίθεται τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

2.1.2 Τεχνητές πηγές ιοντίζουσών ακτινοβολιών

Η ανθρώπινη δραστηριότητα συχνά προκαλεί σημαντική διαταραχή στη φυσική ραδιενεργή ισορροπία έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της έκθεσης του ανθρώπου και του περιβάλλοντος στη ραδιενέργεια. Υπάρχουν έτσι διάφορες τεχνητές πηγές που οφείλονται σε ανθρωπογενείς παράγοντες και συνεισφέρουν στην δόση ακτινοβολίας που δέχεται ο άνθρωπος. Αυτές οι πηγές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τρόπο χρήσης τους. Έτσι μπορεί να είναι από: α) ιατρικές χρήσεις, β) πυρηνικές δοκιμές, γ) πυρηνική ενέργεια, δ) πυρηνικά ατυχήματα, ε) επαγγελματική έκθεση, στ) τεχνολογικώς εμπλουτισμένα φυσικής ραδιενέργειας υλικά (TENORM).

Ο μέσος άνθρωπος, τουλάχιστον στις αναπτυγμένες χώρες, λαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της μέσης ετήσιας ενεργού δόσης από ιατρικές πηγές ακτινοβολιών. Αυτές οι πηγές χρησιμοποιούνται είτε για απλές διαγνώσεις, είτε για πολύπλοκες ακτινοθεραπείες. Η πιο συνήθης έκθεση είναι λόγω της γνωστής διαγνωστικής ακτινογραφίας με ακτίνες Χ στην οποία υποβάλλονται εκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο ετησίως. Για την ακτινοθεραπεία που χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση κάθε είδους όγκου υπάρχουν πηγές κοβαλτίου ^{60}Co , στροντίου ^{89}Sr , ιωδίου ^{131}I και άλλες που ακτινοβολούν τοπικά τον ασθενή.

Οι πυρηνικές δοκιμές είναι άλλος ένας παράγοντας που αυξάνει την έκθεση του ανθρώπου σε βλαβερές ακτινοβολίες. Ιδιαίτερα μετά την λήξη του Β΄ παγκόσμιου πολέμου και με την έναρξη του ψυχρού, οι ΗΠΑ και η Σοβιετική Ένωση ξεκίνησαν την μαζική κατασκευή πυρηνικών όπλων τα οποία δοκίμαζαν σε συγκεκριμένες τοποθεσίες σε όλο τον πλανήτη. Σήμερα έχει συμφωνηθεί η κατάπαυση των πυρηνικών δοκιμών και η μείωση των πυρηνικών εξοπλισμών.

Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας έχει επιβαρύνει το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Συγκεκριμένα οι διαδικασίες που ακολουθούνται από την εξόρυξη μεταλλευμάτων μέχρι την τελική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προκαλούν έκλυση των ραδιοϊσοτόπων. Ειδικότερα έκλυση μπορεί να υπάρξει κατά τον εμπλουτισμό, την κατασκευή, την καύση και την ανακύκλωση πυρηνικού καυσίμου, καθώς και κατά την διαχείριση και απόθεση των πυρηνικών αποβλήτων.

Λόγω της ευρείας λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων ανά τον κόσμο έχουν συμβεί διάφορου κλίμακας πυρηνικά ατυχήματα που έχουν αποτελέσει άλλη μία επιπρόσθετη πηγή ακτινοβολίας για τον άνθρωπο.

Άλλες πηγές είναι τα τεχνολογικώς εμπλουτισμένα φυσικής ραδιενέργειας υλικά (TENORM) τα οποία είναι προϊόντα της βαριάς βιομηχανίας π.χ. scrap metal, σκωρία κ.λ.π. και περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις σε ουράνιο και θόριο (TENORM.com).

Επιπρόσθετα πολλές ομάδες ανθρώπων εκτίθενται σε ακτινοβολίες λόγω του επαγγέλματός τους. Τέτοιοι είναι οι εργαζόμενοι στην πυρηνική βιομηχανία, στην πυρηνική ιατρική, στα αεροσκάφη, στην βιομηχανία παρασκευής λιπασμάτων, στα ορυχεία και στις ιαματικές πηγές.

2.1.3 Εξωτερική έκθεση

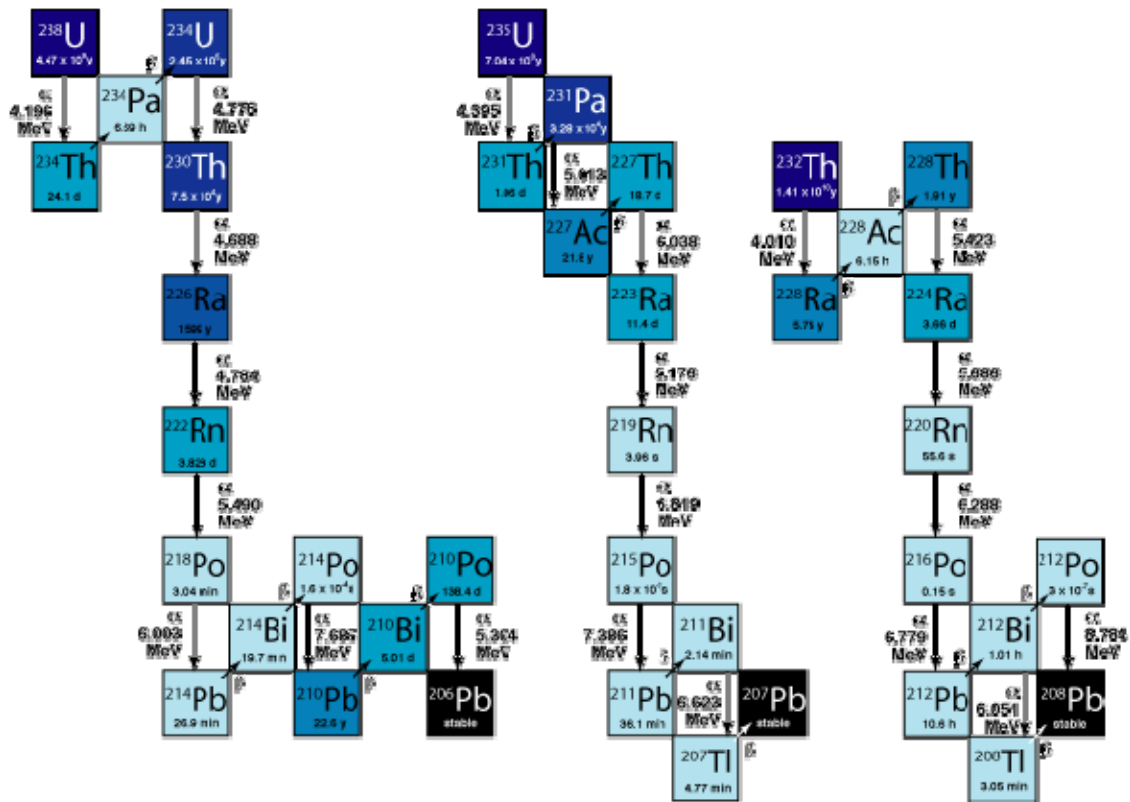
Η εξωτερική έκθεση αναφέρεται στα φωτόνια που εκπέμπονται από πηγές εκτός του ανθρώπινου οργανισμού. Τέτοια φωτόνια μπορεί να προέρχονται από α) το φλοιό της γης, β) τα υλικά της γης που εξάγονται με συγκεκριμένη μεθοδολογία και χρησιμοποιούνται αυτούσια ή κατεργασμένα, γ) τον ατμοσφαιρικό αέρα, δ) τα ύδατα ε) τεχνητές πηγές ακτινοβολίες. Η φυσική ακτινοβολία που εκπέμπει ο φλοιός της γης οφείλεται είτε σε ραδιοϊσότοπα που παράγονται από διασπάσεις φυσικών ραδιενεργών σειρών, είτε σε μεμονωμένα ραδιοϊσότοπα που δεν ανήκουν σε καμία από αυτές.

Οι φυσικές ραδιενεργές σειρές που υπάρχουν σήμερα στη φύση είναι α) η σειρά του ^{238}U (ουρανίου) β) η σειρά του ^{235}U (ακτινουρανίου ή ακτινίου) γ) η σειρά του ^{232}Th θορίου. Οι χρόνοι ημίσειας ζωής των παραπάνω ισotόπων είναι συγκρίσιμοι με την γεωλογική ηλικία της γης (10^9 έτη) και για αυτό όλα τα μέλη των σειρών μπορούν να ανιχνευθούν στη φύση σήμερα. Όμως φέρεται να υπήρχε και τέταρτη σειρά, αυτή του ^{237}Np ποσειδωνίου που λόγω του μικρού χρόνου ημίσειας ζωής έχει εξαφανιστεί αφήνοντας τελικό προϊόν το ^{209}Bi . Εκτός από τα ισotόπα που ανήκουν στις φυσικές αυτές σειρές υπάρχουν και τα μεμονωμένα που βρίσκονται στον φλοιό της γης. Το σημαντικότερο αυτών είναι το ^{40}K με χρόνο ημίσειας ζωής 1.28×10^9 έτη. Στα σχήματα 2.1 και 2.2 απεικονίζονται οι φυσικές ραδιενεργές σειρές, ο τρόπος μεταστοιχείωσης των πατρικών και θυγατρικών τους, καθώς και του ^{40}K ως ανεξάρτητου ραδιοϊσοτόπου.

Το ^{40}K είναι σημαντικό ως πηγή εξωτερικής ακτινοβολίας επειδή βρίσκεται όχι μόνο στον φλοιό αλλά στα ύδατα και στη θάλασσα. Βέβαια ο ρυθμός δόσης γ-ακτινοβολίας από τη θάλασσα είναι αρκετά μικρότερος από αυτόν στη στεριά. Ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει ραδιοϊσότοπα που εκπέμπουν γ-ακτινοβολία. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τέσσερα βραχύβια θυγατρικά των διασπάσεων του ραδονίου ^{222}Rn (^{218}Po , ^{214}Bi , ^{214}Pb , ^{214}Po).

2.1.4 Εσωτερική έκθεση

Εκτός από την εξωτερική ακτινοβολή που οφείλεται στους παραπάνω παράγοντες ο άνθρωπος δέχεται ραδιενέργεια και εσωτερικά. Συγκεκριμένα οι τροφές που καταναλώνει ο άνθρωπος όπως επίσης ακόμα και ο αέρας που αναπνέει περιέχουν διάφορα ραδιοϊσότοπα τα οποία τον ακτινοβολούν εσωτερικά. Τα ραδιοϊσότοπα αυτά μπορεί να είναι μεμονωμένα, να έχουν κοσμική προέλευση ή να είναι μέλη φυσικών ραδιενεργών σειρών. Το σημαντικότερο μεμονωμένο ραδιοϊσότοπο είναι το ^{40}K που βρίσκεται σε σταθερή ισοτοπική αναλογία με το φυσικό κάλιο στη φύση αλλά παραμένουν σταθερά και στον ανθρώπινο μεταβολισμό. Το πιο σημαντικό ισότοπο κοσμικής προέλευσης είναι ο ^{14}C το οποίο παράγεται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Ο ^{14}C λαμβάνεται μέσω της τροφικής οδού από τον άνθρωπο αφού το ραδιοϊσότοπο αυτό αφομοιώνεται από τα φυτά και τους άλλους ζωντανούς οργανισμούς. Εσωτερική ακτινοβολή στον άνθρωπο εκτός από τις τροφές μπορεί να πραγματοποιηθεί και μέσω της αναπνευστικής οδού. Ειδικότερα το ^{226}Ra που είναι μέλος της φυσικής ραδιενεργής σειράς του ^{238}U διασπάται στο ραδιενεργό αέριο ^{222}Rn το οποίο εισπνεόμενο από τον άνθρωπο είναι παράγοντας εσωτερικής ακτινοβολήσης. Εκτός του ραδονίου υπάρχουν και άλλα βραχύβια ισότοπα του ραδίου που παρουσιάζουν ενδιαφέρον και θα αναφερθούν παρακάτω.



Σχήμα 2.1 Οι φυσικές ραδιενεργές σειρές



Σχήμα 2.2 Η μεταστοιχείωση του ^{40}K

2.2 Το ραδόνιο - ιδιότητες και χαρακτηριστικά



Σχήμα 2.3 Το ραδόνιο 222

Το ραδόνιο είναι ένα φυσικό, άχρωμο, άοσμο και χημικά αδρανές ραδιενεργό αέριο. Δύο ισότοπα του ραδονίου που ανακαλύφθηκαν πρώτα το 1900 ήταν το ^{220}Rn και το ^{222}Rn από τους E. Rutherford και E. Dorn αντίστοιχα (Duranni & Ilic, 1996). Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά που το καθιστούν ραδιολογικά σημαντικό σε σχέση με τα υπόλοιπα μέλη της ραδιενεργής σειράς του ουρανίου (και του θορίου) είναι ο ατομικός του αριθμός 86, ο οποίος το κατατάσσει στα ευγενή αέρια, γεγονός που παίζει καθοριστικό ρόλο για τη φυσική και χημική συμπεριφορά του. Υπάρχουν πάνω από 30 γνωστές ιστοπικές μορφές του ραδονίου, οι περισσότερες από τις οποίες έχουν πολύ μικρό χρόνο ημίσειας ζωής σε σχέση με το ισότοπο ^{222}Rn (UNSCEAR 2000).

Τα τρία φυσικά ισότοπα ^{222}Rn (ραδόνιο - από την ραδιενεργή σειρά του ^{238}U), ^{220}Rn (θορόνιο - από αυτή του ^{232}Th) και ^{219}Rn (ακτινόνιο - από τη σειρά του ^{235}U) διασπώνται ραδιενεργά εκπέμποντας α-σωματίδια. Αυτά τα σωματίδια μπορούν να εντοπιστούν και να μετρηθούν από διάφορων ειδών ανιχνευτές α-ακτινοβολίας που θα αναφερθούν λεπτομερώς στη συνέχεια. Ο χρόνος ημίσειας ζωής για τα τρία φυσικά ραδιοϊσότοπα του ραδονίου είναι 3.82 d για το ^{222}Rn , 55.6 s για το ^{220}Rn και 3.96 s για το ^{219}Rn . Στο σχήμα 2.1 φαίνονται οι

ραδιενεργές σειρές που ανήκουν τα ισότοπα του ραδονίου καθώς και ο τρόπος διάσπασης. Τα βέλη προς τα κάτω αντιστοιχούν σε α-ραδιενεργό διάσπαση (^4He) με μείωση του μαζικού αριθμού κατά 4 και του ατομικού κατά 2. Αντίθετα τα βέλη προς τα πάνω δηλώνουν β-ραδιενεργό διάσπαση (εκπομπή ηλεκτρονίου) με αύξηση του ατομικού αριθμού κατά 1 αφήνοντας αναλλοίωτο τον μαζικό αριθμό. Σε κάθε περίπτωση το ισότοπο του ραδονίου προκύπτει με εκπομπή α-σωματιδίου από το ράδιο. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η παραγωγή του ραδονίου βρίσκεται σε αναλογία με το ράδιο σήμερα στην γη. Συνήθως τα ^{222}Rn , ^{219}Rn παράγονται εκεί που υπάρχει ουράνιο ενώ το ^{220}Rn παράγεται εκεί που εντοπίζεται θόριο. Το ^{219}Rn είναι το πιο βραχύβιο και παράγεται σε μικρότερες ποσότητες από ότι το ^{222}Rn . Αυτό συμβαίνει επειδή η φυσική αναλογία $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ των πατρικών τους είναι 0.00719 (Durrani & Ilic 1996) και για αυτό το λόγο το ^{219}Rn συχνά δεν λαμβάνεται υπόψη. Το ^{220}Rn επίσης είναι βραχύβιο σε σχέση με το ^{222}Rn . Ως εκ τούτου διανύει μικρότερες αποστάσεις από την πηγή του από ότι διανύει το ^{222}Rn . Γενικά το ραδιοϊσότοπο που είναι κυρίαρχο και παρουσιάζει μεγαλύτερο ραδιολογικό ενδιαφέρον είναι το ^{222}Rn σε αντίθεση με το ^{220}Rn . Βέβαια υπάρχουν και σπάνιες εξαιρέσεις όπου υψηλό ποσοστό αναλογίας Th/U οδηγεί σε αφύσικα υψηλή παραγωγή ^{220}Rn σε σχέση με αυτή του ^{222}Rn . Από εδώ και πέρα ο όρος ραδόνιο θα αφορά μόνο στο ισότοπο ^{222}Rn , ενώ τα ^{220}Rn , ^{219}Rn θα αναφέρονται ως θορόνιο και ακτινόνιο αντίστοιχα.

2.3 Διάχυση ραδονίου και θυγατρικών

Το ραδόνιο προέρχεται κυρίως από χαμηλές συγκεντρώσεις του ραδίου που εντοπίζονται στο έδαφος της γης (φλοιό) αλλά υπάρχει σε μικρότερες συγκεντρώσεις στον ατμοσφαιρικό αέρα, στα ύδατα και στο φυσικό αέριο. Εκτός από τα παραπάνω ως πηγή ραδονίου θεωρούνται και τα οικοδομικά υλικά που είναι υπεύθυνα για τις συγκεντρώσεις του ισότοπου αυτού στο εσωτερικό χώρων.

2.3.1 Έδαφος της γης

Τα υλικά του εδάφους παράγουν συνεχώς ραδόνιο επειδή εμπεριέχουν πυρήνες ^{226}Ra οι οποίοι είναι προϊόντα των ραδιενεργών διασπάσεων της αλυσίδας του ^{238}U . Για αυτό το λόγο η συγκέντρωση του παραγόμενου ραδονίου εξαρτάται από την περιεκτικότητα των πετρωμάτων και των κόκκων τους σε ράδιο. Κατά τη διάσπαση του πυρήνα του ραδίου, ο παραγόμενος πυρήνας ραδονίου αποκτά επαρκή κινητική ενέργεια ώστε να διασπάσει τους χημικούς δεσμούς που τον συγκρατούν (πυρήνας ανάκρουσης). Έτσι ο κάθε ανακρουόμενος πυρήνας μπορεί είτε να απορροφηθεί από έναν κόκκο (τον ίδιο ή έναν γειτονικό), είτε να διασχίσει τον κόκκο και να περάσει στο εδαφικό πορώδες. Οι πυρήνες ^{222}Rn ανακρούουν με ενέργεια 86 keV και η διαδρομή τους κυμαίνεται από 63 μm στον αέρα, 0.1 μm στο νερό και 0.02-0.07 μm σε τυπικά μέταλλα (Λουϊζη και Νικολόπουλος 1998).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την συγκέντρωση του ραδονίου στο έδαφος συνιστούν την ικανότητα διάθεσιμότητας, ενώ αυτοί που επηρεάζουν την διάχυσή του συνιστούν την ικανότητα μετακίνησης. Για παράδειγμα ένα έδαφος μπορεί να έχει μικρή δυνατότητα παραγωγής σε ραδόνιο λόγω μικρής διαθεσιμότητας ή ακόμα λόγω δυσκολίας μετακίνησης στο έδαφος. Η μεταφορά-μετακίνηση του ραδονίου πραγματοποιείται με δύο βασικούς μηχανισμούς. Ο ένας είναι η μοριακή διάχυση (molecular diffusion) όπου τα μόρια συγκρούονται, αναταράσσονται και τέλος διασκορπίζονται. Ο άλλος είναι η προσαγωγή (advection) όπου ένα εξωτερικό αίτιο έχει προκαλέσει την μαζική μετακίνηση των μορίων. Ο ρυθμός μεταφοράς και ο τρόπος μετακίνησης του ραδονίου επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες και κλιματολογικές παραμέτρους όπως είναι η θερμοκρασία, η βαρομετρική πίεση, ο άνεμος, το ύψος της βροχόπτωσης κ.α.

Ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τη διαθεσιμότητα του ραδονίου είναι η συγκέντρωση του ραδίου στο υπέδαφος. Η μέση συγκέντρωση του ^{226}Ra στα εδάφη παγκοσμίως είναι 40 Bq/kg (UNSCEAR 1993). Εδάφη που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις σε ράδιο οπότε και σε ραδόνιο είναι τα γρανιτικά και

ηφαιστειακά πετρώματα, τα λιγνιτικά κοιτάσματα καθώς και εδάφη μολυσμένα με παραπροϊόντα εξόρυξης, επεξεργασίας ουρανίου ή φωσφατικών κοιτασμάτων.

2.3.2 Ύδατα

Η συγκέντρωση του ραδονίου στα ύδατα επηρεάζεται από την προέλευσή τους, τον τρόπο μεταφοράς τους, τους χώρους απόθεσής τους και άλλους παράγοντες. Κατά κανόνα τα υπόγεια ύδατα παρουσιάζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις σε ραδόνιο σε σχέση με τα επιφανειακά. Σε κάθε περίπτωση ραδιολογική επιβάρυνση του ανθρώπου πραγματοποιείται κατά την πόση ή την εισπνοή του αερίου καθώς αυτό εκλύεται κατά την χρήση των υδάτων. Η διαλυτότητα του ραδονίου στο νερό αυξάνεται με την μείωση της θερμοκρασίας. Η μέση συγκέντρωση ραδονίου στο νερό κυμαίνεται παγκοσμίως στα 1 kBq/m³ (UNSCEAR 1993).

2.3.3 Ατμοσφαιρικός αέρας

Οι συγκεντρώσεις του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα οφείλονται στα μόρια του ισοτόπου που έχουν διαφύγει από το έδαφος, τα ύδατα και τα οικοδομικά υλικά. Γενικά οι συγκεντρώσεις αυτές είναι χαμηλές και κυμαίνονται σύμφωνα με τον UNSCEAR περί τα 10 Bq/m³ σε εξωτερικούς χώρους. Η συγκέντρωση του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα πάνω από τους ωκεανούς έχει πολύ μικρές τιμές λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης σε ράδιο στο θαλασσινό νερό. Αντιθέτως αυξημένες συγκεντρώσεις παρουσιάζουν κλειστοί χώροι και χώροι απόθεσης από ορυχεία. Μία πιο σπάνια πηγή ραδονίου είναι το φυσικό αέριο που χρησιμοποιείται για οικιακές χρήσεις. Κατά την κάυση του απελευθερώνεται ραδόνιο στον ατμοσφαιρικό αέρα. Οι τιμές της συγκέντρωσης ραδονίου από την καύση του φυσικού αερίου δεν αποτελούν πάντως σημαντικό παράγοντα επικινδυνότητας για τον άνθρωπο.

2.3.4 Οικοδομικά υλικά

Η συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους οφείλεται όχι μόνο στο έδαφος όπου βρίσκεται η κατασκευή αλλά στα οικοδομικά υλικά της. Οι ρυθμοί εκροής ραδονίου από τα οικοδομικά υλικά εξαρτώνται από την περιεκτικότητα αυτών σε ράδιο και από το είδος του υλικού. Για παράδειγμα, διάφορα βιομηχανικά υλικά όπως το τσιμέντο που περιέχει ιπτάμενη τέφρα ή άλλα φυσικά υλικά όπως ηφαιστειογενείς πέτρες μπορεί να περιέχουν αυξημένες συγκεντρώσεις σε ράδιο. Επιπρόσθετα, το ξύλο ως υλικό κατασκευής έχει διαφορετική δομή από το σκυρόδεμα, δηλαδή έχει διαφορετική πορώδη δομή με αποτέλεσμα να διαχέεται ραδόνιο με διαφορετικό τρόπο.

Η μεταφορά του ραδονίου στα οικοδομικά υλικά μπορεί να πραγματοποιηθεί με α) εκροή, όταν το ρευστό (νερό, αέρας, υδρατμοί) που βρίσκεται στις ενδιάμεσες πορώδεις οπές του υλικού συμπαρασύρει το ραδόνιο και δρα ως μεταφορέας, και β) διάχυση, όταν το ραδόνιο μετακινείται σχετικά με το ρευστό στους εσωτερικούς πόρους του υλικού.

Η μεταφορά σε κάθε περίπτωση συμβαίνει στους εσωτερικούς πόρους του υλικού. Το ποσοστό του παραγόμενου ραδονίου που εισέρχεται στους πόρους αποτελεί μία σημαντική παράμετρο και στις δύο παραπάνω διαδικασίες. Αυτή η παράμετρος συχνά αναφέρεται ως συντελεστής εκροής και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι το μέγεθος των κόκκων του υλικού, το πόσο πορώδες είναι, την παρουσία υγρασίας κ.α. Έχει αποδειχθεί ότι ο ρυθμός εκροής αυξάνει με την αύξηση της υγρασίας στους εσωτερικούς πόρους του υλικού (Nazaroff & Nero 1988). Ο συντελεστής διάχυσης εξαρτάται ακόμα από την εσωτερική γεωμετρία του υλικού, από την θερμοκρασία και από την πίεση.

Οι Nazaroff & Nero παραθέτουν μία απλή λύση της εξίσωσης που περιγράφει την διάχυση σε οικοδομικά υλικά. Ο ρυθμός παραγωγής ραδονίου σε ένα εσωτερικό όγκο του υλικού ανά μονάδα όγκου αέρα είναι:

$$f = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \lambda \cdot I \cdot \rho \cdot \eta$$

όπου: f = ο ρυθμός παραγωγής ραδονίου ($\text{Bq h}^{-1} \text{m}^{-1}$)

I = η συγκέντρωση του ^{226}Ra (Bq kg^{-1})

λ = η σταθερά διάσπασης του ^{222}Rn (h^{-1})

ρ = η πυκνότητα του υλικού (kg m^{-3})

ε = το πορώδες του υλικού

η = ο συντελεστής διάχυσης

Για έναν τοίχο πάχους d , η εξίσωση που περιγράφει τον ρυθμό εκροής από διάχυση στο δωμάτιο είναι:

$$E_d = \varepsilon \cdot f \cdot L \cdot \tanh(d / 2L)$$

όπου E_d = ο ρυθμός εκροής ανά μονάδα επιφανείας ($\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

L = το μήκος διάχυσης (m)

= $\sqrt{(D_e / \lambda)}$ όπου D_e είναι ο ενεργός συντελεστής διάχυσης ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$)

Η εξίσωση ισχύει όταν και οι δύο πλευρές του τοιχώματος είναι ελεύθερες να «αναπνέουν» και να αλληλεπιδρούν άνετα με χώρο που δεν περιέχει ραδόνιο. Αν το μήκος διάχυσης είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με το πάχος του τοίχου η παραπάνω εξίσωση προσεγγίζεται στην:

$$E_d = \varepsilon \cdot f \cdot \frac{d}{2} = I \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \eta \cdot \frac{d}{2}$$

2.4 Μηχανισμοί συγκέντρωσης ραδονίου και θυγατρικών στο εσωτερικό χώρων

Η τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου διαφέρει κατά περίπτωση. Όπως αναφέρθηκε στα παραπάνω οι συγκεντρώσεις του ραδονίου στον αέρα σε εξωτερικούς χώρους δεν βρίσκονται σε εύρη επικινδυνότητας για τον άνθρωπο. Αντίθετα το ραδόνιο, που η προέλευσή του είναι από τις συγκεντρώσεις του ραδίου στα οικοδομικά υλικά και το έδαφος, όταν συγκεντρώνεται στο εσωτερικό χώρων μπορεί να συνιστά σημαντικό ραδιολογικό κίνδυνο. Η συγκέντρωση του ραδονίου οπότε και των παραγομένων θυγατρικών του συμβαίνει με διάφορους πολύπλοκους μηχανισμούς οι οποίοι αναλύονται παρακάτω.

2.4.1 Συγκέντρωση ραδονίου

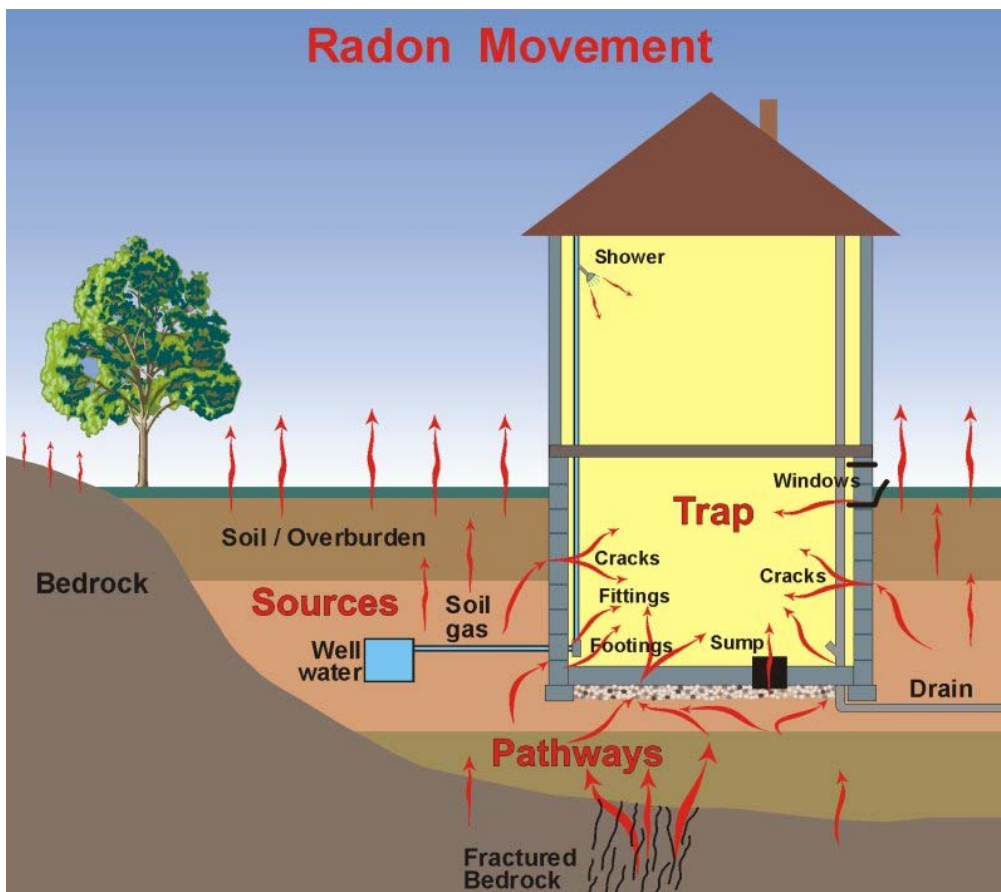
Το ραδόνιο που βρίσκεται συγκεντρωμένο σε κάποιον εσωτερικό χώρο κατά ένα ποσοστό έχει εισέλθει από το έδαφος και έχει διαχυθεί στο χώρο και κατά ένα άλλο ποσοστό έχει παραχθεί στο χώρο κυρίως από τα οικοδομικά υλικά και λιγότερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα και τα ύδατα. Σημαντικός παράγοντας είναι ακόμα και ο εξαερισμός του χώρου, είτε είναι φυσικός (πόρτες, παράθυρα, οπές ή ρωγμές), είτε τεχνητός (μηχανικά συστήματα). Συνεπώς ο ρυθμός εισόδου του ραδονίου στο χώρο, ο ρυθμός παραγωγής ραδονίου στο χώρο και ο ρυθμός εξαερισμού αποτελούν τους σημαντικότερους συντελεστές συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικό χώρο.

Η είσοδος του ραδονίου όποια και αν είναι η πηγή του (οικοδομικά υλικά, έδαφος, αέρας) πραγματοποιείται με πολλούς τρόπους. Στο σχήμα 2.4 φαίνονται οι τρόποι διείσδυσης του ραδονίου σε μία μονοκατοικία. Κάθε οικοδομική κατασκευή (κατοικίες, κτήρια) εδράζεται πάνω στο έδαφος και περιλαμβάνει ένα δίκτυο φυσικών ή τεχνητών οπών. Οι τοίχοι και τα δάπεδα παρουσιάζουν φυσικές ρωγμές ή μπορεί να έχουν οπές από τον τρόπο κατασκευής τους και τις

μονώσεις. Τεχνητές οπές είναι επίσης οι αγωγοί ηλεκτρισμού, νερού, οι σωληνώσεις αποχετεύσεως κ.α. Στους υπόγειους χώρους κυρίως αλλά και στους ισόγειους εισέρχεται, από τα κενά που έχει η δομική κατασκευή, ραδόνιο που έχει παραχθεί στο έδαφος. Στους υπέργειους ορόφους η συγκέντρωση ραδονίου οφείλεται στα οικοδομικά υλικά και στη μεταφορά ραδονίου από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η είσοδος σε αυτήν την περίπτωση συμβαίνει από τα κενά της κατασκευής, από τις πόρτες και τα παράθυρα. Στα δωμάτια που ανήκουν σε εσωτερικούς χώρους η συγκέντρωση δεν είναι σταθερή ιδίως με την παρουσία συστημάτων εξαερισμού, καθώς υπάρχει μετακίνηση ποσοτήτων ραδονίου μεταξύ των χώρων. Πολύ λιγότερο είναι το ποσοστό του παραγόμενου ραδονίου από τα χρησιμοποιούμενα ύδατα καθώς και από την χρήση συσκευών καύσης φυσικού αερίου. Στις συγκεκριμένες δραστηριότητες το ραδόνιο διαχέεται από το σύστημα ύδρευσης ή από το σύστημα εγκατάστασης φυσικού αερίου. Και στις δύο περιπτώσεις διαχέεται μέσω του κενού που υπάρχει μεταξύ τοίχου ή εδάφους και των σωληνώσεων της εγκατάστασης.

Η οποιαδήποτε ροή του αέρα προς έναν εσωτερικό χώρο επιτρέπει στο ραδόνιο να συγκεντρώνεται και να διαχέεται μέσα σε αυτόν ακολουθώντας τα ρεύματα αέρα που κινούνται σε αυτόν. Έτσι αναμιγνύεται ο ήδη υπάρχων αέρας του χώρου με τον νέο που είναι εμπλουτισμένος σε ραδόνιο. Εκτός όμως από τη ροή του αέρα πιο σημαντικός παράγοντας εισαγωγής σε εσωτερικό χώρο του ραδονίου είναι η διαφορά ατμοσφαιρικής πίεσης μεταξύ του εδάφους και του χώρου. Η υποπίεση που επικρατεί σε έναν εσωτερικό χώρο δημιουργεί συνθήκες αναρρόφησης ραδονίου από το έδαφος προς τον χώρο. Η υποπίεση αυτή μπορεί να οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας εντός και εκτός του χώρου, σε μετακινούμενες μάζες αέρα στον εσωτερικό χώρο (φυσικός ή τεχνητός εξαερισμός), καθώς επίσης και σε κλιματικούς παράγοντες όπως είναι οι βαρομετρικές μεταβολές και η βροχόπτωση στον εξωτερικό χώρο. Ένα παράδειγμα της τελευταίας περίπτωσης παραθέτουν οι Nazaroff & Nero (1988) σύμφωνα με τους οποίους μία ισχυρή βροχόπτωση μπορεί να προκαλέσει τη μετακίνηση μάζας αέρα από τους πόρους του εδάφους προς μία οικοδομή που

εδράζεται πάνω σε αυτό. Η πίεση δημιουργείται σε μία εξωτερική περιοχή λόγω του βάρους του προσπίπτοντος ύδατος εξωθώντας τον αέρα που βρίσκεται παγιδευμένος στους πόρους του εδάφους προς την επιφάνεια, δρώντας σαν έμβολο. Σε κάποιες χώρες της βόρειας Ευρώπης κυρίως όπου οι συγκεντρώσεις του ραδίου στα εδάφη είναι αυξημένες με αποτέλεσμα το παραγόμενο ραδόνιο να συνιστά προσοχή, χρησιμοποιούνται ειδικές κατασκευές που προσφέρουν στεγανότητα μεταξύ των κατοικιών και του εδάφους ως μέτρο προφύλαξης. Εκτός από τους υπόγειους και ισόγειους χώρους αυξημένες συγκεντρώσεις σε ραδόνιο μπορεί να παρουσιάζουν και υπέργειοι εσωτερικοί χώροι. Για αυτές τις περιπτώσεις ευθύνονται ή τα οικοδομικά υλικά ή μπορεί να φτάνει σε αυτούς αέριο από το έδαφος μέσω φρεατίων αερισμού, ανελκυστήρων κ.α.



Σχήμα 2.4 Η συγκέντρωση του ραδονίου σε εσωτερικό χώρο

2.4.2 Συγκέντρωση θυγατρικών

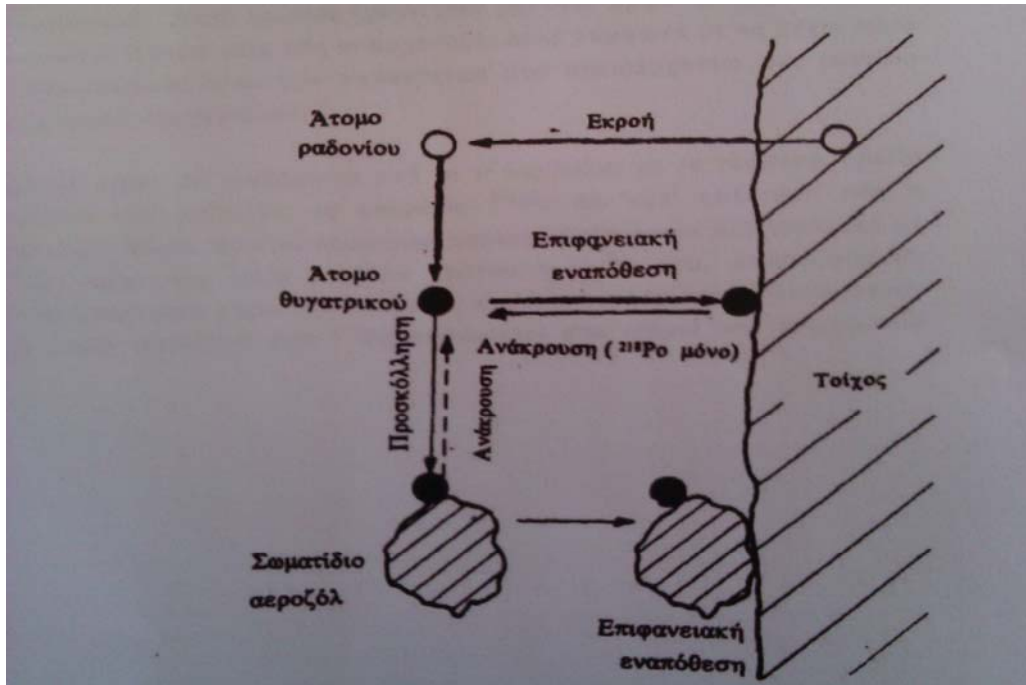
Το ραδόνιο ^{222}Rn με χρόνο ημίσειας ζωής 3.82 d δεν είναι το μόνο επικίνδυνο ισότοπο όταν συγκεντρώνεται σε εσωτερικούς χώρους. Με την είσοδό του στον εσωτερικό χώρο διασπάται στα θυγατρικά του ισότοπα εκπέμποντας α , β και γ ακτινοβολία ακολουθώντας την ραδιενεργή σειρά. Το θορόνιο ^{220}Rn με χρόνο ημίσειας ζωής 54.5 s διασπάται και αυτό στα θυγατρικά του ισότοπα αλλά λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής του το ποσοστό του στο περιβάλλον είναι πολύ μικρότερο από του ^{222}Rn και έτσι συνήθως δεν λαμβάνεται ως σημαντικός παράγοντας επικινδυνότητας για τον άνθρωπο.

Τα πιο σημαντικά θυγατρικά ισότοπα του ραδονίου (^{222}Rn) είναι βραχύβια και είναι κατά σειρά ραδιενεργής διάσπασης τα ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , και ^{214}Po που καταλήγουν στο ^{210}Pb (22.3 γ). Τα τέσσερα βραχύβια θυγατρικά έχουν χρόνους ημιζωής 3.11 min, 26.8 min, 19.9 min και 164 μs αντίστοιχα (σχήμα 2.6) και θεωρούνται εξίσου επικίνδυνα για την επιβάρυνση της υγείας του ανθρώπου. Τα ισότοπα αυτά σε σχέση με το πατρικό ραδόνιο που είναι ευγενές αέριο συμπεριφέρονται διαφορετικά στον τρόπο συγκέντρωσής τους επειδή έχουν την ικανότητα να σχηματίζουν χημικές ενώσεις (κυρίως ετεροπολικές). Οι μηχανισμοί που περιγράφουν την πορεία ενός ατόμου θυγατρικού φαίνονται στο σχήμα 2.5. Αρχικά ένα άτομο ραδονίου εκρέει από το οικοδομικό υλικό ή το έδαφος σε εσωτερικό χώρο. Στη συνέχεια διασπάται ραδιενεργά στα θυγατρικά του ακολουθώντας την φυσική ραδιενεργή σειρά. Να σημειωθεί ότι τα ισότοπα του Po εκπέμπουν α -ακτινοβολία ενώ τα Bi, Pb εκπέμπουν β και γ κατά τις διασπάσεις τους. Τα θυγατρικά παράγονται ως ελεύθερα ιόντα γεγονός που τα καθιστά εξαιρετικά ευκίνητα και δραστικά. Ειδικότερα τα ιόντα αυτά μπορούν να μείνουν ελεύθερα στο περιβάλλον, να παγιδευτούν από υδρατμούς, να συνδεθούν με άλλα μόρια ή να προσκολληθούν με δυνάμεις ηλεκτροστατικής φύσεως σε μεγαλομόρια-σωματίδια αεροζόλ. Μετά την προσκόλλησή τους μπορούν εκ νέου να αποτεθούν στις επιφάνειες ή να συνεχίζουν να αιωρούνται στο χώρο. Βέβαια είναι πιθανό τα ιόντα να εναποτεθούν απευθείας σε ελεύθερη μορφή στις

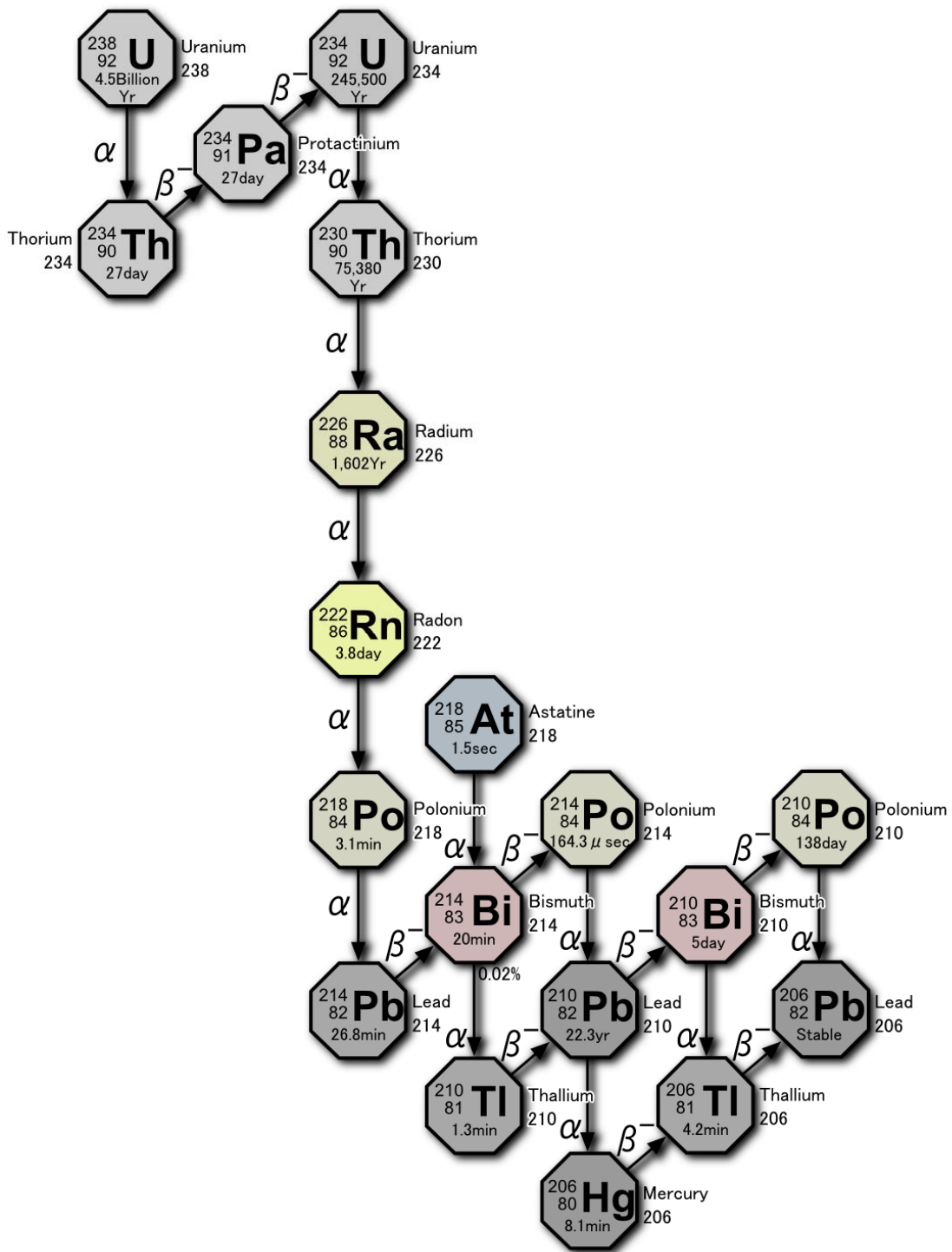
διάφορες επιφάνειες πριν ακόμα προσκολληθούν σε μεγαλομόρια ή ενωθούν χημικά.

Η ραδιενεργός διάσπαση του ^{218}Po προσδίδει αρκετή ενέργεια ανάκρουσης (110 KeV) στο παραγόμενο ^{214}Pb ώστε αν είναι προσκολλημένο σε επιφάνεια ή σωματίδιο αεροζόλ η ενέργεια να υπερνικήσει τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις έλξης και ο πυρήνας ανάκρουσης να αποσπαστεί-απελευθερωθεί. Μετά την αποκόλλησή του μπορεί να ενωθεί πάλι στο ίδιο σωματίδιο ή επιφάνεια, ή ακόμα να συνεχίσει την αιωρούμενη πορεία του μέχρι να εναποτεθεί κάπου ή να διασπαστεί. Τα υπόλοιπα ισότοπα ^{214}Bi , ^{214}Po δεν αποκολλώνται ποτέ επειδή η ενέργεια ανάκρουσης δεν επαρκεί για να υπερνικήσει τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις έλξης.

Σημαντικοί συντελεστές που επηρεάζουν την συγκέντρωση των θυγατρικών είναι ο τρόπος συγκέντρωσης του ραδονίου, οι θερμοκρασιακές και βαρομετρικές μεταβολές, η υγρασία, οι συνθήκες εξαερισμού, η γεωμετρία, το μέγεθος και η διαρρύθμιση του χώρου καθώς και η σύσταση του αέρα στον χώρο (συσσώρευση σωματιδίων αεροζόλ).



Σχήμα 2.5 Βασικές διαδικασίες που επιδρούν στην ισορροπία συγκεντρώσεων ραδονίου και θυγατρικών



Σχήμα 2.6 Η ραδιενεργή διάσπαση του ^{222}Rn

2.5 Επιπτώσεις στον άνθρωπο από την έκθεση σε ραδόνιο και διεθνείς επιτροπές ελέγχου

2.5.1 Επιπτώσεις από την έκθεση στο ραδόνιο και τα θυγατρικά του

Οι κίνδυνοι για την υγεία που προκαλούν το ραδόνιο και το θορόνιο δεν οφείλονται σε αυτά τα ισότοπα μόνο αλλά και στα βραχύβια θυγατρικά τους τα οποία εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό με εισπνοή ή με κατάποση. Το ραδόνιο είναι ευγενές αέριο με χρόνο ημιζωής μεγάλο σχετικά με τον χρόνο μίας αναπνοής. Για αυτό το περισσότερο που εισέρχεται στον οργανισμό με την αναπνοή εξέρχεται άμεσα και δεν προλαβαίνει να διασπαστεί ή να εναποτεθεί στους πνεύμονες. Αντίθετα τα άμεσα παραγόμενα θυγατρικά επικάθονται και προσκολλώνται στις επιφάνειες και σε σωματίδια αεροζόλ με τους μηχανισμούς που έχουν αναφερθεί παραπάνω αναλυτικά. Με αυτόν τον τρόπο τα άτομα των θυγατρικών που παράγονται προσκολλώνται κατά την εισπνοή στις επιθήλιες επιφάνειες των πνευμόνων και διασπώνται (σχήμα 2.7). Από τη στιγμή που το πιο μακρόβιο από τα άμεσα θυγατρικά, το ^{214}Pb , έχει χρόνο ημιζωής λιγότερο από 27 min η όλη σειρά από διασπάσεις μπορεί να ολοκληρωθεί προτού προλάβουν οι φυσικοί μηχανισμοί καθαρισμού του πνεύμονα να τα απομακρύνουν (Durrani & Ilic 1996). Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα οι βρόγχοι του πνεύμονα να ακτινοβολούνται λόγω των διασπάσεων. Τα πιο καταστροφικά είναι τα ισότοπα του πολωνίου που διασπώνται σε μικρής εμβέλειας α-σωματίδια που ιονίζουν βαρέως τους ιστούς.

Η κύρια επίπτωση στην υγεία του ανθρώπου από το ραδόνιο είναι ο καρκίνος του πνεύμονα. Η κύρια επιδημιολογική απόδειξη ότι η έκθεση σε ραδόνιο προκαλεί καρκίνο του πνεύμονα έχει προκύψει από τις διάφορες, επαναλαμβανόμενες μελέτες που έγιναν σε εργάτες ορυχείων ουρανίου, σιδήρου και άλλων μεταλλευμάτων (Durrani & Ilic 1996). Όλες οι μελέτες πραγματοποιήθηκαν από διεθνείς επιτροπές (ICRP 1993, BEIR IV 1988) και το ειδικευμένο επιστημονικό

προσωπικό έλαβε υπόψη πολλούς παράγοντες για τη διασφάλιση των αποτελεσμάτων επικινδυνότητας, όπως είναι το φύλο, η ηλικία, το κάπνισμα, το ποσοστό έκθεσης και η σύγκριση με έκθεση σε μη εργαζόμενους σε ορυχεία.

Βέβαια το ραδόνιο που εισπνέει ο άνθρωπος μπορεί να μεταφερθεί και σε άλλα όργανα του οργανισμού εκτός των πνευμόνων όταν αυτό διαλύεται στο αίμα. Η συγκέντρωση του ραδονίου στα όργανα και συνεπώς η δόση εξαρτώνται από την περιεκτικότητα των οργάνων σε λίπος, αφού το ραδόνιο είναι 16 φορές πιο διαλυτό στο λίπος από ότι στο αίμα (Miles & Cliff, 1992). Επιπρόσθετα οι Richardson et al. (1991) προτείνουν ότι εξαιτίας του υψηλού ποσοστού σε λίπος του μυελού των οστών υπάρχει μία σημαντική πιθανότητα εμφάνισης λευχαιμίας από την συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η εκτίμηση κινδύνου από ραδόνιο αρχικά βασίστηκε στις μελέτες που αφορούσαν εργαζόμενους σε ορυχεία. Οι επιδημιολογικές μελέτες που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον υπολογισμό του κινδύνου από τη συγκέντρωση ραδονίου αφορούν διάφορες ομάδες πληθυσμού. Οι ομάδες αυτές επιλέγονται ως οι πιο ευπαθείς που έχουν εκτεθεί σε υψηλά ποσοστά ραδονίου λόγω επαγγέλματος ή λόγω τοποθεσίας κ.α. Τέτοιες ομάδες είναι οι πληθυσμοί που κατοικούν σε περιοχές με υψηλή φυσική ραδιενέργεια, οι εργαζόμενοι σε ιαματικές πηγές, οι εργαζόμενοι σε εργαστήρια πυρηνικής τεχνολογίας και οι εργαζόμενοι σε υπόγεια ορυχεία.

Υπάρχουν πολλές κατοικίσιμες περιοχές που το έδαφός τους περιέχει ουρανούχες ή ραδιούχες ενώσεις. Σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται υλικά από αυτά τα εδάφη ως οικοδομικά υλικά σε κατοικίες και άλλα κτίρια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιβάρυνση της υγείας του τοπικού πληθυσμού λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους των κατοικιών. Σε αρκετές περιοχές κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες (Ουαλία, Σουηδία, κ.α.) το πρόβλημα της έκθεσης σε ραδόνιο στις περιοχές αυτές είναι γνωστό, το κοινό ενημερώνεται, πραγματοποιούνται μετρήσεις ετησίως που ελέγχουν τα όρια της συγκέντρωσης και λαμβάνουν προληπτικά μέτρα τοποθετώντας στις κατοικίες

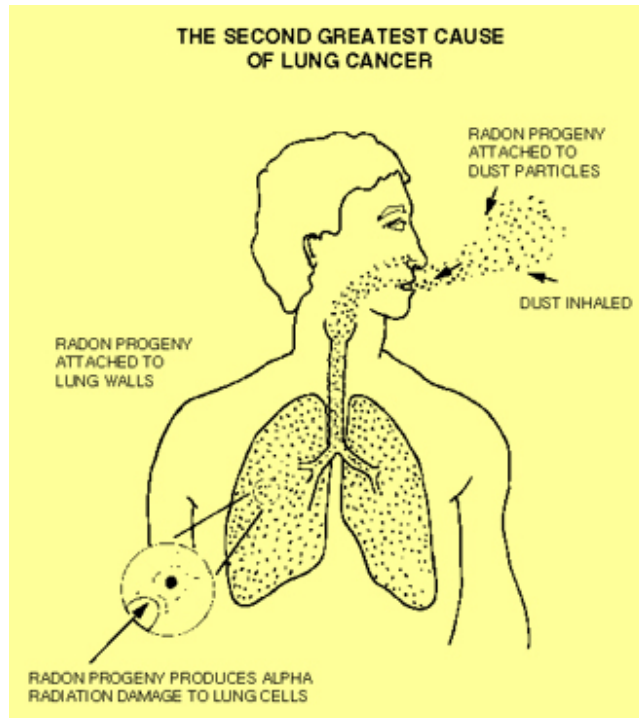
ειδικά συστήματα εξαερισμού και στεγανότητας μεταξύ του εδάφους και του πατώματος του ισογείου.

Οι ιαματικές πηγές και τα λουτρά χρησιμοποιούνται ως θεραπευτικές μέθοδοι σε πολλές χώρες ακόμα και στην Ελλάδα. Αυτές περιέχουν μικροποσότητες ραδονίου και θεωρούνται ευεργετικές σε διάφορες ιατρικές περιπτώσεις περισσότερο για αρθρώσεις και σπονδύλους. Για τους ασθενείς η ακτινοβολούμενη δόση είναι πολύ χαμηλή όμως οι εργαζόμενοι δέχονται τις δόσεις αυτές σε καθημερινή βάση γεγονός που τους καθιστά στις ομάδες υψηλού κινδύνου επιβάρυνσης από ραδόνιο. Για αυτό τον λόγο οι βάρδιες σε τέτοιο περιβάλλον θα πρέπει να ρυθμίζονται αναλόγως ώστε η δόση που δέχεται ο κάθε εργαζόμενος να είναι η ελάχιστη δυνατή.

Ως επαγγελματικά εκτιθέμενοι αντιμετωπίζονται συνήθως οι εργαζόμενοι στα διάφορα πυρηνικά εργαστήρια όπου παρασκευάζεται καύσιμο πυρηνικό υλικό ή πραγματοποιούνται πειράματα σε ερευνητικό επίπεδο. Πολλές μελέτες όμως έχουν αφιερωθεί στην έκθεσή τους σε ραδόνιο στον εργασιακό τους χώρο που συσχετίζονται με τις μετρήσεις που γίνονται στα ατομικά δοσίμετρα τα οποία φέρουν.

Οι μελέτες που αφορούν τους εργαζόμενους σε ορυχεία είναι πολυπληθείς, έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες περιοχές και έχουν δείξει συσχέτιση ανάπτυξης καρκίνου του πνεύμονα και υψηλής έκθεσης στα θυγατρικά του ραδονίου. αυτές οι μελέτες αναφέρονται σε εργαζόμενους σε ορυχεία φωσφορικών υλικών (Morrison et al. 1985), σε ορυχεία μετάλλου και κυρίως σιδήρου (Damber & Larsson 1982) και σε ορυχεία ουρανίου (Bocichio et al. 1995).

Να σημειωθεί ότι πολλές μελέτες για ενδείξεις καρκινογόνου επίδρασης του ραδονίου έχουν γίνει σε ζώα (ποντίκια, σκύλοι κ.λ.π.) επιβεβαιώνοντας σε διάφορες περιπτώσεις την συσχέτιση καρκίνου και έκθεσης σε ραδόνιο.



Σχήμα 2.7 Ο μηχανισμός με τον οποίο το εισπνεόμενο ραδόνιο μπορεί να προκαλέσει καρκίνο του πνεύμονα

2.5.2 Διεθνείς επιτροπές ελέγχου της έκθεσης στο ραδόνιο και στα θυγατρικά του σε εσωτερικούς χώρους

Από την στιγμή που οι διάφορες μελέτες άρχισαν να επιβεβαιώνουν τους κινδύνους που εγγυμονούν οι συγκεντρώσεις του ραδονίου και των θυγατρικών σε εσωτερικούς χώρους η επιστημονική κοινότητα ξεκίνησε να ελέγχει αυτά τα στοιχεία που προέκυπταν από τις μελέτες και να τα αξιολογεί. Συνεπώς η δημιουργία διεθνών ή εθνικών επιτροπών που θα θέσπιζαν κανόνες και όρια για την έκθεση στο ραδόνιο ήταν αναγκαία. Σήμερα έχουν θεσπιστεί κανόνες για την καλύτερη ενημέρωση και προστασία του κοινού, ενώ σε μερικά κράτη έχουν ψηφιστεί νόμοι και έχουν καθοριστεί τα μέγιστα επιτρεπτά όρια συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους.

Η IAEA (International Atomic Energy Agency) είναι μία διεθνής υπηρεσία για τον έλεγχο έκθεσης σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες και για θέματα που αφορούν την

ατομική ενέργεια και τη διαχείρησή της σε παγκόσμια κλίμακα. Η ΙΑΕΑ συνιστά δράση για μείωση όταν το επίπεδο της συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα ($> 600 \text{ Bq m}^{-3}$). Η Ευρωπαϊκή Ένωση από την δεκαετία του '90 έχει εκδώσει συστάσεις για την προστασία του πληθυσμού στις κατοικίες. Στη σύσταση αυτή προτείνεται ως επίπεδο δράσης για μέση ετήσια συγκέντρωση του ραδονίου στις κατοικίες η τιμή των 400 Bq m^{-3} ενώ για τις νεόδμητες το όριο αυτό είναι 200 Bq m^{-3} . Η ICRP (International Commission on Radiological Protection) είναι μία διεθνής επιτροπή που επικεντρώνεται σε θέματα ραδιολογικής προστασίας. Η ICRP συστήνει η ετήσια ενεργή δόση που λαμβάνει κάθε άτομο να μην υπερβαίνει τα 3 mSv , ενώ καθορίζει διορθωτική επέμβαση όταν η ετήσια ισοδύναμη δόση των κατοίκων είναι μεταξύ 3 και 10 mSv . Η ενεργός ισοδύναμη δόση των 3 mSv για συνεχή έκθεση και ετήσια παραμονή 7,000 ωρών σε εσωτερικούς χώρους με συντελεστή ισορροπίας ραδονίου-θυγατρικών ίσο με 0.5 αντιστοιχεί σε 200 Bq m^{-3} , ενώ για ενεργό ισοδύναμη δόση 10 mSv η αντίστοιχη τιμή είναι 600 Bq m^{-3} (Nikolopoulos et al. 1997).

Σε πολλές χώρες υπάρχουν εθνικές νομοθετικές ρυθμίσεις για τον έλεγχο της έκθεσης σε ραδόνιο. Κάθε χώρα υιοθετεί τα δικά της όρια και επίπεδα δράσης όταν αυτά υπερβαίνονται. Μερικές χώρες δεν έχουν θεσμοθετήσει τέτοια όρια και γίνονται έλεγχοι ενώ άλλες όπως είναι η Ελλάδα, η Δανία, η Ισπανία, η Πορτογαλία, η Γαλλία, η Νορβηγία παρόλο που δεν έχουν ορίσει επίπεδα δράσης για το ραδόνιο ακολουθούν τη σύσταση από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Στην Ελλάδα η αρμόδια αρχή η οποία είναι υπεύθυνη για όλα τα θέματα σχετικά με τις ακτινοβολίες είναι η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). Μέσα σε αυτά ενημερώνει το κοινό για το πρόβλημα της συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους και πραγματοποιεί μετρήσεις ραδιενέργειας από ραδόνιο σε κατοικίες. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής έχει ιδρυθεί η υπηρεσία EPA (Environmental Protection Agency) ως επίσημος εθνικός φορέας ενημέρωσης και εφαρμογών τεχνικού περιορισμού. Χώρες που έχουν θεσμοθετημένες επιτροπές που πραγματοποιούν μετρήσεις μεγάλου βεληνεκούς είναι ακόμα το Ενωμένο Βασίλειο, η Σουηδία, ο Καναδάς, η Ελβετία και η Γερμανία. Σε αυτές τις χώρες

υπάρχουν περιοχές υψηλής επικινδυνότητας για τους πληθυσμούς από την έκθεση στο ραδόνιο που συσσωρεύεται σε εσωτερικούς χώρους και για αυτό το λόγο έχουν καθοριστεί αυστηρά όρια συγκέντρωσης με νομοθετικά πλαίσια, ενώ παράλληλα λαμβάνονται όταν χρειαστεί δραστικά διορθωτικά μέτρα για τη μείωση της συγκέντρωσης ραδονίου.

2.6 Τεχνικές μέτρησης της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του

Η εξέλιξη στις μεθόδους ανίχνευσης ιοντιζουσών ακτινοβολιών προσφέρει ποικίλες πειραματικές και τεχνικές δυνατότητες για την μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Βέβαια υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της μεθόδου όπως είναι ο χρόνος έκθεσης, η τοποθεσία, το είδος της μέτρησης κ.α. Η πρώτη επιλογή που πρέπει να γίνει είναι για το αν η μέτρηση θα αφορά τη συγκέντρωση του ραδονίου ή των θυγατρικών του. Και στις δύο περιπτώσεις πάντως ανιχνεύεται η άλφα ή και γάμμα ακτινοβολία ξεχωριστά ή ταυτόχρονα. Για μερικά θυγατρικά μπορεί να γίνει ανίχνευση και β – ακτινοβολίας. Οι κυριότερες τεχνικές που εφαρμόζονται για την ανίχνευση της συγκέντρωσης του ραδονίου ή και των θυγατρικών του είναι οι παρακάτω :

- Ανιχνευτές καταγραφής ιχνών
- Ανιχνευτές ενεργού άνθρακα
- Ανιχνευτές ηλεκτρίσιμων υλικών
- Θάλαμοι σπινθηρισμών
- Θάλαμοι ιοντισμού

Ο κάθε επιστήμονας - ερευνητής μπορεί να χρησιμοποιήσει περισσότερες από μία τεχνικές ανεξάρτητα η μία από την άλλη ή σε συνδιασμούς. Συμφωνα με τους Durrani & Ilic (1996) υπάρχουν πάνω από 300 συνδιασμοί που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν κατά ζεύγη ή περισσότεροι μαζί. Οι διάφορες τεχνικές

μέτρησης διακρίνονται είτε ανάλογα με το είδος των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται, είτε ανάλογα του χρόνου απόκρισής τους.

Στην πρώτη περίπτωση οι μετρήσεις γίνονται με τη χρήση παθητικών (passive detectors) ή ενεργητικών ανιχνευτών (active detectors). Για τη χρήση των παθητικών ανιχνευτών δεν απαιτείται ηλεκτρική ισχύς αφού ο μηχανισμός τους είναι απλούστατος και έτσι το κόστος χρήσης τους είναι πολύ μικρό. Απαιτούν όμως μεγάλο χρονικό διάστημα χρήσης σε σχέση με τους ενεργητικούς που είναι πιο άμεσοι χρονικά. Οι ενεργητικοί αποτελούνται από βαθμονομημένα ηλεκτρονικά συστήματα και κοστίζουν περισσότερο.

Στη δεύτερη περίπτωση ανάλογα με το χρόνο απόκρισής τους οι μετρήσεις γίνονται με τεχνικές στιγμιαίων δειγματοληψιών (grab sampling), συνεχούς επιτήρησης (continuous monitoring) και ολοκληρωμένες τεχνικές (integrated). Στις τεχνικές στιγμιαίων δειγματοληψιών και συνεχούς παρακολούθησης χρησιμοποιούνται ενεργητικοί ανιχνευτές που μετράνε την μέση συγκέντρωση ραδονίου σε ένα συγκεκριμένο όγκο αέρα. Στις ολοκληρωμένες τεχνικές οι μετρήσεις γίνονται για μεγάλα χρονικά διαστήματα με τη χρήση ενεργητικών και παθητικών ανιχνευτών ταυτοχρόνως. Η μέση τιμή από όλες τις μετρήσεις προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική τιμή της συγκέντρωσης ραδονίου στον εσωτερικό χώρο που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

2.6.1 Τεχνικές μέτρησης με τη χρήση παθητικών ανιχνευτών

Οι πιο διαδεδομένοι ανιχνευτές της κατηγορίας αυτής είναι οι ανιχνευτές καταγραφής ιχνών. Οι μετρητές αυτοί ονομάζονται και πυρηνικοί ανιχνευτές ιχνών στερεάς κατάστασης. Οι παθητικοί ανιχνευτές είναι μικρού μεγέθους φιλμάκια, συνήθως ενός ή μερικών cm^2 , κατασκευασμένα από πολυμερή υλικά ευαίσθητα σε α -ακτινοβολία. Τα α -σωματίδια που προσπίπτουν στην επιφάνεια του ανιχνευτή προκαλούν μόνιμη παραμόρφωση σε αυτή η οποία γίνεται ορατή ως ίχνος μετά από ειδική χημική επεξεργασία (etching). Συγκεκριμένα το α -

σωματίδιο λόγω της υψηλής κινητικής του ενέργειας διεισδύει στο υλικό ολικώς ή μερικώς διαγράφοντας μία τροχιά. Η τροχιά διευρύνεται μετά από επεξεργασία σε ειδικό χημικό διαβρωτικό μέσο (π.χ. NaOH ή KOH) και είναι ορατή με μικροσκόπιο. Σε καλές αναλύσεις φαίνεται ακόμα και η γωνία που προσπίπτει το κάθε σωματίδιο που έχει παραχθεί από τη ραδιενεργό διάσπαση του ραδονίου ή των θυγατρικών. Οι κυριότεροι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι οι CR-39, LR-115, SR-86 και το Makrofoil οι οποίοι περιγράφονται στο κεφάλαιο 4. Αυτοί τοποθετούνται σε απλές διατάξεις που μοιάζουν με κυπελλάκια και απαρτίζουν τα δοσίμετρα. Η φιλοσοφία αυτής της τεχνικής μέτρησης με τη χρήση παθητικών ανιχνευτών είναι η μέτρηση των ιχνών που προσπίπτουν στην επιφάνειά τους (α -tracks cm^{-2}) και η αναγωγή, ύστερα από διαδικασία βαθμονόμησης, σε δεδομένα έκθεσης στη συγκέντρωση του ραδονίου (Bq m^{-3}). Φυσικά οι ανιχνευτές τέτοιου τύπου χρησιμοποιούνται μία φορά όμως είναι εύκολοι στη χρήση, αξιόπιστοι και έχουν χαμηλό κόστος (Σχήματα 2.8, 2.9)

Ένας άλλος τύπος παθητικών ανιχνευτών είναι ο ανιχνευτής ενεργού άνθρακα. Η διάταξη αυτή αποτελείται από ένα δοχείο που περιέχει ενεργό άνθρακα που ονομάζεται κάνιστρο άνθρακα. Όταν εκτεθεί η δοσιμετρική διάταξη το ραδόνιο που βρίσκεται στον αέρα προσροφάται στην επιφάνεια του ενεργού άνθρακα. Ο ρυθμός προσρόφησης είναι ανάλογος της συγκέντρωσης του ραδονίου στην ατμόσφαιρα και του χρόνου έκθεσης (Bochicchio et al. 1995). Μετά το πέρας της έκθεσης μετράται η γ -ακτινοβολία που εκπέμπεται από τις διασπάσεις της αλυσίδας του ραδονίου με τη βοήθεια ενός ανιχνευτή NaI ή Ge (Nikolopoulos 2000). Ο ανιχνευτής είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί παραπάνω από μία φορά όμως η μέθοδος δεν θεωρείται πολύ αξιόπιστη λόγω των επεξεργασιών που προϋποθέτει. Συγκεκριμένα ο ανιχνευτής χρειάζεται θέρμανση ώστε να απομακρυνθεί η προσροφούμενη υγρασία, επίσης το γεγονός ότι απορροφα υγρασία περιορίζει το χρόνο δράσης του σε μερικές ημέρες μόνο. Επιπρόσθετα πρέπει να αναλυθεί άμεσα σε εργαστήρια ώστε η μέτρηση των διασπάσεων να είναι ορθή και τέλος η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση των θυγατρικών του ραδονίου.

Τα τελευταία χρόνια έχει καταστεί δυνατή η κατασκευή υψηλής ακρίβειας μετρητών ραδονίου με τη χρήση ηλεκτρίσιμων υλικών. Όταν ένα ηλεκτρίσιμο υλικό (electret) φορτιστεί έχει την ικανότητα διατήρησης αυτού του φορτίου ως ηλεκτρικό δυναμικό για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι ανιχνευτές ηλεκτρίσιμων υλικών δρουν ουσιαστικά σαν συλλέκτες φορτισμένων ατόμων από τα θυγατρικά του ραδονίου του αέρα. Ο ανιχνευτής και σε αυτή την περίπτωση τοποθετείται σε ένα ειδικό δοχείο ώστε να ελέγχεται η είσοδος και έξοδος του αέρα σε αυτό κατά προτίμηση. Όταν είναι το δοσίμετρο ανοικτό διαχέεται ραδόνιο που λόγω των διασπάσεων ιοντίζει τον αέρα. Ο ιοντισμός αυτός προκαλεί μεταβολή στο δυναμικό του ηλεκτρίσιμου ανιχνευτή και με την κατάλληλη βαθμονόμηση είναι δυνατός ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του ραδονίου. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι χαμηλού κόστους, ολοκληρωτική και ο χρόνος έκθεσης περιορίζεται σε μερικές ημέρες λόγω των φαινομένων κορεσμού που εμφανίζονται στο υλικό.



Σχήμα 2.8 Ο ανιχνευτής CR-39 (διάφανο φιλμ) και το δοσίμετρο της διάταξης



Σχήμα 2.9 Ο ανιχνευτής LR-115 ή αλλιώς Kodalpha και η διάταξη

2.6.2 Τεχνικές μέτρησης με τη χρήση ενεργητικών ανιχνευτών

Οι διατάξεις ενεργητικών ανιχνευτών είναι ηλεκτρικές συσκευές και αποτελούνται από ένα θάλαμο στον οποίο εισέρχονται το ραδόνιο και τα θυγατρικά του. Αυτές οι διατάξεις είναι υψηλού κόστους και παρέχουν πολλές πληροφορίες για την υγρασία, την θερμοκρασία, σφαλμάτων μέτρησης κ.α. Τα δεδομένα μπορούν να εξαχθούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, να αποθηκευτούν και να αναλυθούν σε διάφορες μορφές (διαγράμματα, τιμές κ.α.).

Οι θάλαμοι σπινθηρισμών κατακρατούν ένα συγκεκριμένο όγκο αέρα. Το ραδόνιο που εισέρχεται εντός του θαλάμου διασπάται και οι διασπάσεις ανιχνεύονται από κάποιον ειδικό σπινθηριστή ευαίσθητο σε ακτινοβολία α ή γ. Πρόκειται για τεχνική στιγμιαίας δειγματοληψίας και στην οθόνη του οργάνου φαίνεται μετά το τέλος της έκθεσης η τιμή της μέσης συγκέντρωσης του ραδονίου.

Στην περίπτωση ανιχνευτή με θάλαμο ιοντισμού (σχήμα 2.10) έχουμε διάχυση ραδονίου μέσω ειδικών φίλτρων και είναι τεχνική συνεχούς παρακολούθησης. Εδώ υπάρχει στο εσωτερικό της διάταξης φορτισμένο ηλεκτρόδιο που δέχεται τα φορτισμένα άτομα από τις διασπάσεις της αλυσίδας του ραδονίου. Η μέση συγκέντρωση υπολογίζεται από την μεταβολή του δυναμικού στο ηλεκτρόδιο.

Ο ανιχνευτής θάλαμου ημιαγωγίμων πλακών καταγράφει τα α-σωματίδια που προσπίπτουν στα τοιχώματά του. Από τις κρούσεις των α-σωματιδίων στα ημιαγωγίμα τοιχώματα υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση ραδονίου. Ο ανιχνευτής αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τεχνικές στιγμιαίας δειγματοληψίας (δειγματοληψία μάζα αέρα) και σε συνεχούς παρακολούθησης (διάχυση μέσω πορώδους φίλτρου).



Σχήμα 2.10 Ο ανιχνευτής ραδονίου θαλάμου ιονισμού ALPHA-GUARD της GENITRON που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία

3 Επισκοπήσεις και μελέτες σε εσωτερικούς χώρους

Οι πρώτες έρευνες για να διερευνηθούν οι επιπτώσεις από την έκθεση λόγω συγκέντρωσης του ραδονίου έγιναν σε πληθυσμούς εργαζομένων σε ορυχεία. Αφού στατιστικά άρχισε να αποδεικνύεται η επικινδυνότητα από την συγκέντρωση ραδονίου ξεκίνησαν σταδιακά οι οργανωμένες μελέτες σε εσωτερικούς χώρους, στο χώμα, στο νερό και γενικότερα στο περιβάλλον που εμπεριέχει το ραδιενεργό αυτό ισότοπο. Σήμερα οι μελέτες προσδιορισμού της συγκέντρωσης του ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους πραγματοποιούνται συχνά και μπορούν να οργανωθούν ανεξάρτητα από πανεπιστημιακά ιδρύματα, από ερευνητικά κέντρα μέσα στα πλαίσια βέβαια των οδηγιών που ορίζουν οι εθνικοί ή διεθνείς κανονισμοί.

Οι μελέτες αυτές μπορούν να απευθύνονται σε συγκεκριμένους χώρους για παράδειγμα εργασιακούς χώρους, σχολεία, δημόσια κτίρια ή συνολικά σε κατοικίες. Έτσι κάθε μελέτη μπορεί να είναι από απλή τεχνική αναφορά σε μία περιορισμένη περιοχή μέχρι και ευρείας κλίμακας όπως είναι οι εθνικές επισκοπήσεις στις οποίες λαμβάνονται στοιχεία μακροχρόνια από πολλές έρευνες. Η ποικιλία για την επιλογή της τεχνικής και του είδους της μέτρησης είναι αρκετά ογκώδης αν ληφθεί υπόψη ότι οι τεχνικές μετρήσεως όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι πάμπολλες.

Οι επισκοπήσεις για την διασφάλιση της ορθής ανάλυσης των αποτελεσμάτων οργανώνονται με γνώμονα ορισμένους βασικούς συντελεστές. Μερικοί τέτοιοι συντελεστές είναι ο πληθυσμός που θα στοχοποιηθεί στην μελέτη, το είδος των εσωτερικών χώρων, ο τύπος των κατοικιών, η γεωγραφική θέση, η πυκνότητα πληθυσμού ανά επιφάνεια, το είδος των μετρητών που θα χρησιμοποιηθούν, η χρονική διάρκεια της έκθεσης κ.α. Στις διάφορες μελέτες ανάλογα με τη εφαρμοζόμενη τεχνική που ακολουθείται πραγματοποιείται ή μέτρηση του ραδονίου, ή των θυγατρικών του, ή ακόμα και των δύο.

Το πρόβλημα της συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους ενδιαφέρει όλο και περισσότερα κράτη τα οποία δαπανούν σημαντικά ποσά για ενημέρωση του κοινού αλλά και για τη διεξαγωγή εθνικών μελετών των οποίων τα αποτελέσματα δημοσιεύονται ακόμα και σε ετήσια βάση και συνοδευόμενα συνήθως με χαρτογραφημένες τις περιοχές ενδιαφέροντος. Οι επισκοπήσεις πραγματοποιούνται συνήθως σε εθνικό επίπεδο αλλά έχουν διεξαχθεί και έρευνες με τη συμμετοχή δύο ή παραπάνω κρατών (C. Carpentieri et al. 2011).

Σε κάθε περίπτωση βασικό κριτήριο για τη διεξαγωγή μίας μελέτης είναι ο τρόπος προσέγγισης της έρευνας. Δηλαδή για το αν η μελέτη θα γίνει με βάση πληθυσμιακά κριτήρια, γεωγραφικά ή αν θα υπάρχει ένας αλγόριθμος που θα καλύπτει και τα δύο. Η έκταση μίας χώρας διαιρείται σε ίσους καννάβους η χρησιμοποιούνται οι υπάρχουσες διοικητικές περιοχές. Σπανιότερα η επιλογή των κατοικιών γίνεται τυχαία. Συνήθως στις πόλεις λαμβάνονται περισσότερα δείγματα από ότι στις περιφερειακές περιοχές εκτός εάν πρόκειται για περιοχή υψηλού ενδιαφέροντος. Ο διεθνής οργανισμός UNSCEAR συνιστά ο τρόπος επιλογής των προς μέτρηση κατοικιών να προκύπτει από ένα πληθυσμιακά σταθμισμένο αντιπροσωπευτικό δείγμα του συνόλου των κατοικιών μίας χώρας (UNSCEAR, 1993).

Στη συνέχεια ακολουθεί αναφορά μερικών μελετών διαφορετικής έκτασης και τύπου (μικρές μελέτες και εθνικές επισκοπήσεις) που έχουν κοινό στοιχείο τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Οι μελέτες έχουν διαχωριστεί ανάλογα με τον τύπο των ανιχνευτικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν και αφορούν έρευνες που διεξήχθησαν στη Ελλάδα και σε άλλες χώρες. Η διαφορετικότητα όλων αυτών των μελετών βοήθησε στην συγκέντρωση ικανών στοιχείων για την οργάνωση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία. Οι περισσότερες μελέτες αφορούν μετρήσεις σε κατοικίες με χρήση παθητικών ανιχνευτών και κυρίως CR-39 αλλά υπάρχουν και άλλες που πραγματοποιήθηκαν σε σχολεία και εργασιακούς χώρους με CR-39 ή άλλες τεχνικές μέτρησης. Να σημειωθεί ότι η χρονολογία που αναγράφεται παρακάτω στην κάθε μελέτη είναι χρονολογία δημοσίευσης και όχι

διεξαγωγής της έρευνας, επειδή η τελευταία δεν αναφέρεται πάντα με ακρίβεια από τις πηγές.

3.1 Μελέτες με χρήση παθητικών ανιχνευτών CR-39

3.1.1 Επισκόπηση στην Ελλάδα (D. Nikolopoulos 2000)

Η μοναδική μελέτη σε εθνικό επίπεδο σχετικά με την συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους ολοκληρώθηκε το 2000 ύστερα από έρευνα πολλών ετών. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε από τον κ. Δ. Νικολόπουλο, παρουσιάστηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του η οποία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών και είχε ως θέμα την μελέτη της έκθεσης του ελληνικού πληθυσμού στο ραδόνιο. Η έρευνα αφορούσε έκθεση παθητικών ανιχνευτών ραδονίου CR-39 σε διάφορου τύπου κατοικίες σε όλη την ελληνική επικράτεια. Για την οργάνωση και εφαρμογή μίας τόσο μεγάλης μελέτης ήταν αναγκαία η δημιουργία ενός πρωτοκόλλου το οποίο θα υποδείκνυε την διαδικασία που θα ακολουθηθεί σε κάθε χρονική διάρκεια από την έκθεση μέχρι την επιστροφή των δοσιμέτρων και την ανάγνωση των αποτελεσμάτων. Οι περισσότερες ανιχνευτικές διατάξεις τοποθετήθηκαν στην νότια Ελλάδα και συγκεκριμένα στην Αττική, την Πελοπόννησο και την Κρήτη, ενώ πιο λίγα δοσίμετρα τοποθετήθηκαν στο βόρειο τμήμα της χώρας.

Οι ανιχνευτές τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό κατοικιών διάφορου τύπου και έτους κατασκευής. Να σημειωθεί ότι τέθηκαν περιορισμοί για το τι θεωρείται κατοικία, είδος κατοικίας και πληθυσμός σύμφωνα με τις επίσημες ορολογίες που αναφέρει η ΕΣΥΕ και σύμφωνα με αυτούς τοποθετήθηκαν τα δοσίμετρα. Το πρωτόκολλο υποδείκνυε η χρονική διάρκεια έκθεσης των δοσιμέτρων να είναι μηνιαία. Επιπρόσθετα τοποθετήθηκαν δύο ανιχνευτές ανά κατοικία σε διαφορετικό σημείο δηλαδή δεν ήταν ανά ζεύγη. Η ενημέρωση του πληθυσμού έγινε με έντυπα τα οποία συνοδεούντουσαν με ένα ερωτηματολόγιο. Το

ερωτηματολόγιο περιείχε τα στοιχεία του ιδιοκτήτη καθώς και στατιστικά στοιχεία που θα ενδιέφεραν στην ανάλυση των αποτελεσμάτων όπως το έτος κατασκευής, τον τύπο κατοικίας, την θέση τοποθέτησης των δοσιμέτρων κ.α. Οι ανιχνευτικές διατάξεις απεστάλησαν ταχυδρομικώς αλλά και πόρτα-πόρτα.

Για την Αττική ελήφθη ότι ο πληθυσμός α) διαμένει σε διαφορετικού τύπου κατοικίες και β) παρουσιάζεται υπερσυγκεντρωμένος σε ορισμένες περιοχές. Συνολικά στην Αττική τοποθετήθηκαν 450 μετρητές ενώ συλλέχθηκαν 355. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν τιμές της συγκέντρωσης ραδονίου στο εσωτερικό των κατοικιών σε φυσιολογικό επίπεδο $55.1 \pm 105.6 \text{ Bq m}^{-3}$, πολύ πιο χαμηλό από το κατώτατο όριο επικινδυνότητας που ορίζουν οι ευρωπαϊκοί κανονισμοί ($< 200 \text{ Bq m}^{-3}$).

3.1.2 Τεχνική αναφορά για τη Μεγαλόπολη, Ελλάδα (M. Manousakas 2010)

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στην πόλη της Μεγαλόπολης η οποία βρίσκεται σε περιοχή όπου λειτουργούν θερμοηλεκτρικές μονάδες καύσης λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η περιοχή έχει ραδιολογικό ενδιαφέρον επειδή με την καύση του λιγνίτη απελευθερώνεται ιπτάμενη τέφρα η οποία μπορεί να εναποτίθεται λόγω μεταφοράς από τον αέρα σε μικρό ποσοστό στο εσωτερικό των κατοικιών.

Η έκθεση των ανιχνευτών πραγματοποιήθηκε σε 42 κατοικίες διαφόρου τύπου οι οποίες επιλέχθηκαν τυχαία, ενώ η μελέτη διήρκησε από τον δεκέμβριο του 2006 μέχρι και τον νοέμβριο του 2007. Η μελέτη ήταν ετήσια δηλαδή πραγματοποιήθηκαν τέσσερις τριμηνιαίες εκθέσεις για κάθε εποχή του χρόνου. Η χρονική διάρκεια έκθεσης των ανιχνευτών ήταν τρεις μήνες σε κάθε κατοικία. Σε κάθε σημείο τοποθετήθηκαν δύο παθητικοί ανιχνευτές ραδονίου διαφορετικού τύπου δίπλα-δίπλα (CR-39 & LR-115) για να υπάρξει συγκριτικό κριτήριο κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τα σημεία επιλογής τοποθέτησης των

δοσιμέτρων ήταν στο καθιστικό ή στο υπνοδωμάτιο και συγκεκριμένα σε απόσταση ενός μέτρου από το έδαφος και όσο το δυνατόν απομακρυσμένα από παράθυρα ή πόρτες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τιμές της μέσης συγκέντρωσης στο εσωτερικό των κατοικιών κυμαίνεται μεταξύ 44 με 55 Bq m⁻³ δηλαδή σε φυσιολογικά επίπεδα. Το τυπικό υπόβαθρο μετρήθηκε για το CR-39 στα 20 ± 4 tracks/cm², ενώ για το LR-115 στα 27 ± 6 tracks/cm² τα οποία αφαιρέθηκαν από την συνολική καταγεγραμμένη ραδιενέργεια που ανιχνεύθηκε από τα δοσίμετρα. Ο υπολογισμός των μέσων τιμών της συγκέντρωσης ραδονίου αναλύθηκε σε στατιστικά στοιχεία που αφορούσαν την εποχή και την τοποθεσία της έκθεσης των δοσιμέτρων.

3.1.3 Διακρατική συνεργασία για εθνική επισκόπηση της Σερβίας (C. Carpentieri 2011)

Πρόσφατα δημοσιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα μίας διεθνούς συνεργασίας που αφορούσε μία μακροχρόνια μελέτη συγκέντρωσης ραδονίου σε σχολεία της Σερβίας όπου τοποθετήθηκαν παθητικοί ανιχνευτές, ενώ η χημική διάβρωση (etching) και η καταμέτρηση των α-ιχνών (track counting) έγιναν στην Ιταλία. Σκοπός της επισκόπησης ήταν όχι μόνο να ελεγχθούν τα όρια της συγκέντρωσης ραδονίου στις περιοχές επιλογής αλλά και να εκτιμηθεί η ακρίβεια της μέτρησης διασφαλίζοντας την ποιότητα και εφαρμογή των πρωτοκόλλων.

Το πρώτο μέρος της έρευνας ήταν η έκθεση των δοσιμέτρων στα σχολεία σε 13 διοικητικά τμήματα της χώρας της Σερβίας. Χρησιμοποιήθηκαν παθητικοί ανιχνευτές ραδονίου τύπου CR-39 οι οποίοι τοποθετήθηκαν ανά ζεύγη σε κάθε σημείο επιλογής. Η συνολική μελέτη περιείχε δύο εξαμηνιαίες εκθέσεις για κάθε ζεύγος δοσιμέτρων.

Το δεύτερο μέρος περιελάμβανε την χημική διάβρωση και την ανάγνωση-καταμέτρηση των ιχνών α-ακτινοβολίας στους ανιχνευτές. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μετρητικά συστήματα. Οι 232 ανιχνευτές που εξετέθησαν το πρώτο

εξάμηνο αναγνώσθηκαν με το αυτοματοποιημένο σύστημα TASL βρετανικής σχεδίασης και κατασκευής, ενώ για τους υπόλοιπους 242 ανιχνευτές χρησιμοποιήθηκε το ιταλικό Politrack. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έδειξε μία απόκλιση 8 με 4% για κάθε εξάμηνο. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε επιπλέον πρωτόκολλο για να εξασφαλιστεί η ελάχιστη έκθεση των ανιχνευτών κατά την μεταφορά τους από την Ρώμη στη Σερβία και αντίστροφα.

3.1.4 Μελέτη σε διάφορες πόλεις της Σερβίας (R. Banjanac 2004)

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε διάφορες πόλεις της Σερβίας την άνοιξη του 2004. Συνολικά 30 παθητικοί ανιχνευτές ραδονίου τύπου CR-39 κατανεμήθηκαν σε σχολεία δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης (λύκεια) σε διάφορες περιοχές ενδιαφέροντος. Τα δοσίμετρα παραδόθηκαν σε καθηγητές των σχολείων χέρι-χέρι με κατάλληλη ενημέρωση. Η χρονική διάρκεια έκθεσης των δοσιμέτρων ήταν τρεις μήνες και στη συνέχεια συλλέχθηκαν για εργαστηριακή ανάλυση αφού πέρασαν την διαδικασία της χημικής διάβρωσης αρχικά. Για την μέτρηση των α-tracks χρησιμοποιήθηκε μία ημι-αυτόματη μέθοδος εντοπισμού τους με μία ειδική κάμερα (CCD camera) και ένα υψηλής ανάλυσης monitor. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το 20% της συγκέντρωσης ραδονίου ξεπερνάει τα 200 Bq m^{-3} σε μερικές περιοχές, ενώ στα περισσότερα σημεία η ανάλυση έδειξε η συγκέντρωση του ραδονίου να βρίσκεται κάτω από το όριο επικινδυνότητας.

3.1.5 Μελέτη σε περιοχές στη Σλοβενία (M. Humar 1992)

Το 1992 δημοσιεύτηκαν τα αποτελέσματα μίας έρευνας για τη συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Η μελέτη διεξήχθη σε περίπου 400 κατοικίες διαφόρου τύπου οι οποίες κάλυπταν με αναλογία όλη την

επικράτεια της χώρας. Έγινε έκθεση παθητικών ανιχνευτών ραδονίου CR-39 από δύο έως και έξι μήνες. Σε κάθε κατοικία τοποθετήθηκαν δύο ανιχνευτές δίπλα δίπλα σε ένα σημείο. Το σημείο επιλογής ήταν είτε το καθιστικό είτε ένα υπνοδωμάτιο δηλαδή ο χώρος που είναι μέγιστα κατοικίσιμος. Για την μέτρηση των α-tracks χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα αυτόματου σκαναρίσματος με υπολογιστή μέσω ειδικού προγράμματος παρέχοντας μια τρισδιάστατη (3-d) εικόνα.

Το μέρος της έρευνας που αφορούσε την τιμή της συγκέντρωσης στο εσωτερικό κατοικιών έδειξε ότι στην Σλοβενία τα επίπεδα βρίσκονται μεταξύ $69-133\text{Bq m}^{-3}$.

3.1.6 Μελέτη σε περιοχές στην Δανία (B. Majborn 1986)

Η διεξαγωγή της πιλοτικής αυτής έρευνας πραγματοποιήθηκε τα έτη 1983 και 1984 σε κατοικίες διαφόρου τύπου σε διάφορες περιοχές της Δανίας. Από τις 82 κατοικίες οι 10 ήταν διαμερίσματα ενώ οι υπόλοιπες 72 μονοκατοικίες με έναν ή δύο ορόφους. Στις κατοικίες χρησιμοποιήθηκαν παθητικοί ανιχνευτές ραδονίου CR-39. Κάθε δοσίμετρο που τοποθετήθηκε σχεδιάστηκε έτσι ώστε να περιέχει δύο ή τρεις ανιχνευτές CR-39 και άλλους τρεις ανιχνευτές θερμοφωταύγειας για τη μέτρηση της δόσης από εξωτερική ακτινοβολία. Τα στοιχεία της έρευνας που διεξήχθη αφορούσαν τρεις μήνες της χειμερινής περιόδου και τρεις μήνες καλοκαιρινής περιόδου. Το κάθε δοσίμετρο εξετέθη για τρεις μήνες. Σε κάθε κατοικία τοποθετήθηκαν ένα δοσίμετρο στο καθιστικό και άλλο ένα σε ένα υπνοδωμάτιο (συνολικά δύο). Στην περίπτωση που η κατοικία διέθετε κελλάρι τοποθετήθηκε άλλο ένα επιπλέον δοσίμετρο.

Ο γεωμετρικός μέσος της συγκέντρωσης ραδονίου υπολογίστηκε στις μονοκατοικίες 88 Bq m^{-3} το χειμώνα και 52 Bq m^{-3} το καλοκαίρι, ενώ στα διαμερίσματα 24 Bq m^{-3} το χειμώνα και 19 Bq m^{-3} το καλοκαίρι. Μέγιστες τιμές που σημειώθηκαν σε καθιστικό ήταν 381 Bq m^{-3} το χειμώνα και 306 Bq m^{-3} το καλοκαίρι.

3.1.7 Εθνική επισκόπηση της Βόρειας Ιρλανδίας (Robert Larmour 2010)

Την άνοιξη του 2010 δημοσιεύτηκε μία σημαντική μελέτη η οποία έγινε σε εθνικό επίπεδο για την χαρτογράφηση της συγκέντρωσης του ραδονίου στο εσωτερικό κατοικιών στην χώρα της Βόρειας Ιρλανδίας.

Για την διεξαγωγή της έρευνας έγιναν μετρήσεις σε περίπου 23,000 κατοικίες διαφόρου τύπου. Τα τελικά αποτελέσματα απεικονίζονται σε χάρτη πλέγματος 1 km όπου φαίνονται οι περιοχές που βρίσκονται στο όριο ή το ξεπερνάνε (με % ποσοστο συγκέντρωσης ραδονίου).

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου CR-39. Σε κάθε κατοικία τοποθετήθηκαν δύο δοσίμετρα, το ένα στο καθιστικό και το άλλο σε ένα υπνοδωμάτιο. Ο χρόνος έκθεσης των ανιχνευτών ήταν από 3 μήνες έως και 12 μήνες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ολοκληρώνονταν καταγράφονταν ανά έτος.

Τα δοσίμετρα απεστάλησαν ταχυδρομικά συνοδευόμενα με ένα πληροφοριακό έντυπο τοποθέτησης και χρήσης τους καθώς και με ένα ερωτηματολόγιο σχετικά με την κατοικία (έτος κατασκευής, είδος κλπ) και τα στοιχεία του ιδιοκτήτη. Η κατανομή που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία της χαρτογράφησης και των αποτελεσμάτων ήταν γεωμετρική - δηλαδή ο αριθμός των κατοικιών ήταν ο ίδιος ανά μονάδα εμβαδού (10 km²).

Οι μετρούμενες τιμές συγκέντρωσης στις κατοικίες διέφεραν σημαντικά δηλαδή σημειώθηκαν συγκεντρώσεις στο εσωτερικό κατοικιών από 30 – 500 Bq m⁻³.

3.1.8 Εθνική επισκόπηση του Ηνωμένου Βασιλείου (B.M.R.Green 1995)

Η μελέτη αφορά την μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου σε 2000 κατοικίες διαφόρου τύπου σε όλη την επικράτεια της Βρετανίας. Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν παθητικοί ανιχνευτές που ήταν τύπου CR-39. Οι παθητικοί ανιχνευτές τοποθετήθηκαν στα υπνοδωμάτια. Η διάρκεια έκθεσης των ανιχνευτών ήταν έξι μήνες το χειμώνα και μετά χρησιμοποιήθηκαν άλλοι ανιχνευτές για τους έξι μήνες του καλοκαιριού.

Κάθε ιδιοκτήτης συμπλήρωσε ένα ερωτηματολόγιο σχετικά με το είδος της κατοικίας και διάφορα χαρακτηριστικά της. Παράγοντες που ελήφθησαν υπόψη είναι η γεωγραφική τοποθεσία της κατοικίας, ο τύπος της κατοικίας, τα υλικά κατά την κατασκευή της καθώς και οι συνήθειες εξαερισμού από τους κατοίκους. Κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων η συγκέντρωση υπολογίστηκε στην περιοχή 18-25 Bq m⁻³ σε κάθε κατοικία (ωστόσο καταγράφηκε μία μέγιστη τιμή στα 520 Bq m⁻³). Τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν σε ετήσια βάση αλλά και κατά εποχή (χειμώνας-καλοκαίρι).

3.1.9 Μελέτη στην περιοχή της Σαξονίας στην Αγγλία (W.Birkholz 1993)

Πολλές χώρες επικεντρώνονται σε μελέτες που αφορούν συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος ως προς τις τιμές της συγκέντρωσης ραδονίου που ανιχνεύονται. Για την έρευνα επιλέχθηκε η περιοχή της νότιας Σαξονίας επειδή παρουσιάζει υψηλά ποσοστά συγκέντρωσης ραδονίου λόγω των κοιτασμάτων ουρανίου που βρίσκονται στην περιοχή.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στις τοπικές κατοικίες και τα δοσίμετρα τοποθετήθηκαν σε πολλά δωμάτια κάθε κατοικίας, στα κελάρια ακόμα και στις αποχετεύσεις αυτών. Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου CR-39 μαζί με το ηλεκτρονικό όργανο μέτρησης ATMOS-12D.

Οι παθητικοί ανιχνευτές εκτέθηκαν στα διάφορα σημεία στο εσωτερικό των κατοικιών για 30 μέρες ενώ η έρευνα διήρκησε συνολικά 10 μήνες. Τα αποτελέσματα έδειξαν μέγιστες συγκεντρώσεις έως και 500 Bq m^{-3} σε κάποια σημεία μέσα στα δωμάτια, καθώς και 20 kBq m^{-3} σε αποχετεύσεις.

3.1.10 Μελέτη στην πολιτεία Μισσούρι στις Η.Π.Α. (Michael C. R. Alavanja 1999)

Τα έτη 1993 και 1994 διεξήχθη μία έρευνα στην πολιτεία Μισσούρι των Ηνωμένων Πολιτειών προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των κρουσμάτων καρκίνου του πνεύμονα στους κατοίκους και της συγκέντρωσης ραδονίου στο εσωτερικό των κατοικιών τους. Να σημειωθεί ότι το δείγμα αφορούσε μόνο γυναικείο πληθυσμό. Σκοπός ήταν να πραγματοποιηθεί μέτρηση στις τιμές συγκέντρωσης του ραδονίου για ένα χρόνο και από τα αποτελέσματα να εκτιμηθεί μία μέση συγκέντρωση ραδονίου για τα επόμενα 30 έτη στην περιοχή. Επειδή πρόκειται για μία μακροχρόνια μελέτη χρησιμοποιήθηκαν παθητικοί ανιχνευτές ραδονίου τύπου CR-39 για την μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου αλλά και των θυγατρικών του. Συνολικά τοποθετήθηκαν 553 ανιχνευτές ενώ η παρακολούθηση αφορούσε και 512 περιπτώσεις ασθενών-κατοίκων για τους οποίους ελήφθησαν πολλά στατιστικά στοιχεία σχετικά με την ηλικία, τις διατροφικές συνήθειες, την μόρφωση κ.α. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα ήταν σημαντική όταν ξεπερνούσε η συγκέντρωση ραδονίου την τιμή των 148 Bq m^{-3} . Βέβαια αυτή η

τιμή βρίσκεται κάτω από το όριο επικινδυνότητας σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές προδιαγραφές ($200-400 \text{ Bq m}^{-3}$) και τις Καναδικές (750 Bq m^{-3}).

3.1.11 Μελέτη σε περιοχές στο Μπαγκλαντές (S.M.Farid 1992)

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε διάφορες πόλεις του Μπαγκλαντές. Τα δοσίμετρα τοποθετήθηκαν σε διάφορου τύπου κατοικίες σε όλη την επικράτεια της χώρας. Από τους παθητικούς ανιχνευτές ραδονίου προτιμήθηκαν οι CR-39 επειδή έχουν ευαισθησία μέχρι 40 MeV σε αντίθεση με τους LR-115 που έχουν μόνο μέχρι 3.5 MeV . Οι ανιχνευτές χρησιμοποιήθηκαν με δύο τρόπους : α. χωρίς φίλτρο (το καπάκι του δοσιμέτρου) και β. με φίλτρο (μεμβράνη). Η διάρκεια έκθεσης των δοσιμέτρων ήταν 40 με 60 μέρες. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 275 εκθέσεις σε 15 τοποθεσίες χωρίς φίλτρο και 71 εκθέσεις σε 6 τοποθεσίες με φίλτρο.

Τα αποτελέσματα έδειξαν μεγαλύτερη συγκέντρωση κατά τις μετρήσεις το χειμώνα σε σχέση με αυτές το καλοκαίρι. Τα σπίτια των οποίων τα δομικά υλικά ήταν γρανίτης, πέτρα και τούβλο παρουσίασαν σημαντικά αυξημένη συγκέντρωση ραδονίου σε σχέση με αυτά που κατασκευάστηκαν με τούβλο, λάσπη και ξύλο.

3.1.12 Μελέτη σε περιοχές στο Πακιστάν (Shafi-Ur-Rehman 2005)

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής σε διάφορες πόλεις του Πακιστάν. Στις περιοχές που επιλέχθηκαν να τοποθετηθούν τα δοσίμετρα κύριο συστατικό ως δομικό υλικό των κατοικιών είναι το χώμα (70%). Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν CR-39 διαστάσεων 2×2 οι οποίοι φυλάσσονταν πριν την έκθεση σε απλές σακούλες πολυαιθυλενίου διαστάσεων

3x3. Τα δοσίμετρα που περιείχαν τους ανιχνευτές ήταν με φίλτρο και η έκθεσή τους έγινε για τρεις μήνες.

Η προσέγγιση του πληθυσμού έγινε μέσω των σχολείων στους μαθητές και το 70% των γονέων ήταν θετικοί. Συνολικά τοποθετήθηκαν σε 6 πόλεις από 100 δοσίμετρα (600 περίπου συνολικά). Να σημειωθεί ότι το 50% των δοσιμέτρων δεν συλλέχτηκε λόγω απώλειας ή καταστροφής. Οι ανιχνευτές τοποθετήθηκαν σε κουζίνες, καθιστικά, υπνοδωμάτια και αλλού-λιγότεροι τοποθετήθηκαν σε καταστήματα.

Η μέτρηση των α-tracks μετά την χημική επεξεργασία έγινε με μικροσκόπιο (με το μάτι) χωρίς τη χρησιμοποίηση αυτοματοποιημένου μέσου. Τα αποτελέσματα έδειξαν συγκέντρωση ραδονίου 20-43 Bq m⁻³ στο εσωτερικό των κατοικιών.

3.2 Μελέτες με τη χρήση άλλων ανιχνευτών

3.2.1 Μελέτη σε κατοικίες στην Πάτρα

(Η. Παραεφθυμίου 2002)

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε 28 μονοκατοικίες και σε 30 διαμερίσματα πολυκατοικιών στην πόλη της Πάτρας. Για την μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου χρησιμοποιήθηκαν παθητικοί ανιχνευτές LR-115 οι οποίοι εξετέθησαν για τρεις μήνες. Επιλέχθηκε να τοποθετηθεί ένας ανιχνευτής ανά όροφο, συμπεριλαμβανομένων και των υπογείων.

Η μελέτη διήρκησε από το Δεκέμβριο του 1996 έως τον Νοέμβριο του 1997. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε σημαντική διαφορά της τιμής της συγκέντρωσης ραδονίου στους ορόφους σε σχέση με την τιμή που μετρήθηκε στα υπόγεια. Να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά στις τιμές της συγκέντρωσης κατά την χειμερινή περίοδο σε σχέση με τη θερινή. Η μέση

συγκέντρωση ραδονίου για τις μονοκατοικίες υπολογίστηκε στα 41 Bq m⁻³ ενώ για τα διαμερίσματα στα 28 Bq m⁻³.

3.2.2 Μελέτη σε δημοτικά σχολεία στην Πάτρα (Η. Παραεφθυμίου 2007)

Η έρευνα διεξήχθη σε 53 από τα 66 δημοτικά σχολεία της πόλης της Πάτρας και διήρκησε από το Δεκέμβριο του 1999 έως τον Μάιο του 2000. Για τη μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου χρησιμοποιήθηκαν 122 παθητικοί ανιχνευτές τύπου LR-115 II (8 από αυτούς απωλέσθησαν ή κατεστράφησαν). Η χρονική διάρκεια έκθεσης των ανιχνευτών ήταν 6 μήνες (στα μέσα της σχολικής περιόδου). Επιλέχθηκε να τοποθετηθούν ένας ανιχνευτής ανά όροφο σε κάθε κτήριο μέσα σε μία τάξη σε σημεία μακριά από παράθυρα.

Τα σχολικά συγκροτήματα διαφέρουν σε ηλικία, σε μέγεθος και στα κατασκευαστικά κτηριακά υλικά έτσι υπήρξε αναμενόμενη ασυμφωνία στα αποτελέσματα κατά την σύγκριση των τιμών σε κάθε σχολική μονάδα. Τα συνολικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το επίπεδο της συγκέντρωσης ραδονίου στο εσωτερικό των σχολείων κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 10 και 89 Bq m⁻³.

3.2.3 Μελέτη σε εργασιακούς χώρους στα Ιωάννινα (C.A.Papachristodoulou 2010)

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε το 2009 σε 42 δημόσιους εργασιακούς χώρους όπου εργάζονται περίπου 1300 μέλη της ακαδημαϊκής κοινότητας του πανεπιστημίου σε απόσταση 6 χλμ περίπου από την πόλη των Ιωαννίνων. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της συγκέντρωσης ραδονίου για τη χειμερινή και τη θερινή περίοδο δεν έδειξε σημαντική διαφορά. Αντίθετα η συγκέντρωση του ραδονίου

στους κατώτερους ορόφους και τα υπόγεια βρέθηκε αυξημένη σε σχέση με αυτή των ανωτέρων ορόφων.

Εδώ χρησιμοποιήθηκαν ανιχνευτές με electret για την ανίχνευση α-ακτινοβολίας. Εντούτοις είναι μία από τις λίγες μελέτες στον Ελλαδικό χώρο και παρουσιάζει χρήσιμα στοιχεία για την συγκέντρωση ραδονίου σε κτήρια που αποτελούνται από τα πιο συνήθη οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην χώρα (τούβλα, σκυρόδεμα κλπ). Οι εργασιακοί χώροι ανήκουν στα κτίρια του πανεπιστημίου και κατασκευάστηκαν από τούβλα και σκυρόδεμα την δεκαετία του '90.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκέντρωση του ραδονίου ακολουθεί μία λογαριθμοκανονική κατανομή με αριθμητική μέση τιμή $95 \pm 51 \text{ Bq m}^{-3}$.

3.2.4 Εθνική επισκόπηση στην Ιταλία (F. Bochicchio 1999)

Η έρευνα η οποία έγινε σε εθνικό επίπεδο πραγματοποιήθηκε στα 21 διαμερίσματα που απαρτίζουν διοικητικά την Ιταλία από το 1989 έως το 1994. Σκοπός της έρευνας ήταν ο υπολογισμός της συγκέντρωσης ραδονίου στη διάρκεια ενός έτους στο εσωτερικό κατοικιών. Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου LR-115 II.

Η μελέτη διεξήχθη σε 5631 οικίες και αφορά 200,000 κατοίκους συνολικά. Επίσης δοσίμετρα τοποθετήθηκαν σε 232 πόλεις από τις οποίες οι 50 μεγάλες. Τα αποτελέσματα με βάση τον Γεωμετρικό Μέσο έδειξαν ετήσια μέση συγκέντρωση στις κατοικίες $57 \text{ με } 52 \text{ Bq m}^{-3}$. Σε κάθε οικία τοποθετήθηκαν δύο δοσίμετρα το ένα δίπλα στο άλλο στο δωμάτιο που παραμένουν οι κάτοικοι τον περισσότερο χρόνο τους. Ο ετήσιος μέσος όρος είναι αποτέλεσμα δύο εξαμηνιαίων εκθέσεων για κάθε δοσίμετρο που χρησιμοποιήθηκε. Για την ανάγνωση των α-tracks ακολουθήθηκε spark-counting τεχνική (Cross and Tommasino, 1970). Η διανομή των ανιχνευτών στις κατοικίες έγινε ταχυδρομικώς αλλά και πόρτα-πόρτα.

4 Έκθεση των ανιχνευτών και μεθοδολογία

4.1 Γενικά

Ο σχεδιασμός του πλάνου για την τελική έκθεση των ανιχνευτικών διατάξεων ήταν μία ιδιαίτερη διαδικασία η οποία επηρεάστηκε από πολλούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί επηρέασαν σημαντικά το χρονοδιάγραμμα της μελέτης από την αρχική φάση της βαθμονόμησης μέχρι και την τελική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τέτοιοι παράγοντες είναι η επιλογή και ο αριθμός των διαθέσιμων υλικών (CR-39, κάλυμμα που περιέχει τους ανιχνευτές, επιλογή μικροσκοπίου, NaOH για χημική διάβρωση, κ.α.), ο χρόνος κατασκευής ορισμένων διατάξεων για την διεξαγωγή πειραματικών διαδικασιών π.χ. holder για τα CR-39 κατά το etching, καθώς και η ανάλυση των αποτελεσμάτων από τα απαραίτητα πειράματα πριν την έναρξη της επίσημης διαδικασίας.

Το πλάνο για την τοποθέτηση των ανιχνευτικών διατάξεων στις κατοικίες και στο εργαστήριο εξαρτήθηκε χρονικά και διαδικαστικά από την αρχική φάση της καταγραφής και συγκέντρωσης των υλικών, από τον διαθέσιμο τεχνολογικό εξοπλισμό του εργαστηρίου και από την διεξαγωγή των πειραμάτων βαθμονόμησης. Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας διαθέτει δύο ενεργητικές ανιχνευτικές διατάξεις για την μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου με την ονομασία ALPHA-GUARD. Επίσης σχεδιάστηκε μία μέτρηση που θα αναλυθεί λεπτομερώς παρακάτω, κατά την οποία εκτέθηκαν παθητικοί ανιχνευτές ραδονίου CR-39 σε διάφορα σημεία στο εργαστήριο. Στα ίδια σημεία τοποθετήθηκαν οι ενεργητικοί ανιχνευτές και τελικά πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Εν συνεχεία ακολούθησε η έκθεση των παθητικών ανιχνευτών σε κατοικίες αφού προηγουμένως όμως εξήχθησαν χρήσιμα αποτελέσματα σημαντικά για την κατανόηση και ορθή ανάλυση των αποτελεσμάτων της μελέτης από την σύγκριση των μετρήσεων μεταξύ παθητικών και ενεργητικών ανιχνευτών.

4.2 Ο σχεδιασμός συνοπτικά

Για να ξεκινήσει ο σχεδιασμός της μελέτης αρχικά έγινε καταγραφή των διαθέσιμων ανιχνευτικών διατάξεων καθώς και όλων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραματικών διαδικασιών και για την έκθεση των ανιχνευτών σε εσωτερικούς χώρους. Όλα τα πειράματα και ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκαν στα εργαστήρια του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. Το κτίριο Κ όπου στεγάζεται ο Τομέας περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα τεχνολογικά μέσα για την βαθμονόμηση των ανιχνευτικών διατάξεων, την αποθήκευσή τους, τις διαδικασίες που χρειάζονται για την ανάγνωση και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Το πιο σημαντικό σημείο για την διεξαγωγή μίας έρευνας αποτελεί η μέθοδος η οποία ακολουθείται. Σκοπός της μελέτης ήταν εξ αρχής να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για τον υπολογισμό της ραδιενέργειας από το ραδόνιο και των θυγατρικών του σε εσωτερικούς χώρους. Το εργαστήριο διαθέτει διάφορων τύπων ανιχνευτικές διατάξεις που επέτρεπαν τέτοιου είδους μετρήσεις. Αυτές οι διατάξεις είναι οι παθητικοί και ενεργητικοί ανιχνευτές ραδονίου που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή της μελέτης στη βαθμονόμηση και στην έκθεση σε εσωτερικούς χώρους. Βέβαια σε κάθε φάση κατά την διεξαγωγή της μελέτης κάθε τύπος ανιχνευτικής διάταξης χρησιμοποιήθηκε για διαφορετικό σκοπό. Συγκεκριμένα οι παθητικοί ανιχνευτές ραδονίου που εκτέθηκαν ήταν τύπου CR-39 (σχήμα 4.1) ενώ οι ενεργητικοί που χρησιμοποιήθηκαν είχαν την ονομασία ALPHA-GUARD (A/G) (σχήμα 2.10) και είναι με θάλαμο ιονισμού.

Ακολουθώντας τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν τα κράτη της δυτικής Ευρώπης για την μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους έγινε η εφαρμογή της έκθεσης των δοσιμέτρων. Το πρωτόκολλο αφορούσε από την αρχή χρήση παθητικών ανιχνευτών τύπου CR-39 για την μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου και των θυγατρικών του σε εσωτερικούς χώρους.

Επειδή επρόκειτο να γίνει χρήση τέτοιων ανιχνευτικών διατάξεων για πρώτη φορά προηγήθηκε η λεπτομερής βαθμονόμηση των ανιχνευτών αυτών στα

πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας της Π. Κοντάκου 'Ανάπτυξη μεθόδου ανίχνευσης ραδονίου με χρήση παθητικών ανιχνευτών'. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. και έγινε χρήση ραδιενεργών πηγών, (σχήμα 4.2) ενός ειδικά κατασκευασμένου θαλάμου ραδονίου (σχήμα 4.3) και της διάταξης A/G.

Η μέθοδος για την μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου συνιστά την έκθεση των παθητικών ανιχνευτών CR-39 σε συγκεκριμένα σημεία και για ορισμένο χρονικό διάστημα. Από την έκθεση το ειδικά κατασκευασμένο φιλμ (ανιχνευτής) διαστάσεων $2 \times 2 \text{ cm}^2$ περίπου (σχήμα 4.1) καταγράφει ως ίχνη την α-ακτινοβολία από την διάχυση του ραδονίου και των θυγατρικών στο χώρο που δέχεται στην επιφάνειά του. Το φιλμάκι (ανιχνευτής) περιέχεται σε ένα ειδικό πλαστικό κυπελλάκι (cup) το οποίο προστατεύει τον ανιχνευτή εξωτερικά για να μην φθείρεται η επιφάνειά του. Άλλωστε το κυπελλάκι επιτρέπει τη διάχυση του ατμοσφαιρικού αέρα στο εσωτερικό του οπότε και του ραδονίου και των θυγατρικών. Με την τοποθέτηση των ανιχνευτών στα σημεία ενδιαφέροντος ξεκινά και η έκθεσή τους στην ραδιενέργεια από τη συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών στον επιτηρούμενο χώρο. Μετά το πέρας της έκθεσης το οποίο είναι από μήνα έως και εξάμηνο για τέτοιου είδους ανιχνευτές οι ανιχνευτές αποστέλλονται στο εργαστήριο. Αφού αφαιρεθούν τα προστατευτικά κυπελλάκια και μείνουν εκτεθειμένα τα CR-39 με την σειρά τους τα τελευταία υποβάλλονται σε ειδική χημική επεξεργασία (etching) ώστε να είναι ευδιάκριτα τα ίχνη από α-ακτινοβολία. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η καταμέτρηση των ιχνών από α-ακτινοβολία στην επιφάνεια κάθε φιλμ CR-39 με τη βοήθεια ενός μικροσκοπίου. Με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων από τη βαθμονόμηση τα tracks/cm^2 ανάγονται σε ραδιενέργεια στο χώρο Bq/m^3 και έτσι γίνεται γνωστή η συγκέντρωση από το ραδόνιο και τα θυγατρικά του στον μετρούμενο χώρο. Η διαδικασία θα αναφερθεί παρακάτω αναλυτικά.



Σχήμα 4.1 Ο ανιχνευτής (φίλμ) CR-39 και η διάταξη (cup)



Σχήμα 4.2 Η πηγή του ραδίου η οποία τροφοδοτεί τον θάλαμο ραδονίου με ραδόνιο.
Φαίνεται και η θωράκισή της με μόλυβδο.



Σχήμα 4.3 Ο θάλαμος ραδονίου του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π.

4.3 Γιατί χρήση παθητικών ανιχνευτών

Εξ αρχής ήταν προγραμματισμένο να γίνει χρήση παθητικών ανιχνευτών για τη μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Η επιλογή αυτή έγινε για δύο κύριους λόγους. Πρώτος λόγος είναι ότι ακολουθήθηκε πρωτόκολλο παραπλήσιο με αυτό που ακολουθούν στις εθνικές επισκοπήσεις και έρευνες οι χώρες της Δυτικής ευρώπης που συνιστά τη χρήση παθητικών ανιχνευτικών διατάξεων σε παρόμοιου είδους μελέτες. Έτσι το πρωτόκολλο που εφαρμόστηκε κατά την έκθεση των ανιχνευτών στις κατοικίες που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μικρές μελέτες μέχρι και εθνικές επισκοπήσεις.

Ένας άλλος σημαντικός λόγος που προτιμήθηκαν αυτού του είδους ανιχνευτές είναι μία οικονομική και αξιόπιστη λύση. Το πρωτόκολλο απαιτούσε πολλές και

ταυτόχρονες μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία χωρίς μεγάλο χρονικό περιορισμό π.χ. ενός 24ώρου ή ημερών. Τέτοιου είδους μετρήσεις είναι πρακτικά αδύνατο να πραγματοποιηθούν από πολλούς ενεργητικούς ανιχνευτές τύπου A/G διότι είναι πολύ πιο ακριβοί με κόστος περί τα 6000 ευρώ ο κάθε ανιχνευτής με το λογισμικό που το συνοδεύει. Αντίθετα με τους παθητικούς ανιχνευτές CR-39 υπάρχει η δυνατότητα διανομής σε μεγάλο πλήθος κατοικιών, επίσης έχουν μικρό κόστος που συνεπάγεται μικρή απώλεια αν χαθεί ένας ανιχνευτής και είναι εξίσου αξιόπιστοι όταν εκτίθενται για μεγάλα χρονικά διαστήματα από μήνα έως και εξάμηνο.

4.4 Γιατί η επιλογή των ανιχνευτών CR-39

Υπάρχουν πολλοί τύποι παθητικών ανιχνευτικών διατάξεων τύπου καταγραφής ιχνών από α-ακτινοβολία. Στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκαν παθητικοί ανιχνευτές τύπου CR-39 με την ονομασία TASTRAK κατασκευασμένα από την εταιρία Track Analysis Ltd με έδρα το Bristol της Μεγάλης Βρετανίας. Η χημική ονομασία του ανιχνευτή (φιλμ) είναι το πολυμερές Polyallyl Diglycol Carbonate (PADC). Οι πιο συνηθισμένοι τύποι παθητικών ανιχνευτών είναι τα πολυμερή CR-39, LR-115 ενώ λιγότερο χρησιμοποιούνται το Macrofoil και το πιο πρόσφατο SR-86 (σχήματα 2.8, 2.9).

Το CR-39 χρησιμοποιείται σε εθνικές επισκοπήσεις χωρών που τις ενδιαφέρει το θέμα της συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους και δεν αρκούνται σε απλές ερευνητικές μετρήσεις με αποτέλεσμα να είναι το πιο διαδεδομένο και δοκιμασμένο από άποψη αξιοπιστίας μετρήσεων σε σχέση με τα υπόλοιπα. Επιπρόσθετα το CR-39 έχει εύρος ευαισθησίας σε ακτινοβολία από 100keV έως και 20MeV (S.M.Farid,1992). Αντίθετα το LR-115 έχει ευαισθησία μέχρι 3.5MeV και δεν ανιχνεύει τα θυγατρικά του ²²²Rn που αποτίθενται στην επιφάνεια του ανιχνευτή μέσα στην διάταξη (plate out) (V.S.Y. Koo et al. 2002). Το SR-86 είναι συμπολυμερές του CR-39 με DEAS (diethylene glycol allyl sulphonate)

μεγαλύτερης ευαισθησίας σε α-ακτινοβολία μέχρι 40MeV όμως είναι και πιο ακριβό ως πιο σύγχρονο συμπολυμερές. Το Macrofoil δεν επιλέχθηκε επειδή δεν είναι τόσο διαδεδομένο όσο το CR-39, επίσης έχει μεγάλο όγκο διάταξης και επειδή δεν βρέθηκε στη βιβλιογραφία να έχει χρησιμοποιηθεί σε νεότερες εθνικές επισκοπήσεις. Έτσι η επιλογή του παθητικού ανιχνευτή ιχνών α-ακτινοβολίας CR-39 το οποίο είναι δοκιμασμένο τόσο σε μικρές έρευνες όσο και σε μεγάλες μακροχρόνιες εθνικές επισκοπήσεις ταιριάζει για να εκπληρώσει τους σκοπούς της παρούσας μελέτης.

4.5 Διαδικασίες πριν την έκθεση των ανιχνευτών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για τον σχεδιασμό του πλάνου της μελέτης και την δημιουργία ενός ρεαλιστικού χρονοδιαγράμματος έπρεπε να συγκεντρωθούν τα απαραίτητα υλικά που ήταν απαραίτητα για την διαδικασία. Αυτά τα υλικά είτε αγοραστήκαν, όπως για παράδειγμα σημαντική ποσότητα NaOH, είτε κατασκευάστηκαν κατά παραγγελία όπως έγινε με τις θήκες (holders) (σχήματα 4.3, 4.4) των φιλμ CR-39 για την τοποθέτησή τους στο διάλυμα. Το πιο σημαντικό βήμα για την έναρξη της διαδικασίας και για το τι υλικά θα χρειαστούν, όπως ποσότητα NaOH, είδος μικροσκοπίου κ.λ.π. αποτέλεσαν οι οδηγίες της κατασκευάστριας εταιρίας των ανιχνευτών.

4.5.1 Κατασκευή Holder

Η εισαγωγή των ανιχνευτών στο διάλυμα για τη χημική διάβρωση προϋπέθετε την κατασκευή ειδικών θηκών που θα τοποθετούνταν αυτοί. Ταυτόχρονα θα τους προστάτευε και από φθορές που τυχόν προκληθούν στις επιφάνειές τους. Το υλικό έπρεπε να αντέχει σε θερμοκρασία των 95⁰C και σε βασικό διάλυμα NaOH. Για το λόγο αυτό το υλικό που επιλέχθηκε ήταν **Plexiglas** που είναι ανθεκτικό

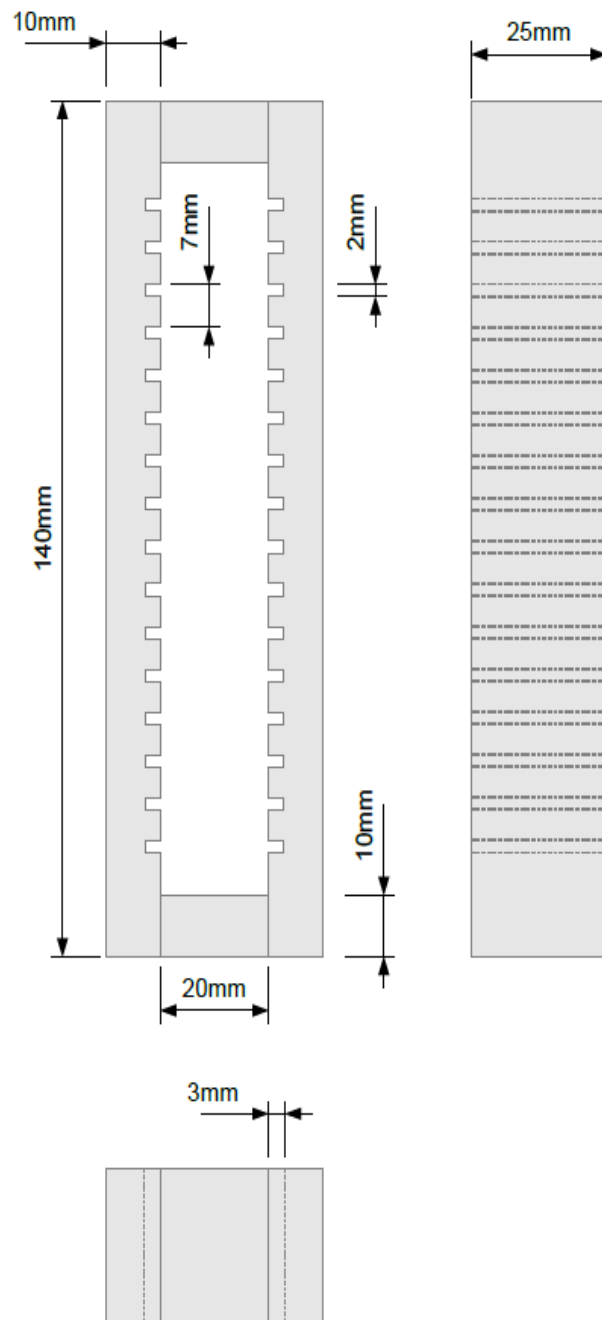
στις παραπάνω συνθήκες. Αρχικά κατασκευάστηκαν δύο (2) θήκες που χωρούσαν από πέντε (5) ανιχνευτές η καθεμία (σχήμα 4.3). Για λόγους πρακτικότητας για μαζικότερες διαδικασίες χημικής διάβρωσης περισσότερων ανιχνευτών σχεδιάστηκαν δύο (2) νέες θήκες από το ίδιο υλικό που περιέχουν μέχρι δεκαέξι (16) ανιχνευτές η καθεμία (σχήμα 4.4). Η κατασκευή πραγματοποιήθηκε με την κοπή και επανένωση κομματιών Plexiglas στο μηχανουργείο του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας με βάση το σχέδιο (σχήματα 4.5, 4.6).



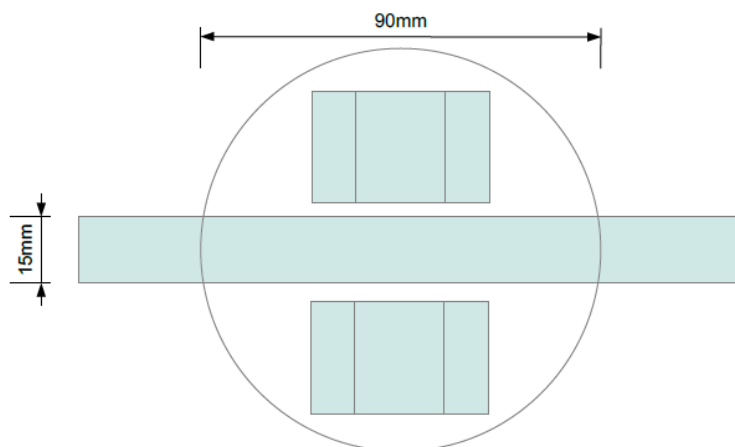
Σχήμα 4.3 Holder 5 ανιχνευτών



Σχήμα 4.4 Holder 16 ανιχνευτών



Σχήμα 4.5 Το σχέδιο της θήκης των ανιχνευτών 16 θέσεων



Σχήμα 4.6 Η κάτοψη του σχεδίου με το ποτήρι του διαλύματος (κύκλος) να περιέχει τα δύο holder (ορθογώνια) και από την διάμετρό του περνάει η ράβδος στήριξης η οποία είναι και αυτή από υλικό Plexiglas.

4.5.2 Ασφάλεια, αποθήκευση και διαχείριση των ανιχνευτών

Για να εξασφαλιστεί η ορθότητα και η ακρίβεια των μετρήσεων ελήφθησαν υπόψη οι οδηγίες και εφαρμόστηκαν με ιδιαίτερη προσοχή οι κανονισμοί που συνιστά η κατασκευάστρια εταιρία TASTRAK.

Ο Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας διέθετε 450 στο πλήθος παθητικούς ανιχνευτές ραδονίου τύπου CR-39 μετά από παραγγελία στην TASTRAK, από τους οποίους τελικά χρησιμοποιήθηκαν οι 102. Οι 20 χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση, ένας για δείγμα, ένας για να εκτεθεί σε πηγή α-ακτινοβολίας (βλ. μεταπτυχιακή εργασία της Π. Κοντάκου 'Ανάπτυξη μεθόδου ανίχνευσης ραδονίου με χρήση παθητικών ανιχνευτών'), 9 για μέτρηση υποστρώματος, οι 64 εκτέθηκαν σε εσωτερικούς χώρους ενώ υπάρχει και ένας αριθμός δοσιμέτρων που βρίσκονται αποθηκευμένοι ανά ζεύγη και είναι έτοιμοι για έκθεση. Τα φιλμ (σχήμα 4.1) διέθεταν αριθμηση και αύξοντες αριθμούς ξεκινώντας από το 2430. Τα πολυμερή

ήταν ταξινομημένα ανά 90 σε πέντε φύλλα και αποθηκευμένα σε ειδικές αντιστατικές σακκούλες κατά της υγρασίας (σχήμα 4.7)

Κάθε CR-39 συνοδεύονταν από τα δύο ειδικά προστατευτικά καπάκια (cups), μη αριθμημένα τα οποία περιέχουν το φιλμ κατά την έκθεση (σχήμα 4.8). Για να είναι γνωστό ποιό CR-39 τοποθετείται σε κάποιο μέρος και για λόγους πρακτικότητας και αρχειοθέτησης στα προστατευτικά κυπελλάκια τοποθετήθηκαν με αριθμημένα αυτοκόλλητα ο αναγραφόμενος αριθμός των ανιχνευτών που περιέχουν (σχήμα 4.9).

Τα μη χρησιμοποιημένα CR-39 ακολουθώντας τις οδηγίες της εταιρίας αποθηκεύτηκαν στην κατάψυξη ενός κοινού ψυγείου. Τα πρώτα CR-39 χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση και ως δείγματα για να μετρηθούν οι γεωμετρικές διαστάσεις και να ελεγχθούν εξωτερικά. Κάθε φορά που άνοιγε μία σακούλα για να αφαιρεθούν οι ανιχνευτές ώστε να χρησιμοποιηθούν στα διάφορα πειράματα βαθμονόμησης, η σακούλα έκλεινε πάλι αεροστεγώς με ένα μηχάνημα θερμοκόλλησης (σχήμα 4.10). Αν η σακούλα φθειρόταν από την συνεχή χρήση ανοίγματος-κλεισίματος, τότε αντικαθίστατο με καινούρια σακούλα αντιστατική και κατά της υγρασίας. Οι νέες σακκούλες αποκτήθηκαν για τις ανάγκες της μελέτης και ήταν αντιστατικές, κατά της υγρασίας, όμοιες με αυτές που χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής (TASTRAK). Σε αυτές αποθηκεύτηκαν τα πολυμερή που ήταν τοποθετημένα στα πλαστικά φύλλα (ανά 90) και οι ανιχνευτικές διατάξεις που ήταν έτοιμες προς έκθεση σε εσωτερικούς χώρους ανά δύο (σχήμα 4.11).

Η διαχείριση του υλικού των ανιχνευτών CR-39 ήταν ένα πολύ σημαντικό ζήτημα το οποίο σχετιζόταν άμεσα με την ορθότητα της ανάγνωσης και ανάλυσης των αποτελεσμάτων κατά τη μέτρηση των ιχνών α-ακτινοβολίας στην επιφάνειά τους. Σε κάθε φάση έπρεπε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα φθοράς του πολυμερούς ανιχνευτή. Για αυτό τον λόγο η επαφή και η μετακίνηση των ανιχνευτών πραγματοποιείτο με γάντια ή με λαβίδα χωρίς να υπάρξει φθορά στην επιφάνεια που θα εκτεθεί και στη συνέχεια θα αναγνωστεί για τα ίχνη. Επίσης το χρονικό διάστημα που μεσολαβούσε από το άνοιγμα μέχρι το κλείσιμο της σακκούλας που

περιείχε τα φύλλα με τους ανιχνευτές ήταν το συντομότερο δυνατό ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διάχυση του ραδονίου στο εσωτερικό της σακκούλας και να μην εκτεθούν οι ανιχνευτές.

Βέβαια για να μην υπάρχει σημαντικό σφάλμα κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων έγιναν οι δοκιμές μέτρησης του υποστρώματος της συγκέντρωσης ραδονίου όταν οι ανιχνευτές δεν έχουν εκτεθεί, ενώ βρίσκονται κλεισμένοι στις ειδικές σακκούλες και αποθηκευμένοι στην κατάψυξη για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 4.7 Η αντιστατική σακκούλα του κατασκευαστή που περιέχει 90 ανιχνευτές



Σχήμα 4.8 Τα αριθμημένα cups που περιέχουν τους ανιχνευτές



Σχήμα 4.9 Τα φιλμ κατά την προετοιμασία πριν κλειστούν στα cups και πριν εκτεθούν



Σχήμα 4.10 Η συσκευή θερμοκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε για την σκεύαση των προστατευτικών σακκούλων που περιείχαν τα δοσίμετρα



Σχήμα 4.11 Τα δοσίμετρα συσκευασμένα ανά ζεύγη (δείγμα-αντιδείγμα)

4.5.3 Η προετοιμασία των CR-39 πριν την έκθεση

Αρχικά οι ανιχνευτές CR-39 αφαιρούνται από την σακκούλα και η μεταφορά τους γίνεται με γάντια και με τη χρήση λαβίδας. Η σακκούλα ξανακλείνει αεροστεγώς αμέσως με τη βοήθεια θερμοκολλητικού οργάνου και τα μη εκτεθειμένα πολυμερή αποθηκεύονται στην κατάψυξη. Στη συνέχεια γίνεται καθαρισμός των ανιχνευτών με αποσταγμένο νερό και οινόπνευμα κατά ακολουθία. Πριν τοποθετηθούν στα ειδικά κυπελλάκια (cups) ψεκάζονται με αντιστατικό σπρέι και από τις δύο μεριές. Ο ψεκασμός με το αντιστατικό σπρέι γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή (TASTRAK) στις επιφάνειες των ανιχνευτών πριν τοποθετηθούν στα δοσίμετρα ώστε να μην προσκολλώνται σε αυτές λόγω φαινομένων στατικού ηλεκτρισμού φορτισμένα σωματίδια. Όταν στεγνώσουν τοποθετούνται στα κυπελλάκια με την άνω επιφάνεια να συμπίπτει με τον αναγραφόμενο αύξοντα αριθμό. (σχήματα 4.12, 4.13)

Τα κυπελλάκια πρέπει να κλείνουν σωστά για να πραγματοποιηθεί ορθά η διάχυση του ραδονίου από τον ατμοσφαιρικό αέρα που θα εισέλθει στο εσωτερικό του ανιχνευτή και να μην εισέλθουν σκόρες ή υγρά. Η ανιχνευτική διάταξη τότε είναι έτοιμη για να εκτεθεί για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα σε έναν εσωτερικό χώρο ή ακόμα μπορεί να κλειστεί στις ειδικές αντιστατικές σακκούλες κατά της υγρασίας να αποθηκευτεί στην κατάψυξη και να χρησιμοποιηθεί όποτε έχει προγραμματιστεί έκθεση. Σύμφωνα με τις οδηγίες της κατασκευάστριας εταιρίας πριν την χρήση των ανιχνευτών για έκθεση θα πρέπει να έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα μισής ώρας αφού έχουν αφαιρεθεί από την κατάψυξη.



Σχήμα 4.12 Η λαβίδα, το οινόπνευμα, το αποσταγμένο νερό και το αντιστατικό σπρέι για την προετοιμασία των ανιχνευτών



Σχήμα 4.13 Η τοποθέτηση του CR-39 με τον αύξοντα αριθμό προς τα επάνω

4.6 Η έκθεση των ανιχνευτικών διατάξεων σε εσωτερικούς χώρους

Είναι προφανές πως η χρήση των πρώτων ανιχνευτών έγινε σε δοκιμαστικά πειράματα και στα πειράματα βαθμονόμησης. Τότε πραγματοποιήθηκαν για πρώτη φορά η διαδικασία της έκθεσης των ανιχνευτών στους θαλάμους ραδονίου του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π., το etching και το μέτρημα των ιχνών. Ύστερα από πολλές δοκιμές η εξοικίωση με την διαχείριση των ανιχνευτών επέτρεψε την έναρξη των διαδικασιών να εφαρμοστεί έκθεση σε εσωτερικούς χώρους.

4.6.1 Δοκιμαστική έκθεση στο κτίριο Κ του Ε.Μ.Π.

Συμβουλευόμενοι την πλούσια βιβλιογραφία από τις πολλαπλές μελέτες και επισκοπήσεις για τη μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου σε χώρες του εξωτερικού αλλά και έρευνες που αφορούσαν τον ελλαδικό χώρο σχεδιάστηκε το πρωτόκολλο για την έκθεση των ανιχνευτικών διατάξεων. Σύμφωνα με αυτό εκτιμήθηκε ότι η έκθεση θα πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό κατοικιών στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής.

Ο σχεδιασμός για μία τέτοιου είδους έκθεση η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες είναι χρονοβόρος και απαιτεί επιχειρησιακή ακρίβεια στην εφαρμογή του. Για αυτό τον λόγο κατά την χρονική διάρκεια του σχεδιασμού και την προετοιμασία πραγματοποιήθηκε παράλληλα μία δοκιμαστική έκθεση εντός των εργαστηρίων του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας στο κτίριο Κ. Τα αποτελέσματα της έκθεσης άλλωστε βοήθησαν στην βελτίωση της μεθόδου και εξήχθησαν ενδιαφέροντα στοιχεία για την διαδικασία έκθεσης στο εσωτερικό των κατοικιών. Πιο συγκεκριμένα προγραμματίστηκε η τοποθέτηση δέκα (10) παθητικών ανιχνευτών ραδονίου τύπου CR-39 σε δέκα διαφορετικά σημεία του κτιρίου Κ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Επειδή οι ίδιοι τύπου ανιχνευτικές διατάξεις

θα εκτεθούν και στο εσωτερικό των κατοικιών, η διαδικασία του etching και του μετρήματος των ιχνών προβλέπεται να είναι η ίδια.

Η δοκιμή στο κτίριο ήταν ιδανική αφού επέτρεπε να χρησιμοποιηθούν χώροι σε υπόγειο, ισόγειο και σε όροφο. Επίσης υπήρχαν χώροι με διαφορετικές συνθήκες εξαερισμού γεγονός που οδηγεί σε διαφορετικότητα στη συγκέντρωση ραδονίου και των θυγατρικών στο χώρο. Εκτός αυτού ορισμένα δωμάτια όπως αυτό με τους θαλάμους ραδονίου ή και η αποθήκη δειγμάτων ήταν ενδιαφέρον να μετρηθούν και με τέτοιου είδους ανιχνευτές.

Οι χώροι και τα σημεία που τοποθετήθηκαν οι παθητικές ανιχνευτικές διατάξεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα I:

ΠΙΝΑΚΑΣ I

Επίπεδο	A/A Δοσιμέτρου	Θέση των Δοσιμέτρων
Υπόγειο	2447	Αίθουσα Φασματοσκοπίας - Πάγκος με καρτοθήκες
Υπόγειο	2448	Ακτίνες Χ - Τραπέζι οργάνων
Υπόγειο	2449	Αποθήκη Δειγμάτων - Ράφια δειγμάτων Χ
Υπόγειο	2450	Αποθήκη Χαρτιού
Υπόγειο	2451	Αίθουσα Ραδιογραφίας - Μεταλικό γραφείο πίσω από το πέτασμα
Ισόγειο	2452	Εργαστήριο Ραδονίου - Τραπέζι οργάνων μικρού θαλάμου
Ισόγειο	2453	Εργοστάσιο - Τραπέζι οργάνων Falling Films
Ισόγειο	2454	Γραφείο ΔΙΚ-ΑΑΝ - Πάνω από τη γυάλινη προθήκη

Όροφος	2455	Διάδρομος ορόφου - Τραπέζι εκτυπωτών
Όροφος	2456	Προθάλαμος ΕΠΧ - Δεξιά βιβλιοθήκη

Η τοποθέτηση έγινε 7/2/11 και ώρα 11:00. Παρέμειναν στις θέσεις για 30 ημέρες και συλλέχθηκαν στις 9/3/11. Τα σημεία επιλογής που τοποθετήθηκαν οι ανιχνευτικές διατάξεις ήταν ένα μέτρο τουλάχιστο μακριά από παράθυρο ή άλλο μέσο εξαερισμού και ήταν πάνω σε πάγκο όχι στο έδαφος του δωματίου. (σχήματα 4.14, 4.15, 4.16, 4.17)

Μετά το πέρας της προγραμματισμένης έκθεσης των ανιχνευτών για 30 ημέρες, οι ανιχνευτικές διατάξεις ανοίχτηκαν, αφαιρέθηκαν τα πολυμερή τα οποία στη συνέχεια διαβρώθηκαν χημικά και τέλος έγινε η μέτρηση των ιχνών στην επιφάνειά τους.

Επειδή σε κάθε σημείο τοποθετήθηκε ένας ανιχνευτής για λόγους στατιστικής ακρίβειας κάθε ανιχνευτής μετρήθηκε δύο φορές στην επιφάνειά του. Ο αριθμός των ιχνών ανά τετραγωνικό εκατοστό ανήχθηκε σε συγκέντρωση ραδιενέργειας α-ακτινοβολίας από το ραδόνιο και τα θυγατρικά του σε Bq m⁻³ με βάση τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης που θα αναφερθούν παρακάτω.

Για να ελεγχθούν ποιοτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τους παθητικούς ανιχνευτές CR-39 έπρεπε να συγκριθούν με ένα αξιόπιστο μέσο. Το εργαστήριο διέθετε δύο ανιχνευτικές διατάξεις ραδονίου ενεργητικού τύπου με θάλαμο ιονισμού με την ονομασία ALPHA-GUARD (A/G). Έτσι θεωρήθηκε χρήσιμο για τον έλεγχο αξιοπιστίας της μεθόδου με τους παθητικούς ανιχνευτές να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με τις διατάξεις A/G.



Σχήματα 4.15, 4.16 Τοποθέτηση των δοσιμέτρων στην αποθήκη δειγμάτων (αριστερά) και στην αποθήκη χαρτιού (δεξιά). Και στις δύο περιπτώσεις σε απόσταση τουλάχιστον ένα μέτρο από το έδαφος ή από μέσο εξαερισμού.



Σχήματα 4.16, 4.17 Η θέση του δοσιμέτρου σε πάγκο εργασίας (αριστερά) και σε βιβλιοθήκη (δεξιά).

4.6.2 Οι ανιχνευτικές διατάξεις ALPHA-GUARD

Οι ενεργητικοί μετρητές (σχήμα 4.18) είναι σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου και στην μία πλευρά υπάρχει οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) που δείχνει την τελευταία στιγμιαία μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου στο σημείο, θερμοκρασία και άλλες ενδείξεις. Οι διατάξεις A/G τοποθετήθηκαν στα ίδια ακριβώς σημεία η μία δίπλα στην άλλη όπου είχαν τοποθετηθεί οι παθητικοί ανιχνευτές. Οι ενεργητικοί μετρητές παρέμειναν στην ίδια θέση από 24 ώρες έως και πέντε ημέρες.

Οι μετρητές A/G της κατασκευάστριας εταιρίας SAPHYMO συνοδεύονται από το λογισμικό πακέτο DATA-EXPERT (Παράρτημα Γ) καθώς έχουν την δυνατότητα εξαγωγής και επεξεργασίας των στοιχείων σε Η/Υ. Τα στοιχεία καταγράφονται κάθε 10 λεπτά για όλη την χρονική διάρκεια της μέτρησης και αφορούν την συγκέντρωση του ραδονίου στον χώρο, την ατμοσφαιρική πίεση, την σχετική υγρασία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συνοδεύονται από το στατιστικό σφάλμα και υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης σε διαγράμματα.

Να σημειωθεί ότι η μία διάταξη αποκτήθηκε πρόσφατα και υπήρχε μία σταθερή απόκλιση στις μετρούμενες μέσες τιμές της συγκέντρωσης αυτής της διάταξης με την παλαιότερη. Συγκεκριμένα η διαφορά μεταξύ τους ήταν 17 Bq m^{-3} με την παλαιότερη να παρουσιάζει τις τιμές υψηλότερα. Αυτό είναι δυνατό να οφείλεται στο γεγονός ότι στην παλαιότερη διάταξη πιθανώς να έχουν συγκεντρωθεί μόλυβδος και πολώνιο ως θυγατρικά του ραδονίου στο εσωτερικό του θάλαμου ιονισμού και να δείχνει η συσκευή αυξημένες τις τιμές της συγκέντρωσης. Αυτό διορθώνεται συνήθως με ρύθμιση του επιπέδου του υποβάθρου, δηλαδή σε αυτή την περίπτωση αυξάνοντας το υπόβαθρο κατά 17 Bq m^{-3} .

Οι μετρούμενες τιμές από την έκθεση των ενεργητικών βρίσκονται στον Πίνακα V στο 6^ο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Στον πίνακα ΙΙ αναγράφονται βασικά χαρακτηριστικά του ALPHA-GUARD :

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙ

Εύρος Μέτρησης	2 έως 2,000,000 Bq/m ³ (0.05 έως 50,000 pC/liter)
Εύρος Θερμοκρασίας	+14° έως +122°F (-10° με +50°C)
Εύρος Πίεσεως	700 έως 1100 mbar
Εύρος Σχετικής Υγρασίας	0 έως 99% Σ.Υ.
Εύρος Λειτουργίας Ρεύματος	12 Vdc (ή 110 Vac με converter των 12 Vdc)
Αυτονομία Ρεύματος	Η μονάδα λειτουργεί με εσωτερική μπαταρία για 10 ημέρες περίπου



Σχήμα 4.18 Η διάταξη AlphaGUARD Professional Radon Monitor Model PQ2000Pro

4.6.3 Έκθεση στο εσωτερικό κατοικιών

Όταν ολοκληρώθηκαν τα πειράματα βαθμονόμησης και δοκιμαστικής έκθεσης στο κτίριο Κ εξήχθησαν τα αποτελέσματα της ανάλυσης των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα αυτά όντας τα αναμενόμενα χωρίς να υπάρχουν μη φυσιολογικές περιπτώσεις επέτρεπαν την συνέχεια της διεξαγωγής της μελέτης με την έκθεση των παθητικών ανιχνευτών στο εσωτερικό των κατοικιών. Όπως έχει αναφερθεί το πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε βασίστηκε σε αντίστοιχα που χρησιμοποιούνται σε κράτη της δυτικής Ευρώπης όπως η Αγγλία, η Δανία, η Ιταλία κ.α. Βέβαια για τον σχεδιασμό ελήφθησαν υπόψη και όλες οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε εσωτερικούς χώρους στον ελλαδικό χώρο οι οποίες αναφερθήκαν εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο.

4.6.3.1 Επιλογή των χώρων μέτρησης

Η έρευνα προγραμματίστηκε να γίνει ύστερα από συνενόηση με τον επιβλέποντα καθηγητή στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής για λόγους πρακτικότητας. Επίσης συμφωνήθηκε να συμμετέχουν άτομα που ανήκαν στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. Για το λόγο αυτό δεν χρειάστηκε να μοιραστεί φυλλάδιο ενημερωτικό σχετικά με το πρόβλημα του ραδονίου επειδή οι συμμετέχοντες γνώριζαν φυσικά το πρόβλημα της συγκέντρωσης του ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους και βρέθηκαν θετικοί στη συμμετοχή τους σε μία τέτοια έρευνα.

Με τις συνθήκες αυτές το πρωτόκολλο προσαρμόστηκε έτσι ώστε να υπάρξει ένα ικανοποιητικό πλήθος σημείων δειγματοληψίας. Για να συμβεί αυτό δεν τέθηκε κανένας περιορισμός για το είδος κατοικίας στα κριτήρια επιλογής. Άλλωστε τα άτομα που απασχολούνται ή σχετίζονται με τον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας είναι περιορισμένα στον αριθμό και ένας επιπρόσθετος περιορισμός στο είδος της

κατοικίας θα μείωνε σημαντικά την στατιστική μελέτη και θα αύξανε το σχετικό σφάλμα των μετρήσεων.

Σύμφωνα με την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία ο ελληνικός πληθυσμός παρουσιάζεται υπερσυγκεντρωμένος στα αστικά κέντρα. Σε εθνικές επισκοπήσεις και μικρότερες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε πόλεις στο εξωτερικό τα πρωτόκολλα προβλέπουν να χωριστούν οι περιοχές εποπτείας της έκθεσης των ανιχνευτών είτε γεωγραφικά (π.χ. Ιρλανδία βλ. κεφ. 3), είτε ανάλογα με την πυκνότητα πληθυσμού (Η.Π.Α), είτε διοικητικά (Ιταλία, Σερβία κ.α.). Στη συγκεκριμένη μελέτη ο αριθμός των επισκοπούμενων κατοικιών ήταν περιορισμένος. Οπότε η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε σε συγκεκριμένα σημεία της Αττικής με τυχαίο τρόπο χωρίς να ληφθούν υπόψη γεωγραφικά, πληθυσμιακά ή διοικητικά στοιχεία. Η τυχειότητα στην επιλογή κατοικιών και σημείων είναι συνήθης σε έρευνες του εξωτερικού αλλά και του ελλαδικού χώρου όταν τα σημεία δειγματοληψίας είναι περιορισμένα (βλ. Κεφ. 3). Οπότε οι κατοικίες στις οποίες τοποθετήθηκαν οι ανιχνευτές ήταν διαμερίσματα σε πολυκατοικίες, μονοκατοικίες, ισόγεια, υπόγεια ή σε όροφο. Δεν τέθηκε κανένας περιορισμός στο έτος κατασκευής της οικοδομής, ούτε και στα υλικά κατασκευής της οικοδομής (σκυρόδεμα ή ξύλο κ.α.).



Σχήμα 4.19 Τα σημεία δειγματοληψίας επιλέχθησαν τυχαία. Τα περισσότερα δοσίμετρα τοποθετήθηκαν στην ανατολική Αθήνα αλλά υπήρχαν και σημεία δειγματοληψίας στον Άγιο Στέφανο (βόρεια Αττική) και στη Λαυρεωτική (νότια Αττική).

4.6.3.2 Προετοιμασία των ανιχνευτών για διανομή

Οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδονίου στο εσωτερικό κατοικιών έγιναν αποκλειστικά με την χρήση των παθητικών ανιχνευτών ραδονίου CR-39. Άλλωστε οι ενεργητικοί ανιχνευτές A/G που διέθετε το εργαστήριο δεν επαρκούσαν για μετρήσεις σε πολλά σημεία ταυτόχρονα.

Πριν την έκθεση έγινε μία μαζική προετοιμασία 100 παθητικών ανιχνευτικών διατάξεων ώστε να είναι την κατάλληλη χρονική στιγμή διαθέσιμοι προς έκθεση. Τα πολυμερή αφού καθαριστήκαν με νερό, οινόπνευμα και αντιστατικό σπρέυ,

κλειστήκανε προσεκτικά στα προστατευτικά κυπελλάκια σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Στη συνέχεια οι ανιχνευτικές διατάξεις σφραγιστήκαν αεροστεγώς με τη βοήθεια οργάνου θερμοκόλλησης ανά δύο στα ειδικά σακκουλάκια και αποθηκεύτηκαν στην κατάψυξη μέχρι την χρήση τους.

Όλες οι διατάξεις ήταν αριθμημένες (με α/α 2472-2572) και κάθε ζεύγος στο σακκουλάκι περιείχε ένα μονό και ένα ζυγό αριθμό (π.χ. 2472 και 2473) για λόγους διευκόλυνσης αναγνώρισης του σημείου τοποθέτησης. Οι ανιχνευτές αποθηκεύτηκαν ανά δύο στις σακκούλες όχι τυχαία αλλά επειδή το παρόν πρωτόκολλο συνιστούσε έκθεση δύο ανιχνευτών ανά σημείο. Επειδή ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας ήταν σχετικά μικρός για να υπάρξει καλύτερη προσέγγιση στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών κατά την μέτρηση των ιχνών τοποθετήθηκαν στο ίδιο σημείο δύο ανιχνευτές CR-39. Οι ανιχνευτικές διατάξεις τοποθετήθηκαν η μία δίπλα στην άλλη σε απόσταση μερικών εκατοστών μεταξύ τους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3 σε εθνικές επισκοπήσεις και μεγάλες έρευνες τοποθετείται συνήθως ένας ανιχνευτής ανά σημείο, ενώ σε μικρότερες έρευνες και αναφορές με μικρότερο αριθμό δειγματοληψίας χρησιμοποιούνται δύο ανιχνευτές ανά σημείο για να μειωθεί και το σχετικό σφάλμα από τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Ένας άλλος λόγος που το πρωτόκολλο στην παρούσα μελέτη συνιστά τοποθέτηση δύο ανιχνευτών ανά σημείο είναι να εξασφαλιστεί τουλάχιστον μία μέτρηση ανά σημείο σε περίπτωση απώλειας ή φθοράς του ενός ανιχνευτή.



Σχήμα 4.20 Τα δοσίμετρα που χρησιμοποιήθηκαν πριν την έκθεση



Σχήμα 4.21 Οι ανιχνευτές κατά την μαζική προετοιμασία τους πριν κλειστούν στα δοσίμετρα



Σχήμα 4.22 Τα δοσίμετρα συσκευάστηκαν ανά δύο για να εκτεθούν ταυτόχρονα και στο ίδιο σημείο

4.6.3.3 Επιλογή σημείων τοποθέτησης και χρόνος έκθεσης των ανιχνευτών

Ο κάθε συμμετέχων είχε την δυνατότητα να λάβει όσα ζεύγη ανιχνευτών μπορούσε να τοποθετήσει σε μία ή περισσότερες κατοικίες. Επειδή η δειγματοληψία ήταν τυχαία, η τοποθέτηση περιορίστηκε σε ένα ζεύγος ανιχνευτών ανά οικία ώστε να καλυφθούν περισσότερα σημεία δειγματοληψίας. Η έκθεση των ανιχνευτών ξεκίνησε στις 02-06-2011 και ολοκληρώθηκε στις 22-07-2011 με την επιστροφή των τελευταίων δοσιμέτρων. Ακολουθώντας τα αντίστοιχα πρωτόκολλα των χωρών της Ε.Ε. οι ανιχνευτές τοποθετήθηκαν στο δωμάτιο που κατά την κρίση του ιδιοκτήτη ξοδεύει ο ίδιος ή η οικογένειά του περισσότερο χρόνο. Οπότε η σύσταση που έγινε ήταν να τοποθετηθούν κατά

προτίμηση στο υπνοδωμάτιο ή στο καθιστικό. Και σε αυτή την περίπτωση τα δύο δοσίμετρα τοποθετήθηκαν σε απόσταση ενός μέτρου από παράθυρα και πόρτες ακουμπισμένα πάνω σε πάγκο και όχι στο πάτωμα ή σε τοίχο.

Ο χρόνος έκθεσης των δοσιμέτρων ορίστηκε στις 30 ημέρες τουλάχιστο. Μερικά δοσίμετρα εκτέθηκαν για 30 ημέρες και επεστράφησαν έγκαιρα ενώ άλλα δοσίμετρα επεστράφησαν με καθυστέρηση και εκτέθηκαν για περισσότερο χρόνο μέχρι και 47 ημέρες. Αυτό δεν δημιούργησε βέβαια κανένα πρόβλημα αφού πραγματοποιείται αναγωγή κάθε φορά στις ημέρες έκθεσης και εξάγονται ανάλογα τα αποτελέσματα της ραδιενέργειας από την συγκέντρωση ραδονίου στο χώρο. Το γεγονός ότι σχεδιάστηκε ενός μηνός έκθεση και όχι περισσότερο στηρίχθηκε σε τρεις λόγους. Πρώτο, έκθεση ενός μήνα έχουν ακολουθήσει και άλλες έρευνες στο εξωτερικό και στην Ελλάδα (βλ. κεφ. 3) με περιορισμένο αριθμό δειγματοληψίας όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση. Έκθεση τριμήνου ή εξαμήνου πραγματοποιείται συνήθως σε εθνικές επισκοπήσεις ή μεγάλου βεληνεκούς μελέτες. Δεύτερο, η μέτρηση των ιχνών κάθε πολυμερούς συμφωνήθηκε να γίνει δύο φορές για την βελτίωση της στατιστικής αφού το δείγμα είναι περιορισμένο. Τρίτος λόγος ήταν ότι είχε ήδη πραγματοποιηθεί δοκιμαστική έκθεση ίδιου τύπου δοσιμέτρων στο κτίριο Κ για ένα μήνα και τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά.

4.6.3.4 Πρακτικά θέματα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην έρευνα συμμετείχαν άτομα που ανήκαν ή σχετίζονταν άμεσα με τον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. Για τον λόγο αυτό δεν χρειάστηκε να μοιραστεί ενημερωτικό έντυπο σχετικά με το πρόβλημα του ραδονίου και των θυγατρικών σε εσωτερικούς χώρους.

Όμως για λόγους εξασφάλισης της ορθής διαχείρισης των δοσιμέτρων διανεμήθηκε φύλλο οδηγιών (Παράρτημα Α) προς όλους τους συμμετέχοντες. Οι

οδηγίες αφορούσαν στην μεταφορά, τοποθέτηση και χρήση των ανιχνευτικών διατάξεων ώστε πραγματοποιηθεί σωστότερα η μέτρηση.

Επιπρόσθετα μαζί με τα δοσίμετρα και το φύλλο οδηγιών διανεμήθηκε στους συμμετέχοντες ένα ερωτηματολόγιο. Στο ερωτηματολόγιο αναγράφονται στοιχεία που χρειάζονται στην αρχειοθέτηση αλλά στη σύγκριση των αποτελεσμάτων από την μέτρηση. Εκτός από τα στοιχεία διεύθυνσεως κατοικίας και δειγματολήπτη, στο ερωτηματολόγιο αναφέρονται να δωθούν στοιχεία σχετικά με τον τύπο της κατοικίας, το έτος κατασκευής, τον όροφο και τον χώρο που τοποθετήθηκαν τα δοσίμετρα καθώς και οι α/α των δοσιμέτρων η ημερομηνία και ώρα τοποθέτησης και συλλογής (Παράρτημα Β).

Η ενημέρωση έγινε άμεσα και με προσωπική επικοινωνία με τον κάθε ενδιαφερόμενο στον Τομέα. Έτσι η αποστολή και η συλλογή των ανιχνευτικών διατάξεων πραγματοποιήθηκε στο κτίριο Κ όπου βρίσκονταν αποθηκευμένα τα δοσίμετρα ανά ζεύγη στα σακουλάκια στην κατάψυξη του εργαστηρίου.

5 Βασικές πειραματικές διαδικασίες πριν και μετά την έκθεση των ανιχνευτών

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά οι βασικές πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν πριν και μετά την έκθεση των ανιχνευτικών διατάξεων. Αυτές αποτελούν μέρος της μελέτης και είναι απαραίτητες για την έκδοση των αποτελεσμάτων από τα εκτεθειμένα δοσίμετρα. Πρόκειται για την διαδικασία βαθμονόμησης η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας της Π.Κοντάκου (2011) η οποία εκπονήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. Επίσης για την διαδικασία χημικής διάβρωσης (etching) των ανιχνευτών και τέλος για την επαναληπτική μέθοδο καταμέτρησης των ιχνών α-σωματιδίων στην επιφάνεια των ανιχνευτών.

5.1 Η βαθμονόμηση των ανιχνευτών

Η μακροχρόνια έκθεση των ανιχνευτών έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ιχνών από α-ακτινοβολία στην επιφάνεια του CR-39 λόγω της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών που έχουν συσσωρευτεί στον μετρούμενο χώρο. Για να καταστεί δυνατή η ανάγνωση των ιχνών και να εξισωθεί η πυκνότητα των ιχνών ανά επιφάνεια (tracks cm^{-2}) σε ραδιενέργεια στον χώρο (Bq m^{-3}) χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν τέσσερα πειράματα βαθμονόμησης.

Τα πειράματα βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. με τη χρήση θαλάμου έκθεσης ραδονίου. Το εργαστήριο διαθέτει δύο θαλάμους μετρήσεων εκροής ραδονίου όγκου 1.8 m^3 και 8.5 m^3 (σχήμα 5.1). Τα πειράματα διεξήχθησαν στον μεγαλύτερης χωρητικότητας θάλαμο επειδή παρατηρείται λιγότερο το φαινόμενο plate out και με αυτόν τον τρόπο προσεγγίζεται πιο πολύ το μοντέλο ενός εσωτερικού χώρου κατοικίας. Ο θάλαμος εκροής ραδονίου παρείχε την δυνατότητα δημιουργίας ελεγχόμενων

εκθέσεων των ανιχνευτών. Ο θάλαμος ο οποίος κλείνει αεροστεγώς συνδέεται με μία πηγή ^{226}Ra από όπου προέρχεται το ραδόνιο και συνεπώς τα θυγατρικά του. Ανοίγοντας την πηγή το ράδιο αρχίζει και διασπάται με αποτέλεσμα ρυθμίζοντας το χρονικό διάστημα της διάσπασης από μερικές ώρες έως και εβδομάδες στην πηγή να δημιουργούνται διαφορετικές συγκεντρώσεις ραδιενέργειας. Το συγκεντρωμένο ραδόνιο στη συνέχεια διαχέεται στον θάλαμο όπου βρίσκονται τα CR-39 τα οποία εκτίθενται για μερικές ημέρες ανάλογα την προγραμματισμένη έκθεση. Η συγκέντρωση του ραδονίου στο εσωτερικού του θαλάμου παρακολουθείται από μία διάταξη ALPHA-GUARD ενώ ταυτόχρονα μπορούν να ελέγχονται οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσεως του εσωτερικού του θαλάμου. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν τέσσερις (4) εκθέσεις των ανιχνευτών στον θάλαμο εκροής ραδονίου και κάθε έκθεση έγινε με διαφορετική τιμή της συγκέντρωσης ραδονίου. Κάθε φορά εκτέθηκαν πέντε (5) ανιχνευτικές διατάξεις οι οποίες τοποθετήθηκαν σε πέντε διαφορετικά σημεία του θαλάμου (σχήμα 5.2). Μετά την έκθεση τα πολυμερή CR-39 υποβλήθηκαν σε χημική διάβρωση και στη συνέχεια έγινε η καταμέτρηση των ιχνών από α-ακτινοβολία στην επιφάνειά τους. Οι τιμές της βαθμονόμησης που ελήφθησαν από την μεταπτυχιακή εργασία της Π. Κοντάκου ' *Ανάπτυξη μεθόδου ανίχνευσης ραδονίου με χρήση παθητικών ανιχνευτών* ' είναι οι εξής :

A/G	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
Συντ.Βαθμ	1.794	0.033

ΠΗΓΗ	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
Συντ.Βαθμ.	1.949	0.038



Σχήμα 5.1 Ο θάλαμος ραδονίου των 8.5 m³ του Τ.Π.Τ. του Ε.Μ.Π. που χρησιμοποιήθηκε για την έκθεση των ανιχνευτών κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης



Σχήμα 5.2 Η τοποθέτηση πέντε ανιχνευτών σε διαφορετικά σημεία στο εσωτερικό του θαλάμου ραδονίου

5.2 Η διαδικασία χημικής διάβρωσης – etching

Αφού πραγματοποιηθεί η έκθεση των ανιχνευτικών διατάξεων ακολουθεί η διαδικασία της χημικής διάβρωσης των πολυμερών έτσι ώστε να γίνουν ευανάγνωστα τα ίχνη από την α-ακτινοβολία από το ραδόνιο και τα θυγατρικά του στην επιφάνειά τους. Για την διεξαγωγή του etching χρειάζονται σημαντική ποσότητα καυστικού διαβρωτικού διαλύματος, ειδικά πλαστικά ποτήρια ζέσης, ένα λουτρό ύδατος ελεγχόμενης θερμοκρασίας και μία ειδική θήκη (holder) που να συγκρατεί τα πολυμερή CR-39 μέσα στο διάλυμα.

Το καυστικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε είναι NaOH σε στερεά μορφή (σχήμα 5.3). Ακολουθώντας το πρωτόκολλο της TASTRAK το διάλυμα πρέπει να είναι 6.25N NaOH ή αλλιώς 250gr NaOH διαλυμένα σε 1lt αποσταγμένου ύδατος. Η δημιουργία του διαβρωτικού διαλύματος διευκολύνεται με μία αναδευτική συσκευή (σχήμα 5.4) και πρέπει να γίνει προσεκτικά με αργό ρυθμό όντας εξώθερμη αντίδραση.

Όταν το διάλυμα ετοιμαστεί τοποθετείται μέσα σε αυτό η ειδική θήκη με τα εκτεθειμένα πολυμερή. Τα CR-39 προηγουμένως έχουν αφαιρεθεί από τα προστατευτικά κυπελλάκια τα οποία έχουν ανοιχτεί με την βοήθεια μίας μηχανολογικής μέγγενης. Βέβαια το άνοιγμα γίνεται προσεκτικά ώστε να μην φθαρούν τα πολυμερή στο εσωτερικό και σε κάθε περίπτωση δεν υπάρχει επαφή με γυμνά χέρια. Πριν τοποθετηθούν στο holder που θα εισέλθει με την σειρά του στο καυστικό διάλυμα τα CR-39 έχουν καθαριστεί με αποσταγμένο νερό και οινόπνευμα.

Στη συνέχεια το πλαστικό ποτήρι ζέσης που περιέχει το διάλυμα και την θήκη με τους ανιχνευτές εισέρχεται στο θερμό λουτρό το οποίο βρίσκεται ήδη σε θερμοκρασία σταθερή 95 °C. Το ποτήρι με το διάλυμα σταθεροποιείται με την βοήθεια μίας πλαστικής ράβδου ως αντίσταση στις δυνάμεις άνωσης. Η ράβδος είναι από Plexiglas δοκιμασμένη προηγουμένως να αντέχει στην υψηλή θερμοκρασία και τις αναθυμιάσεις από το διαβρωτικό διάλυμα. Για να μην διαρρέουν οι αναθυμιάσεις στο λουτρό και στο δωμάτιο τοποθετείται πριν κλείσει

το λουτρό άλλο ένα προστατευτικό πλαστικό (PTFE) πάνω στο ποτήρι του διαλύματος. Το διάλυμα παραμένει στους 95 °C σταθερά μέσα στο λουτρό για το χρονικό διάστημα μίας ώρας (1 h) (σχήμα 5.6).

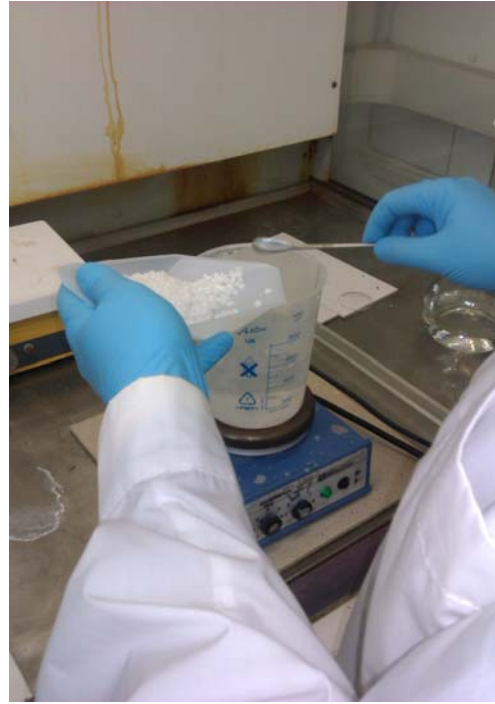
Μετά το πέρας της μίας ώρας η διαδικασία χημικής διάβρωσης έχει ολοκληρωθεί. Το βασικό διάλυμα για να απορριφθεί εξουδετερώνεται με ένα άλλο όξινο διάλυμα. Τα πολυμερή αφαιρούνται από το holder με τη βοήθεια λαβίδας και πλένονται εκ νέου με αποσταγμένο νερό και οινόπνευμα. Τα CR-39 είναι πλέον έτοιμα για το επόμενο στάδιο που είναι η ανάγνωση και το μέτρηση των ιχνών που έχουν εμφανιστεί στην επιφάνειά τους μετά την διαδικασία της χημικής διάβρωσης. Το μέτρηση των ιχνών στην επιφάνεια των πολυμερών γίνεται με την βοήθεια μικροσκοπίου με μία επαναληπτική μέθοδο η οποία θα αναφέρεται παρακάτω.

5.2.1 Πειράματα χημικής επεξεργασίας

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της έκθεσης πραγματοποιήθηκαν συνολικά δέκα (10) διαδικασίες χημικής διάβρωσης. Οι δύο περιελάμβαναν τα δέκα (10) δοσίμετρα που εκτέθησαν εντός του κτιρίου Κ, ενώ οι υπόλοιπες οκτώ τα δοσίμετρα που εκτέθησαν στις κατοικίες. Να σημειωθεί ότι τα δοσίμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση του υποβάθρου συμπεριλήφθηκαν μαζί με τα εκτεθειμένα σε διαφορετικές παρτίδες όμως etching. Πληροφορίες για τα δοσίμετρα, τις παρτίδες και τις ημερομηνίες διεξαγωγής των etching παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6 των αποτελεσμάτων στους πίνακες Χ, ΧΙ.



Σχήμα 5.3 Η ποσότητα του NaOH σε στερεά μορφή που ζυγίζεται πριν την δημιουργία του διαλύματος



Σχήματα 5.4, 5.5 Ο μαγνητικός αναδευτήρας στον οποίο τοποθετείται το ποτήρι όπου περιέχει το διάλυμα για την χημική διάβρωση των ανιχνευτών



Σχήμα 5.6 Διακρίνονται το λουτρό ζέσεως με το ποτήρι που περιλαμβάνει το διάλυμα με τα holder και τα δοσίμετρα. Επίσης φαίνονται η ράβδος που συγκρατεί το ποτήρι και το προστατευτικό καπάκι.

5.3 Η διαδικασία της καταμέτρησης των ίχνών α-ακτινοβολίας

5.3.1 Πειραματικές διατάξεις

Η διαδικασία (track counting) είναι μία μέθοδος η οποία πραγματοποιείται χρονικά μετά την επεξεργασία των CR-39 με χημική διάβρωση. Η ανάγνωση και η καταμέτρηση των α-σωματιδίων στην επιφάνεια των εκτεθειμένων πολυμερών έγινε με τη χρήση επιστημονικού μικροσκοπίου. Πρόκειται για μικροσκόπιο τύπου μετάδοσης Bresser Researcher Trino (Παράρτημα Δ) το οποίο έχει την δυνατότητα να συνδέεται με Η/Υ παρέχοντας ένα ειδικό σύστημα ανάλυσης εικόνας. Το σύστημα αποτελείται από οπτικό μικροσκόπιο με φακούς μεγενθύσεων 4x, 10x, 40x και 100x, και είναι εφοδιασμένο με μία CCD κάμερα με φακό-προσαρμογέα στο μικροσκόπιο ώστε να λαμβάνεται η εικόνα στον Η/Υ (σχήμα 5.7). Το λογισμικό που συνοδεύει την λειτουργία της κάμερας υψηλής ανάλυσης είναι το MicroCamLab που δίνει την δυνατότητα λήψης φωτογραφιών, επεξεργασίας και αποθήκευσης των εικόνων.

Τα ίχνη από α-σωματίδια κάθε πολυμερούς CR-39 μετά την έκθεση και τη διαδικασία χημικής διάβρωσης φαίνονται με την κατάλληλη εστίαση και μεγέθυνση στην επιφάνειά του και έχουν διάφορες διαστάσεις και σχήματα. Η μέτρηση σε κάθε ανιχνευτή πραγματοποιείται μόνο στην άνω επιφάνειά του όπου διακρίνεται ορθά (όχι ανάποδα) ο αύξοντας αριθμός του CR-39 (σχήμα 5.8). Άλλωστε με την άνω επιφάνεια εκτεθειμένη τοποθετήθηκε και στο δοσίμετρο πριν την έκθεση.

Ο τρόπος ανάγνωσης των α-σωματιδίων διαφέρει ανάλογως με τα τεχνικά μέσα που υπάρχουν διαθέσιμα, τον τρόπο εστίασης της εικόνας και το πρωτόκολλο που θα ακολουθήσουν οι πειραματιστές για το ποιο είδος ίχνών θα θεωρηθεί έγκυρο ίχνος από α-σωματίδιο και ποιο όχι. Για παράδειγμα για τη μέτρηση α-

σωματιδίων στην μελέτη της Ιταλίας (βλ. Κεφ. 3) χρησιμοποιήθηκαν ρομποτικοί βραχίονες στο μικροσκόπιο και αναπτύχθηκε ένα ειδικό λογισμικό για την μέτρηση των ιχνών. Επίσης σύμφωνα με τους Durrani & Ilic (1996) τα ίχνη φαίνονται πιο καθαρά όταν η εστίαση τα δείχνει λευκά λόγω του κενού που δημιουργείται από την χημική διάβρωση στο σημείο όπου "κατέπεσε" το α-σωματίδιο. Αυτό βέβαια βρίσκεται στην κρίση των ερευνητών κάθε φορά και των μέσων που χρησιμοποιούν.

Στη συγκεκριμένη μελέτη με χρήση του μικροσκοπίου Bresser η καλύτερη εστίαση επιτεύχθη με την μεγέθυνση 40x ενώ η ανάλυση της κάμερας ήταν ρυθμισμένη στα 640 x 480 pixels. Να σημειωθεί ότι το σύστημα δεν ήταν εφοδιασμένο με κινητήρες βήματος και η σάρωση των ανιχνευτών έγινε χειροκίνητα. Ειδικότερα η τράπεζα του μικροσκοπίου μετακινείτο κάθετα και οριζόντια μέσω των λαβών ρύθμισης μήκους και διασταύρωσης. Η σάρωση στην επιφάνεια των πολυμερών πραγματοποιήθηκε οριζόντια από άκρη σε άκρη σε δέκα (10) σημεία καλύπτοντας συνολικά μία επιφάνεια 0.5185 cm^2 . Με αυτόν τον τρόπο ο αριθμός των μετρούμενων α-σωματιδίων ανά επιφάνεια (a-tracks cm^{-2}) δίνει το μέγεθος της πυκνότητας. Στη συνέχεια από την πυκνότητα E μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τον τύπο $R = \frac{E}{t \cdot c}$ η τιμή της συγκέντρωσης R αν είναι γνωστός ο χρόνος έκθεσης t του ανιχνευτή. Ένα παράδειγμα μετατροπής πυκνότητας των α-ιχνών σε ραδιενέργεια ακολουθεί στην παράγραφο 5.2.3.

5.3.2 Τυποποίηση της μεθόδου

Η διαδικασία τυποποίησης της μεθόδου για την μέτρηση των ιχνών α-σωματιδίων που έχουν προσπέσει στην επιφάνεια των CR-39 πραγματοποιήθηκε με ιδιαίτερη προσοχή λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες που μπορούσαν να επηρεάσουν την ακρίβεια και αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό έγιναν πολλές μετρήσεις στα ίδια και σε διαφορετικά πολυμερή, τα οποία είχαν εκτεθεί σε διαφορετικές τιμές ραδιενέργειας λαμβάνοντας υπόψη ότι η διαδικασία χημικής διάβρωσης ήταν κάθε φορά η ίδια ακολουθώντας το πρωτόκολλο.

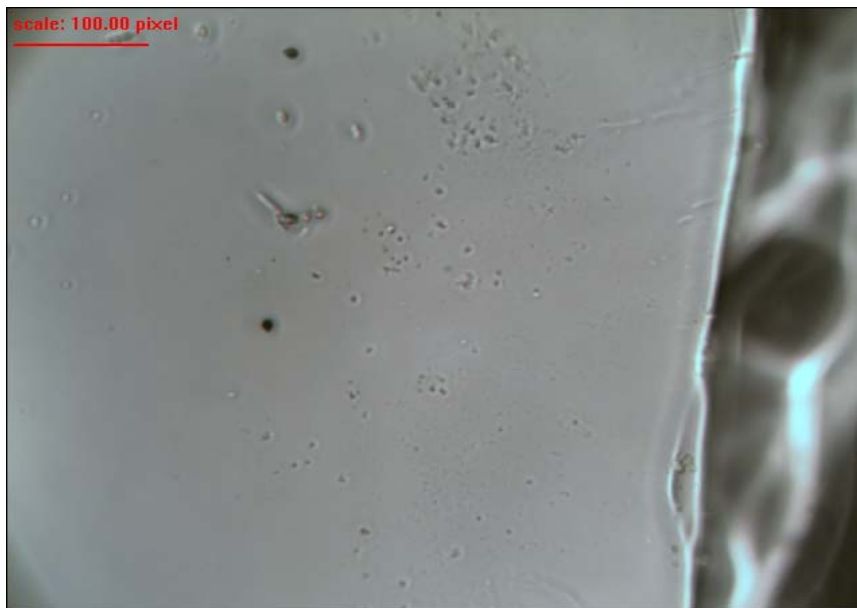
Αρχικά για να τυποποιηθεί η μέθοδος οπτικής καταμέτρησης των α-σωματιδίων στους ανιχνευτές έγινε αναγνώριση των ιχνών από τις διασπάσεις του ραδονίου και των θυγατρικών του. Η αναγνώριση εξασφάλισε την διαφοροποίηση των ιχνών α-σωματιδίων από άλλα ίχνη τα οποία υπάρχουν λόγω ατέλειας του υλικού μετά την χημική διάβρωση ή λόγω μη καθαρότητας της επιφάνειας. Τα ίχνη διασπάσεων ραδονίου στην επιφάνεια του CR-39 εμφανίζονται : α) κυκλικά, β) σχετικώς ελλειψοειδή, γ) αιχμηρούς μορφής, δ) σχήματος πεπλατυσμένου κώνου (Νικολόπουλος 2000) (σχήμα 5.10) Αυτά ελήφθησαν ως έγκυρα και μετρήθηκαν λεπτομερώς σε όλα τα CR-39. Ύστερα από αρκετές δοκιμές εστίασης η πιό ευκρινής εικόνα για την καταμέτρηση των ιχνών επιτεύχθη με φωτεινότητα σε άσπρο φόντο και τα ίχνη α-σωματιδίων εμφανίζονται σε σκούρο χρώμα (σχήμα 5.11). Τα ίχνη τα οποία δεν οφείλονται σε πρόσπτωση α-ακτινοβολίας αλλά σε οτιδήποτε άλλο λαμβάνονται ως θόρυβος και έχουν είτε ακανόνιστο σχήμα είτε πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες διαστάσεις σε σχέση με τα ίχνη από α-σωματίδια.



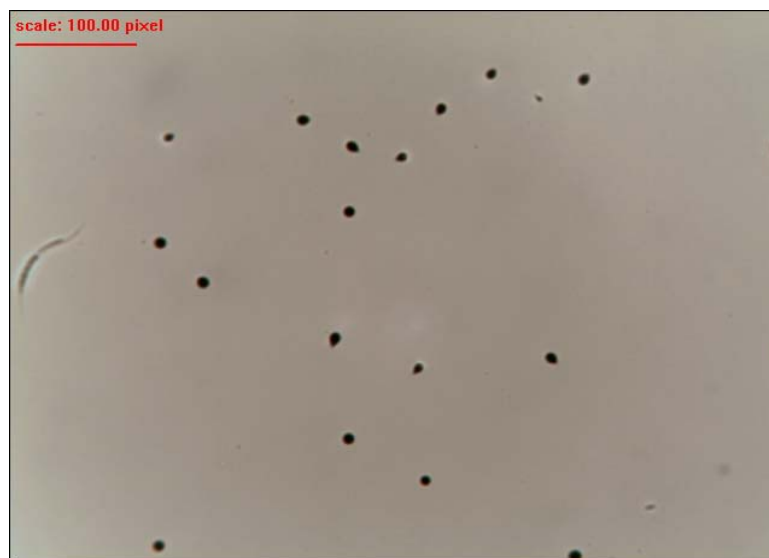
Σχήματα 5.7, 5.8 Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε και η τοποθέτηση του ανιχνευτή στην τράπεζα για την ανάγνωση των ιχνών



Σχήμα 5.9 Οι εκτεθειμένοι ανιχνευτές αφού καταμετρηθούν, ταξινομούνται και φυλάσσονται με βάση τον αύξοντα αριθμό τους σε ειδικές πλαστικές θήκες.



Σχήμα 5.10 Η φωτογραφία ελήφθη από την κάμερα του μικροσκοπίου η οποία συνδεόταν με τον H/Y. Διακρίνονται δύο ίχνη από α -σωματίδια με σκούρα απόχρωση. Το ένα παρουσιάζει ελλειψοειδή μορφή και το άλλο κυκλική. Επίσης δεξιά φαίνεται η άκρη (όριο) της επιφάνειας του ανιχνευτή.



Σχήμα 5.11 Και εδώ διακρίνονται α -tracks με σκούρο χρώμα. Η διαφορετική γωνία πρόσπτωσης τους στην επιφάνεια του ανιχνευτή δίνει τη διαφορετικότητα στο σχήμα των ιχνών κάθε φορά.

5.3.3 Παράδειγμα μετατροπής πυκνότητας ιχνών σε ραδιενέργεια

Έστω ότι στην μετρούμενη επιφάνεια ενός εκτεθειμένου CR-39 η οποία είναι 0.5185 cm^2 καταγράφησαν 39 ίχνη α-σωματιδίων.

Η πυκνότητα τότε των α-σωματιδίων ανά τετραγωνικό εκατοστό επιφάνειας είναι $75.22 \text{ tracks cm}^{-2}$.

Έστω ότι ο συντελεστής βαθμονόμησης έχει υπολογιστεί 1.788 και η μέτρηση υποβάθρου έχει δώσει $33.2 \text{ tracks cm}^{-2}$.

Η καθαρή πυκνότητα υπολογίζεται $75.22 - 33.2 = 42.02 \text{ tracks cm}^{-2}$.

Έστω πάλι ότι ο ανιχνευτής είχε εκτεθεί για 31 ημέρες.

Ισχύει γενικά ο τύπος :

$$R = \frac{E}{t \cdot c}$$

Όπου R : η μέση συγκέντρωση ραδιενέργειας

E : η πυκνότητα από την έκθεση

t : ο χρόνος έκθεσης

c : συντελεστής βαθμονόμησης

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση για :

$$E = 42.02$$

$$c = 1.788$$

$$t = 24 \text{ hours} \times 31 \text{ days}$$

και πολλαπλασιάζοντας x 1000 ώστε να προκύψουν Bq αντί για kBq έχουμε :

$$R = 32 \text{ Bq m}^{-3}$$

η οποία είναι η ζητούμενη μέση συγκέντρωση ραδονίου στον μετρούμενο χώρο.

5.3.4 Μέτρηση υποβάθρου

Η διαδικασία της βαθμονόμησης περιλαμβάνει την αντιστοίχιση της ραδιενέργειας με τα μετρούμενα ίχνη. Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις υποβάθρου δηλαδή μετρήθηκαν CR-39 τα οποία ήταν μη εκτεθειμένα και είχαν υποστεί μόνο χημική διάβρωση. Πέντε CR-39 (2436-2440) μετρήθηκαν δύο φορές από δύο πειραματιστές (Κοντάκου-Ελμαλής) και άλλα τέσσερα (4) CR-39 (2512-2513-2514-2515) μετρήθηκαν δύο φορές από έναν πειραματιστή (Ελμαλής). Τα αποτελέσματα της μέτρησης υποβάθρου έδωσαν πολύ κοντινά αποτελέσματα και με τα λοιπά αποτελέσματα της βαθμονόμησης παρατίθενται παρακάτω.

6 Ανάλυση των αποτελεσμάτων της έκθεσης

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από την έκθεση των ανιχνευτών στο κτίριο K και τις κατοικίες. Στο κτίριο K εκτέθηκαν δέκα (10) ανιχνευτές και στις κατοικίες 56 ανιχνευτές από τους οποίους οι δύο απωλέσθησαν (2480-2481), οπότε τα αποτελέσματα αφορούν τους 54. Επίσης κατά τη διαδικασία προσδιορισμού του υποβάθρου (background) χρησιμοποιήθηκαν εννέα (9) ανιχνευτές οι οποίοι δεν εκτέθηκαν, υποβλήθησαν σε διαδικασία χημικής διάβρωσης και στη συνέχεια καταμετρήθηκαν τα ίχνη από α-σωματίδια στην επιφάνειά τους.

Αρχικά αναφέρονται τα αποτελέσματα από την καταμέτρηση του υποβάθρου επειδή τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της τιμής της μέσης συγκέντρωσης στους εσωτερικούς χώρους όπου εκτέθηκαν οι ανιχνευτές. Συγκεκριμένα στην περίπτωση προσδιορισμού του υποβάθρου μετράται η πυκνότητα των α-ιχνών που παρουσιάζονται στην επιφάνεια των ανιχνευτών χωρίς έκθεση. Η πυκνότητα των ιχνών από α-ακτινοβολία είναι το πλήθος των ιχνών που καταμετρήθηκαν ανά τετραγωνικό εκατοστό.

Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις εκθέσεις όπως η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης του ραδονίου, το ιστόγραμμα της κατανομής καθώς και στατιστικά τεστ σύγκρισης τιμών με διάφορα μεγέθη.

Να σημειωθεί ότι στους υπολογισμούς της συγκέντρωσης του ραδονίου δεν ελήφθη το θορόνιο ^{220}Rn . Το θορόνιο λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής (55 sec) δεν προλαβαίνει να διαχυθεί στο χώρο. Τα συγκεκριμένα δοσίμετρα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία επιτρέπουν τη διάχυση του ατμοσφαιρικού αέρα στο εσωτερικό της διάταξης, οπότε η συγκέντρωση του ^{220}Rn είναι αναμενόμενο να είναι μη συγκρίσιμη σε σχέση με αυτή του ^{222}Rn .

6.1 Αποτελέσματα προσδιορισμού του υποβάθρου

Ο προσδιορισμός της τιμής του υποβάθρου είναι μια απαραίτητη διαδικασία για να διασφαλιστεί ποιοτικά η ορθότητα των αποτελεσμάτων της τιμής της συγκέντρωσης του ραδονίου σε κάθε περίπτωση. Σκοπός είναι ο προσδιορισμός μίας μέσης τιμής της πυκνότητας που εμφανίζονται τα α-σωματίδια στην επιφάνεια των μη εκτεθειμένων ανιχνευτών. Αυτή η τιμή αφαιρείται κάθε φορά από την καταμετρούμενη τιμή της πυκνότητας των α-σωματιδίων στους εκτεθειμένους ανιχνευτές για την εύρεση της συγκέντρωσης του ραδονίου.

Στον παρακάτω πίνακα III παρατίθενται τα αποτελέσματα της καταμέτρησης στους μη εκτεθειμένους ανιχνευτές για τον προσδιορισμό της μέσης πυκνότητας του υποβάθρου.

ΠΙΝΑΚΑΣ III

A/A Δοσιμέτρου	Πλήθος α-tracks που μετρήθηκαν	Επιφάνεια σάρωσης (cm ²)	Πυκνότητα (tracks cm ⁻²)
2512	17	0.5185	32.79
2513	13	0.5185	25.07
2514	18	0.5185	34.72
2515	24	0.5185	46.29
2436	17	0.5185	32.79
2437	16	0.5185	30.86
2438	25	0.5185	48.22
2439	12	0.5185	23.14
2440	13	0.5185	25.07

Από την τελευταία στήλη του πίνακα υπολογίστηκε η μέση τιμή της πυκνότητας των a-tracks υποβάθρου και η τυπική απόκλιση της τιμής :

Μέση Τιμή πυκνότητας υποβάθρου : 33.2 tracks cm⁻²

Τυπική Απόκλιση : 8.9 tracks cm⁻²

6.2 Αποτελέσματα μετρήσεων στο κτίριο K

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των ανιχνευτών στο κτίριο K παρατίθενται στους πίνακες που ακολουθούν. Ο Πίνακας IV δείχνει το πλήθος των a-tracks που μετρήθηκαν στην επιφάνεια των εκτεθειμένων ανιχνευτών αρχικά σε επιφάνεια 0.5185 cm² και στη συνέχεια ανά cm². Στην επόμενη στήλη έγινε ο υπολογισμός της καθαρής πυκνότητας των α-σωματιδίων με αφαίρεση της τιμής του υποβάθρου που υπολογίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο ίση με 33.2 a-tracks cm⁻².

ΠΙΝΑΚΑΣ IV

A/A Δοσιμέτρου	ΑΙΘΟΥΣΑ	Πλήθος a-tracks που μετρήθηκαν	Επιφάνεια σάρωσης (cm ²)	Πυκνότητα (a-tracks cm ⁻²)	Καθαρή πυκνότητα (a-tracks cm ⁻²)
2447	Φασματοσκοπία	24	0.5185	46.29	13.07
2448	Ακτίνες Χ	44	0.5185	84.86	51.64
2449	Αποθήκη Δειγμάτων	32	0.5185	61.72	28.50
2450	Αποθήκη Χαρτιού	24	0.5185	46.29	13.07
2451	Ραδιογραφία	43	0.5185	82.93	49.72
2452	Ραδόνιο	36	0.5185	69.43	36.22
2453	Κεντρικός Χώρος	22	0.5185	42.43	9.21
2454	Γραφείο ΔΙΚ	27	0.5185	52.07	18.86
2455	Διάδρομος Ορόφου	25	0.5185	48.22	15.00
2456	Προθάλαμος ΕΠΧ	30	0.5185	57.86	24.64

Στον πίνακα V που ακολουθεί έχει γίνει ο υπολογισμός της μέσης τιμής της συγκέντρωσης του ραδονίου σε κάθε εσωτερικό χώρο που εκτέθησαν τα δοσίμετρα από την καθαρή πυκνότητα εμφάνισης των α-ιχνών. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε με την ίδια μέθοδο όπως περιγράφηκε από το παράδειγμα στην παράγραφο 5.3.2. προηγουμένως. Στον πίνακα V έχει υπολογιστεί η συγκέντρωση με δύο διαφορετικές τιμές του συντελεστή βαθμονόμησης. Η μία τιμή αφορά το συντελεστή βαθμονόμησης με βάση τον ανιχνευτή ALPHA-GUARD και η άλλη το συντελεστή βαθμονόμησης με βάση την πηγή. Οι τιμές αυτές ελήφθησαν από την μεταπτυχιακή εργασία της Π. Κοντάκου ' *Ανάπτυξη μεθόδου ανίχνευσης ραδονίου με χρήση παθητικών ανιχνευτών* ' και είναι οι εξής :

A/G	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
Συντ.Βαθμ	1.794	0.033

ΠΗΓΗ	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
Συντ.Βαθμ.	1.949	0.038

ΠΙΝΑΚΑΣ V

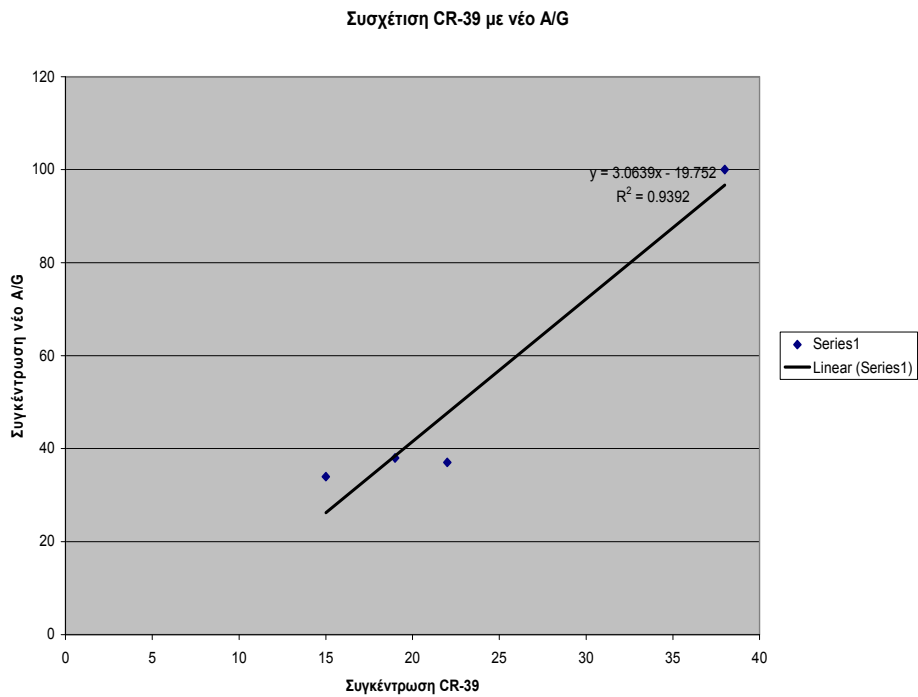
A/A Δοσιμέτρου	ΑΙΘΟΥΣΑ	Καθαρή πυκνότητα (a-tracks cm⁻²)	Υπολογισμός συγκέντρωσης βάση του σ.β. του A/G	Υπολογισμός συγκέντρωσης βάση του σ.β. της πηγής	Μέτρηση από παλαιό A/G	Μέτρηση από νέο A/G
2447	Φασματοσκοπία	13.07	-	-	68	50
2448	Ακτίνες Χ	51.64	40	29	67	
2449	Αποθήκη Δειγμάτων	28.50	22	16	53	37
2450	Αποθήκη Χαρτιού	13.07	-	-	54	37
2451	Ραδιογραφία	49.72	38	27	117	100
2452	Ραδόνιο	36.22	28	20	41	
2453	Κεντρικός Χώρος	9.21	-	-	38	
2454	Γραφείο ΔΙΚ	18.86	15	11	50	34
2455	Διάδρομος Ορόφου	15.00	-	-	43	
2456	Προθάλαμος ΕΠΧ	24.64	19	14	54	38

Επειδή πολλές από τις τιμές της συγκέντρωσης του ραδονίου που μετρήθηκαν σε ορισμένες αίθουσες ήταν κοντά στην τιμή του υποβάθρου πραγματοποιήθηκε στατιστικό t-student test για τη σύγκριση των τιμών αυτών. Το τεστ περιγράφεται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο 6.2.1.

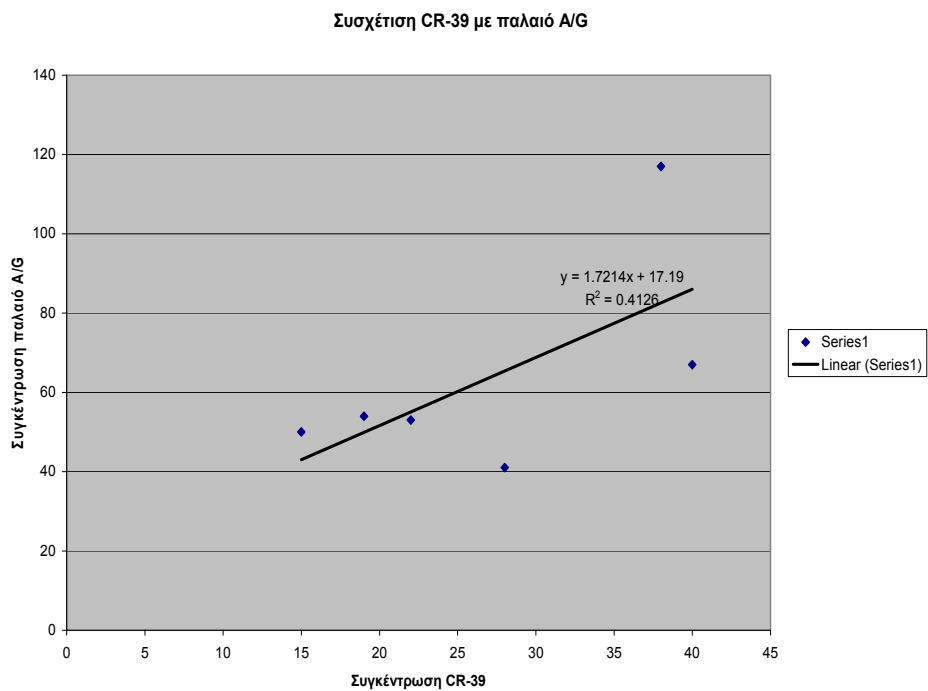
Οι δύο τελευταίες στήλες του πίνακα V αναφέρουν τις τιμές της συγκέντρωσης που μετρήθηκαν όχι από τους παθητικούς ανιχνευτές αλλά από τις διατάξεις ALPHA-GUARD οι οποίες τοποθετήθηκαν στα ίδια σημεία με τα CR-39 για ένα 24ωρο όμως. Η απόκλιση που παρατηρείται στις τιμές της συγκέντρωσης ραδονίου μεταξύ των παθητικών ανιχνευτών και των ενεργητικών διατάξεων στα ίδια σημεία οφείλεται στη διαφορά διάρκειας έκθεσης των ανιχνευτών και στη χρονική περίοδο έκθεσης αυτών.

Συγκεκριμένα οι παθητικοί ανιχνευτές CR-39 εκτέθησαν για 30 ημέρες μήνα Φεβρουάριο ενώ οι A/G μέτρησαν για μία ημέρα τον μήνα Απρίλιο. Να σημειωθεί πως το γεγονός ότι είναι πιο υψηλές οι τιμές που μετρήσανε οι ενεργητικές διατάξεις μπορεί να οφείλεται ότι τον μήνα Απρίλιο οι συνθήκες εξαερισμού στο κτίριο K ήταν διαφορετικές λόγω της περιόδου των διακοπών του πάσχα όπου πολλές αίθουσες έμειναν κλειστές. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ότι η πολλαπλή συσχέτιση (R^2) από τις μετρήσεις με τους παθητικούς ανιχνευτές σε σχέση με αυτές από τα A/G είναι αρκετά καλή ανεξαρτήτου γεγονότος ότι παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση.

Συγκεκριμένα κατά την σύγκριση των τιμών συγκέντρωσης από τα CR-39 με αυτές από το νέο A/G ο συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης βρέθηκε $R^2 = 0.9892$ πολύ κοντά στη μονάδα. Ο αντίστοιχος συντελεστής συσχέτισης της συγκέντρωσης μεταξύ CR-39 και παλαιού A/G βρέθηκε $R^2 = 0.4126$. Επειδή όμως οι τιμές των πολλαπλών συντελεστών συσχέτισης προέκυψαν με μικρό δείγμα συγκεντρώσεων δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συγκεκριμένο συμπέρασμα με ασφάλεια.



Σχήμα 6.1 Η συσχέτιση των συγκεντρώσεων μεταξύ CR-39 και του νέου A/G



Σχήμα 6.2 Η συσχέτιση των συγκεντρώσεων που μετρήθηκαν από το CR-39 και το παλαιό A/G

6.2.1 Στατιστικό t-test

Σύμφωνα με αυτό το τεστ σκοπός είναι ο υπολογισμός της μεταβλητής t_0 και η σύγκρισή της με την t κρίσιμη τιμή. Με χρήση του παρακάτω τύπου από τον πίνακα 3.6.i. σελ. 92 από το βιβλίο Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών (Σιμόπουλος 1989) υπολογίστηκε το t_0 και συγκρίθηκε με την κρίσιμη τιμή $t = 1.86$ που αντιστοιχεί σε βαθμούς ελευθερίας $v=8$ (από πίνακα στο παράρτημα του ίδιου βιβλίου).

$$t_0 = \frac{(x_1 - x_2) - d_0}{s \sqrt{\frac{(1/N_1)}{(1/N_2)}}}$$

Στου υπολογισμού ελήφθη ότι :

$$d_0 = 0$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 \quad , \text{ οι τυπικές αποκλίσεις}$$

$$v = N_1 + N_2 - 2 \quad , \text{ οι βαθμοί ελευθερίας}$$

Ο πληθυσμός $N_1 = 9$ επειδή είναι 9 τα δοσίμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση του υποβάθρου. Επίσης $N_2 = 1$ επειδή στην περίπτωση του κτιρίου K τοποθετήθηκε ένα δοσίμετρο ανά σημείο δηλαδή μία μέτρηση. Στην περίπτωση των κατοικιών $N_2 = 2$ επειδή υπήρχαν δύο δοσίμετρα ανά σημείο άρα και δύο μετρήσεις. Έτσι οι βαθμοί ελευθερίας για το κτίριο K είναι $v=8$ και αντιστοιχούν σε t κρίσιμο = 1.86 ενώ για την περίπτωση των κατοικιών $v=9$ και t κρίσιμο = 1.833. Σε κάθε περίπτωση αν $t_0 < t_{0.95\%}$ τότε λαμβάνεται ότι δεν μπορεί να ανιχνευτεί η συγκέντρωση επειδή είναι πολύ κοντά σε αυτή του υποβάθρου.

Στον πίνακα VI παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το τεστ και φαίνεται έτσι σε ποιά αίθουσα είναι μετρήσιμη η συγκέντρωση και που όχι.

ΠΙΝΑΚΑΣ VI

A/A Δοσιμέτρου	ΑΙΘΟΥΣΑ	t0	Αποτέλεσμα Ελέγχου
2447	Φασματοσκοπία	1.39	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΕΤΑΙ
2448	Ακτίνες Χ	5.49	ΑΝΙΧΝΕΥΕΤΑΙ
2449	Αποθήκη Δειγμάτων	3.03	ΑΝΙΧΝΕΥΕΤΑΙ
2450	Αποθήκη Χαρτιού	1.39	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΕΤΑΙ
2451	Ραδιογραφία	5.28	ΑΝΙΧΝΕΥΕΤΑΙ
2452	Ραδόνιο	3.85	ΑΝΙΧΝΕΥΕΤΑΙ
2453	Κεντρικός Χώρος	0.98	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΕΤΑΙ
2454	Γραφείο ΔΙΚ	2.00	ΑΝΙΧΝΕΥΕΤΑΙ
2455	Διάδρομος Ορόφου	1.59	ΔΕΝ ΑΝΙΧΝΕΥΕΤΑΙ
2456	Προθάλαμος ΕΠΧ	2.62	ΑΝΙΧΝΕΥΕΤΑΙ

6.2.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις στο κτίριο K

Με βάση το στατιστικό τεστ του οποίου τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα VI η τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου δεν ήταν ανιχνεύσιμη σε τέσσερις αίθουσες. Οι αίθουσες φασματοσκοπίας και αποθήκη χαρτιού βρίσκονται στο υπόγειο μεν αλλά επικοινωνούνε μεταξύ τους και υπάρχει σύστημα εξαερισμού με αποτέλεσμα να ανανεώνεται ο αέρας και να μην συγκεντρώνεται το ραδόνιο σημαντικά στους χώρους αυτούς. Επίσης στον κεντρικό χώρο και στον διάδρομο του ορόφου είναι λογικό να μην παρουσιάζει η συγκέντρωση του ραδονίου σημαντικές τιμές επειδή πρόκειται για ανοικτούς χώρους. Η πιο υψηλή συγκέντρωση μετρήθηκε στην αίθουσα ραδιογραφίας η οποία βρίσκεται στο χαμηλότερο υπόγειο του κτιρίου.

Ποιοτικά τα αποτελέσματα συμφωνούν με τα αναμενόμενα επειδή υψηλότερες συγκεντρώσεις μετρήθηκαν στις κλειστές αίθουσες που δεν υπάρχει σύστημα

εξαερισμού και σε αυτές στο υπόγειο, ενώ χαμηλότερες σε αυτές που βρίσκονται σε ανοικτό χώρο ή στον όροφο.

6.3 Αποτελέσματα των μετρήσεων στις κατοικίες

Στον παρακάτω πίνακα VII παρατίθενται τα αποτελέσματα από τη μέτρηση της συγκέντρωσης στις κατοικίες. Να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό των μέσων τιμών της συγκέντρωσης ανά σημείο και συνολικά χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής βαθμονόμησης από το ALPHA-GUARD (=1.794) και όχι από την πηγή. Αυτή η επιλογή έγινε αυθαίρετα επειδή οι δύο τιμές των συντελεστών είναι αρκετά κοντά και δεν υπήρχε μεγάλη διαφορά στον υπολογισμό των μέσων τιμών συγκέντρωσης. Η συνολική μέση τιμή και τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης από όλα τα σημεία δειγματοληψίας υπολογίστηκε :

Μ.Τ. Συγκέντρωσης : 38.04 Bq m⁻³

Τ.Α. Συγκέντρωσης : 84.84 Bq m⁻³

ΠΙΝΑΚΑΣ VII

A/A Δοσιμέτρου	a- tracks/0.5185 cm ²	Πυκνότητα (tracks cm ⁻²)	Συγκέντρωση (Bq m ⁻³)	Διάρκεια Έκθεσης (ημέρες)	Μ.Ο. Συγκέντρωση (Bq m ⁻³)
2472	72	138.86	65	38	68
2473	78	150.43	72	38	
2474	32	61.72	18	37	15
2475	28	54.00	13	37	
2476	26	50.14	11	36	11
2477	26	50.14	11	36	
2478	34	65.57	21	36	18
2479	30	57.86	16	36	
2482	29	55.93	15	36	13
2483	26	50.14	11	36	
2484	53	102.22	35	46	30
2485	43	82.93	25	46	

ΠΙΝΑΚΑΣ VII (συνέχεια)

Α/Α Δοσιμέτρου	a- tracks/0.5185 cm ²	Πυκνότητα (tracks cm ⁻²)	Συγκέντρωση (Bq m ⁻³)	Διάρκεια Έκθεσης (ημέρες)	Μ.Ο. Συγκέντρωση (Bq m ⁻³)
2486	39	75.22	21	46	16
2487	29	55.93	11	46	
2488	32	61.72	18	37	17
2489	30	57.86	15	37	
2490	28	54.00	14	34	18
2491	34	65.57	22	34	
2492	31	59.79	17	36	20
2493	35	67.50	22	36	
2494	27	52.07	14	32	19
2495	34	65.57	23	32	
2496	28	54.00	15	32	14
2497	26	50.14	12	32	
2498	36	69.43	20	43	22
2499	40	77.15	24	43	
2500	53	102.22	43	37	39
2501	46	88.72	35	37	
2502	43	82.93	37	31	31
2503	34	65.57	24	31	
2504	24	46.29	9	33	12
2505	28	54.00	15	33	
2506	26	50.14	12	33	11
2507	25	48.22	11	33	
2508	26	50.14	12	34	13
2509	28	54.00	14	34	
2510	31	59.79	21	30	27
2511	39	75.22	33	30	
2516	25	48.22	11	32	12
2517	26	50.14	12	32	
2518	422	813.89	490	37	466
2519	383	738.67	443	37	
2524	30	57.86	18	31	17
2525	28	54.00	16	31	
2526	27	52.07	13	34	14
2527	29	55.93	16	34	
2528	58	111.86	49	37	46
2529	52	100.29	42	37	
2530	34	65.57	25	30	24
2531	32	61.72	22	30	
2548	23	44.36	8	34	12
2549	29	55.93	16	34	
2554	39	75.22	21	46	22
2555	41	79.07	23	46	

6.3.1 Στατιστικό t-test για ανίχνευση ή μη ανίχνευση στις κατοικίες

Και σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιήθηκε t-test όπως στο προηγούμενο υποκεφάλαιο που αφορούσε τις μετρήσεις στο κτίριο Κ για το αν θα γίνει αποδεκτή ως ανιχνεύσιμη η κάθε τιμή της συγκέντρωσης ραδονίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα VIII και φαίνεται ότι όλες οι τιμές είναι αποδεκτές ως ανιχνεύσιμες επειδή βρίσκονται πάνω από την κρίσιμη τιμή $t=1.833$ που αντιστοιχεί σε βαθμούς ελευθερίας $v=9$.

ΠΙΝΑΚΑΣ VIII

A/A Δοσιμέτρου	M.O. Πυκνότητα (tracks/cm ²)	t0	M.O. Συγκέντρωση (Bq m ⁻³)
2472-2473	144.64	15.96	68
2474-2475	57.85	3.53	15
2476-2477	50.14	2.42	11
2478-2479	61.71	4.08	18
2482-2483	53.03	2.84	13
2484-2485	92.57	8.50	30
2486-2487	65.57	4.63	16
2488-2489	59.78	3.81	17
2490-2491	59.78	3.81	18
2492-2493	63.64	4.36	20
2494-2495	58.82	3.67	19
2496-2497	52.07	2.70	14
2498-2499	73.28	5.74	22
2500-2501	95.46	8.92	39
2502-2503	74.25	5.88	31
2504-2505	50.14	2.42	12
2506-2507	49.18	2.29	11
2508-2509	52.07	2.70	13
2510-2511	67.50	4.91	27
2516-2517	49.18	2.29	12
2518-2519	776.27	106.43	466
2524-2525	55.93	3.25	17
2526-2527	54.00	2.98	14
2528-2529	106.07	10.44	46
2530-2531	63.64	4.36	24
2548-2549	50.14	2.42	12
2554-2555	77.14	6.29	22

6.3.2 Στατιστικά στοιχεία από την δειγματοληψία

Στον επόμενος πίνακα ΙΧ, Χ, ΧΙ παρουσιάζονται κάποια στατιστικά στοιχεία σχετικά με το επίπεδο του ορόφου που πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία, επίσης με την παρτίδα που έγινε στα δοσίμετρα η διαδικασία χημικής διάβρωσης και τέλος με το έτος κατασκευής των κατοικιών. Συσχέτιση με την παρτίδα της χημικής διάβρωσης και του έτους κατασκευής σε συνάρτηση με την συγκέντρωση δεν ευρέθη (σχήμα 6.3). Αντίθετα παρατηρήθηκε όπως είναι αναμενόμενο διαφορά της μέσης τιμής της συγκέντρωσης στα υπόγεια και τα ισόγεια σε σχέση με την μέση τιμή που μετρήθηκε στους ορόφους.

Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν οι τιμές :

Μέση Τιμή της συγκέντρωσης στα υπόγεια και ισόγεια : 70.18 Bq m⁻³

Τυπική Απόκλιση : 126.10 Bq m⁻³

Μέση Τιμή της συγκέντρωσης στους ορόφους : 15.94 Bq m⁻³

Τυπική Απόκλιση : 4.08 Bq m⁻³

6.3.3 Στατιστικό t-test στις συγκεντρώσεις υπογείων-ισογείων με τους ορόφους

Όπως έχει αναφερθεί οι κατοικίες οπότε και η θέση τοποθέτησης και έκθεσης των δοσιμέτρων βρισκόντουσαν είτε σε υπόγεια (Υ), είτε σε ισόγεια (Ι), είτε σε ορόφους (Ο). Προκειμένου να συγκρίνουμε τη διαφορετικότητα των τιμών αναλόγως με την θέση δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκε t-test. Ως ένα δείγμα υπολογίστηκαν ελήφθησαν οι συγκεντρώσεις από τα υπόγεια και τα ισόγεια μαζί, ενώ ως δεύτερο και συγκρίσιμο δείγμα ελήφθησαν αυτές από τα υπόγεια. Τα δείγματα από τις τιμές των συγκεντρώσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα ΙΧ:

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΧ

Συγκέντρωση στα Υπόγεια και Ισόγεια	Συγκέντρωση στους Ορόφους
68	15
30	11
16	18
18	13
19	17
39	20
31	14
12	22
27	11
466	13
46	12
	17
	14
	24
	12
	22

Οι τιμές της συγκέντρωσης αναφέρονται σε $Bq\ m^{-3}$.

Εφαρμόζοντας το στατιστικό τεστ υπολογίστηκε η τιμή : **t = 0.20**

Η κρίσιμη τιμή για $\nu = 23$ βαθμούς ελευθερίας είναι **2.06**

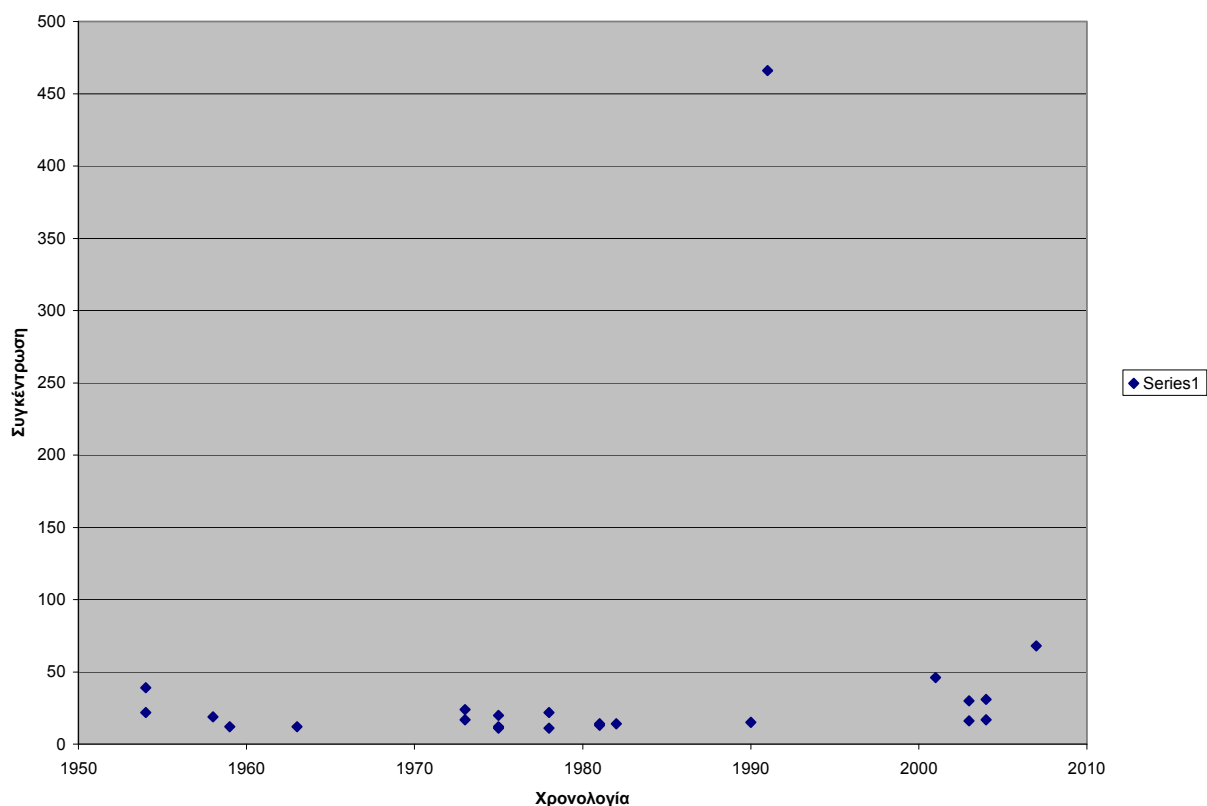
Το αποτέλεσμα έδειξε $0.20 < 2.06$, οπότε η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται. Από το αποτέλεσμα προκύπτει ότι η διαφορά μεταξύ υπογείων-ισογείων με τους ορόφους η οποία αναμενόταν από την θεωρία να υπάρχει, φαίνεται από τη διαφορά των μέσων τιμών της συγκέντρωσης αλλά δεν επιβεβαιώνεται από το t-test, καθώς το στατιστικό τεστ στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχει επαρκή στατιστική ισχύ.

ΠΙΝΑΚΑΣ Χ

Α/Α Δοσιμέτρου	Τύπος Κατοικίας	Παρτίδα Etching	Έτος Κατασκευής Κατοικίας
2472-2473	I	4	2007
2474-2475	O	3	1990
2476-2477	O	3	1978
2478-2479	O	4	
2482-2483	O	3	
2484-2485	Y	6	2003
2486-2487	I	6	2003
2488-2489	O	2	1973
2490-2491	I	2	
2492-2493	O	7	1975
2494-2495	I	2	1958
2496-2497	O	2	1982
2498-2499	O	6	1954
2500-2501	Y	6	1954
2502-2503	Y	1	2004
2504-2505	I	5	1975
2506-2507	O	7	1975
2508-2509	O	4	1981
2510-2511	I	5	
2516-2517	O	3	1959
2518-2519	Y	7	1991
2524-2525	O	1	2004
2526-2527	O	4	1981
2528-2529	Y	5	2001
2530-2531	O	3	1973
2548-2549	O	2	1963
2554-2555	O	8	1978

ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΙ

παρτίδα	ημ/νία etching
1	7/6/2011
2	12/7/2011
3	12/7/2011
4	19/7/2011
5	19/7/2011
6	19/7/2011
7	21/7/2011
8	25/7/2011



Σχήμα 6.3 Παρατηρείται η τυχαιότητα στο διάγραμμα συγκέντρωσης-χρονολογίας κατασκευής των κατοικιών χωρίς να ακολουθεί καμία κατανομή.

6.3.4 Στατιστικό t-test δείγματος – αντιδείγματος

Κατά την έκθεση των ανιχνευτών στους εσωτερικούς χώρους των κατοικιών τοποθετήθηκαν ανά σημείο όπως έχει αναφερθεί παραπάνω δύο ανιχνευτές ως δείγμα – αντιδείγμα. Επειδή οι ανιχνευτές τοποθετήθηκαν ανά ζεύγη ένας με μονό αύξοντα αριθμό και ένας με ζυγό αριθμό μπορούν να θεωρηθούν οι ανιχνευτές με μονό αριθμό ως δείγμα και αυτοί με ζυγό αριθμό ως αντιδείγμα. Προκειμένου να διαπιστωθεί πιθανή απόκλιση στις τιμές του δείγματος με αυτές του αντιδείγματος πραγματοποιήθηκε t-test με αυτά τα δύο μεγέθη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το $t = 0.294$ με κρίσιμη τιμή το 2.00 . Δηλαδή πέρασε

το στατιστικό τεστ με επιτυχία επειδή $0.294 < 2.00$ και δεν υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών του δείγματος με το αντιδείγμα.

6.3.5 Στατιστικό χ^2 -test ελέγχου προσαρμογής δείγματος σε κατανομή

Το συγκεκριμένο στατιστικό τεστ πραγματοποιείται για να διαπιστωθεί αν η κατανομή από τις τιμές των συγκεντρώσεων ή τις λογαριθμικές τιμές τους ακολουθούν κανονική κατανομή. Ακολουθώντας την θεωρία που περιγράφει αυτό το τεστ από το βιβλίο Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών (Σιμόπουλος 1989) παρ. 3.7. σελ 110 χωρίστηκαν οι τιμές της συγκέντρωσης σε κλάσεις και στη συνέχεια εφαρμόστηκε ο τύπος :

$$\chi^2 = \sum^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i}$$

Για τις συγκεντρώσεις έχουμε :

ΠΙΝΑΚΑΣ XII

Συγκέντρωση Bq m ⁻³	Πλήθος
0	0
15	17
30	43
45	49
60	50
75	52
500	54

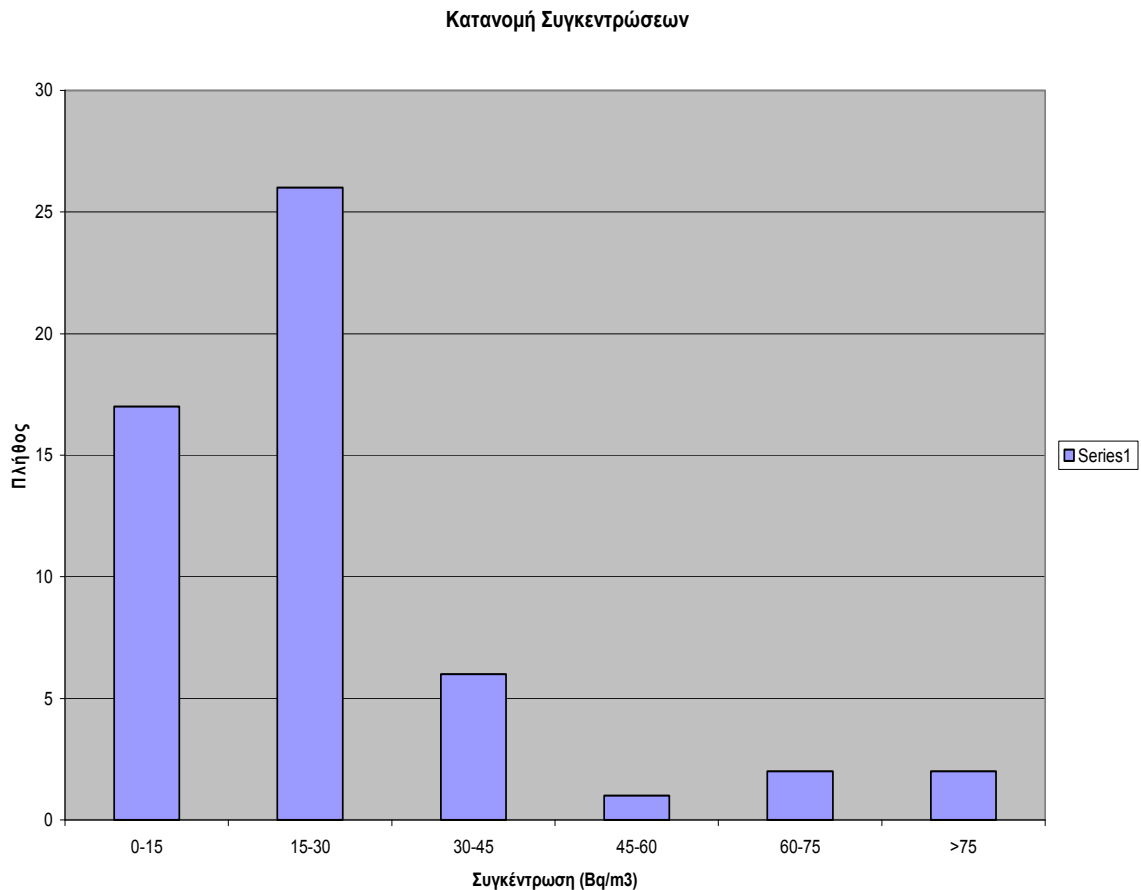
Στον πίνακα XII η δεξιά στήλη δείχνει το πλήθος των ανιχνευτών που ανίχνευσαν μικρότερη από την αναγραφόμενη τιμή συγκέντρωσης της αριστερής στήλης. Δηλαδή 50 ανιχνευτές ανίχνευσαν συγκεντρώσεις κάτω από 60 Bq m⁻³.

Έτσι χωρίζονται σε κλάσεις οι τιμές της συγκέντρωσης (αριστερά) που αντιστοιχούν στο πλήθος των ανιχνευτών. Δηλαδή 6 ανιχνευτές παρουσίασαν συγκεντρώσεις 30-45 Bq m⁻³. Να σημειωθεί ότι οι τελευταίες τρεις γραμμές του πίνακα αποτελούν μία κλάση.

ΠΙΝΑΚΑΣ XIII

0-15	17
15-30	26
30-45	6
45-60	1
60-75	2
>75	2

Η κατανομή είναι στο παρακάτω σχήμα :



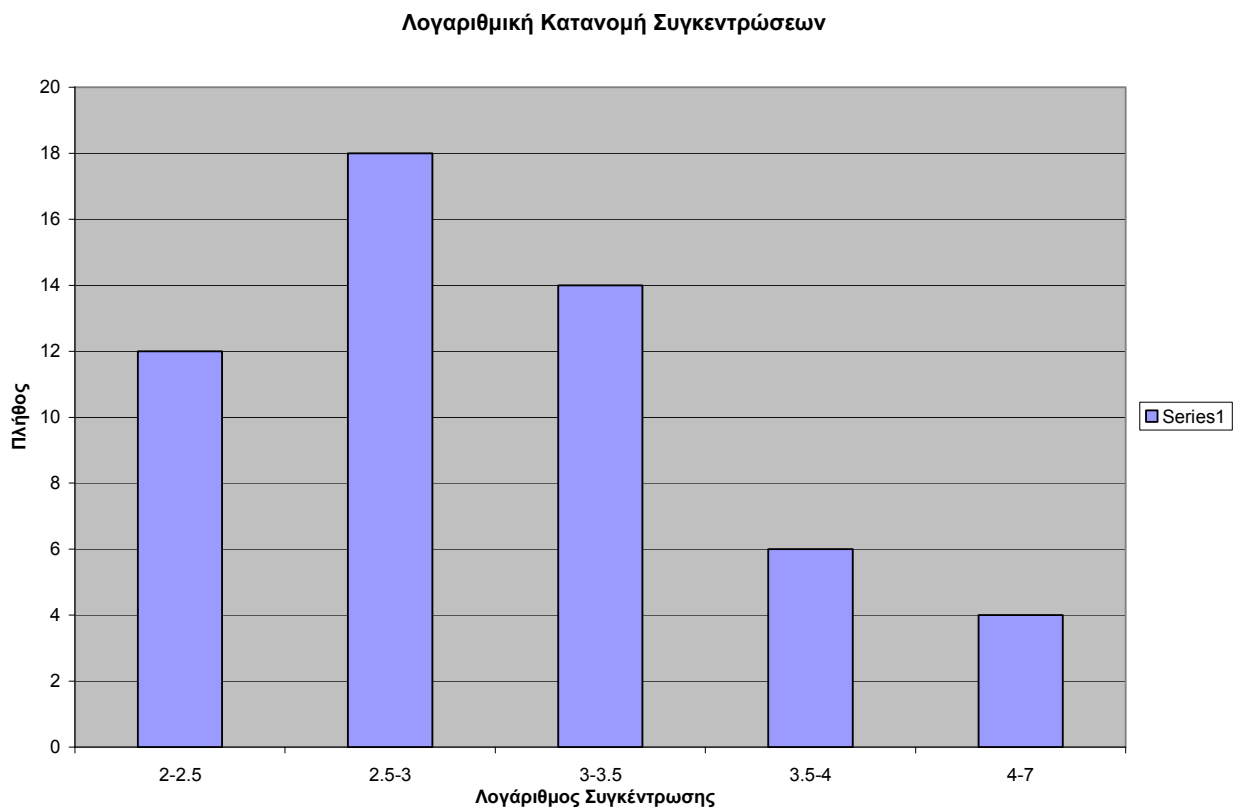
Σχήμα 6.4 Η κατανομή με βάση τις τιμές της συγκέντρωσης που παρατηρήθηκαν

Τώρα αν ληφθούν οι λογαριθμικές τιμές των συγκεντρώσεων έχουμε :

ΠΙΝΑΚΑΣ XIV

Ln(Συγκέντρωσης)	Πλήθος
2	0
2.5	12
3	30
3.5	44
4	50
4.5	52
5	52
5.5	52
6	52
6.5	54
7	54

Με την κατανομή να είναι τώρα στο σχήμα :



Σχήμα 6.5 Η κατανομή με βάση τις λογαριθμικές τιμές των συγκεντρώσεων

Ο παρακάτω πίνακας συμπληρώθηκε με βάση τους τύπους από την θεωρία για την εφαρμογή του χ^2 τεστ.

ΠΙΝΑΚΑΣ XV

κλάση	x_i	x_{i+1}	x_{mi}	πλήθος	$P(z < z_i)$	$P(z < z_{i+1})$	P_i	$N \cdot P_i$	χ^2
2-2.5	2	2.5	2.25	12	0.09	0.24	0.15	8.12	17.74
2.5-3	2.5	3	2.75	18	0.24	0.47	0.24	12.73	25.45
3-3.5	3	3.5	3.25	14	0.47	0.72	0.25	13.31	14.73
3.5-4	3.5	4	3.75	6	0.72	0.89	0.17	9.27	3.88
4-7	4	7	5.5	4	0.89	1.00	0.11	5.94	2.69

M.T. LN	T.A. LN
3.05	0.77

Στο μικρό πινακάκι αναγράφονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των λογαριθμικών τιμών της συγκέντρωσης.

Η τιμή που υπολογίζεται από την τελευταία στήλη είναι : $\chi^2=10.49$ με την κρίσιμη τιμή να είναι **5.99** για $\nu=2$ βαθμούς ελευθερίας που έχει το πρόβλημα. Οπότε δεν περνάει το τεστ επειδή $\chi^2=10.49 > 5.99$ και έτσι δεν ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή.

Επειδή στις μετρήσεις παρουσιάζονται δύο τιμές συγκέντρωσης ραδονίου που αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο και είναι πολύ αυξημένες σε σχέση με τις υπόλοιπες το χ^2 τεστ επαναλήφθηκε χωρίς να λαμβάνονται αυτές οι τιμές στους υπολογισμούς. Τότε ο πίνακας γίνεται :

ΠΙΝΑΚΑΣ XVI

x_i	x_{i+1}	x_{mi}	πλήθος	$P(z < z_i)$	$P(z < z_{i+1})$	P_i	$N \cdot P_i$	χ^2
2	2.5	2.25	12	0.03	0.19	0.16	8.21	17.53
2.5	3	2.75	18	0.19	0.55	0.37	19.12	16.95
3	3.5	3.25	14	0.55	0.88	0.32	16.87	11.62
3.5	4	3.75	6	0.88	0.99	0.11	5.64	6.38
4	7	5.5	2	0.99	1.00	0.01	0.74	5.39

M.T. LN	T.A. LN
2.94	0.49

Η τιμή που υπολογίζεται τώρα με εξαίρεση των τιμών συγκέντρωσης 490 και 443 Bq m⁻³ είναι : $\chi^2 = 5.86 < 5.99$ της κρίσιμης τιμής. Δηλαδή σε αυτή την περίπτωση **ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή** αφού περνάει το στατιστικό τεστ.

6.3.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις στις κατοικίες

Η μέση τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου μετρήθηκε 38 Bq m⁻³ μέσα στα όρια δηλαδή των 200-400 Bq m⁻³ που προβλέπουν οι Ευρωπαϊκοί κανονισμοί και της ΕΕΑΕ. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν καλοκαίρι που πάντα παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης του ραδονίου στο εσωτερικό των κατοικιών σε σχέση με τον χειμώνα, λόγω του συχνότερου εξαερισμού των χώρων το καλοκαίρι. Η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης που μετρήθηκε είναι 490 Bq m⁻³ σε υπόγειο ενώ η ελάχιστη 8 Bq m⁻³ σε όροφο.

Οι συγκεντρώσεις μετρήθηκαν υψηλότερες στα υπόγεια και στα ισόγεια σε σχέση με αυτές που μετρήθηκαν στους ορόφους. Αυτό φαίνεται από την αντίστοιχη σύγκριση μεταξύ μέσων τιμών χωρίς να επιβεβαιώνεται όμως από το t-test που πραγματοποιήθηκε παραπάνω.

Δεν βρέθηκε συσχέτιση μεταξύ χρονολογίας κατασκευής των κατοικιών και συγκεντρώσεων. Επίσης με στατιστικά τεστ επιβεβαιώθηκε ότι το δείγμα και το αντιδείγμα μέτρησαν παραπλήσιες τιμές συγκέντρωσης. Επιπρόσθετα οι μετρούμενες συγκεντρώσεις ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή αν εξαιρεθούν οι δύο πολύ υψηλές τιμές που παρουσίασαν ένα αξιόλογο προς ερεύνηση μέγιστο.

7 Επίλογος

7.1 Περίληψη

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει δύο ουσιαστικά μελέτες και εκτενή βιβλιογραφική αναφορά σε παρόμοιες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στον ελλαδικό χώρο και στο εξωτερικό.

Οι μελέτες που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3 είναι διαφόρου βεληνεκούς. Οι εθνικές επισκοπήσεις γίνονται συνήθως σε χώρες που τους απασχολεί το πρόβλημα ραδονίου λόγω μεγάλων συγκεντρώσεων στο υπέδαφος ή λόγω των οικοδομικών υλικών που χρησιμοποιούν στην κατασκευή των χώρων διαμονής και εργασίας τους. Εκτός αυτού μικρότερες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί με χρήση παθητικών ανιχνευτών σε περιοχές ή πόλεις για ερευνητικούς σκοπούς.

Το πρώτο μέρος της συγκεκριμένης εργασίας ήταν η δοκιμαστική τοποθέτηση των ανιχνευτών σε εσωτερικούς χώρους του κτιρίου Κ. Η επιλογή τοποθέτησης των σημείων που εκτέθησαν οι ανιχνευτές ήταν η κατάλληλη λόγω της διαφορετικότητας συνθηκών εξαερισμού, θερμοκρασίας, υγρασίας και ορόφου. Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν σε αναμενόμενες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου συγκρίθηκαν με αυτά από μετρήσεις με ενεργητικούς ανιχνευτές και βρέθηκε σημαντική συσχέτιση μεταξύ τους με απόκλιση στις αριθμητικές μέσες τιμές των συγκεντρώσεων όμως.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας περιελάμβανε έκθεση σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών σε διάφορες περιοχές της Αττικής. Οι κατοικίες ήταν διαφόρου τύπου και τα δοσίμετρα τοποθετήθηκαν σε σημεία όπου περνάνε οι κάτοικοι περισσότερο χρόνο. Τα αποτελέσματα έδειξαν φυσιολογικές τιμές συγκέντρωσης ραδονίου πολύ πιο χαμηλές από το όριο επικινδυνότητας των $200-400 \text{ Bq m}^{-3}$. Εξαιρέση αποτέλεσε ένα σημείο σε υπόγειο σε μία κατοικία στην οποία ανιχνεύτηκε μέση τιμή συγκέντρωσης από δείγμα και αντιδείγμα 466 Bq m^{-3} τιμή πολύ κοντά στο όριο επικινδυνότητας. Βέβαια επειδή το δείγμα αφορά δύο

ανιχνευτές θα αποτελούσε ενδιαφέρον η περαιτέρω έρευνα για τα αίτια εμφάνισης τέτοιας υψηλής συγκέντρωσης στο χώρο. 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.

7.2 Μελλοντικές μελέτες

Τα αποτελέσματα από τις εκθέσεις και τις μετρήσεις από την παρούσα εργασία έχουν την προοπτική να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Σημεία που μπορεί να σταθεί ένας πειραματιστής είναι η απόκλιση των μετρήσεων που έγιναν στο κτίριο Κ ανάμεσα στους παθητικούς ανιχνευτές CR-39 και τους ενεργητικούς ανιχνευτές ALPHA-GUARD. Σε αυτή την περίπτωση μπορούν να ερευνηθούν και να βελτιωθούν :

- Η διαδικασία χημικής διάβρωσης των παθητικών ανιχνευτών
- Η μέθοδος ανάγνωσης των α -tracks στην επιφάνεια των ανιχνευτών
- Η μέθοδος προσδιορισμού υποβάθρου
- Ο μεγαλύτερος χρόνος έκθεσης των παθητικών ανιχνευτών
- Η διαδικασία βαθμονομήσεως
- Η αύξηση του πλήθους δειγματοληψίας

Βέβαια μία επιπλέον μέτρηση με τρίτη μέθοδο χωρίς την χρήση των παραπάνω παθητικών και ενεργητικών ανιχνευτών θα ήταν πολύ χρήσιμη για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αξιοπιστία των μετρήσεων.

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 με 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 μελέτης μπορεί να υπάρξει με την ενδελεχή μελέτη σε σημεία που παρουσιάστηκαν πολύ υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου από την μέση τιμή των λοιπών μετρήσεων. 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.

Βιβλιογραφία

- Kathren Ronald L., *Radioactivity in the Environment - Sources, Distribution & Surveillance* (1984)
- Nazaroff W. W., Nero Jr A.V., *Radon and its Decay Products in Indoor Air* (1988)
- Durrani S. A., Ilic R., *Radon Measurements by Etched Track Detectors* (1996)
- D. Nikolopoulos ,Greece, PhD Thesis : *Study of the exposure of the hellenic population to radon – 222* (2000)
- Manousakas M., A. Fouskas , H. Papaefthymiou , V. Koukoulidou , G. Siavalas , P. Kritidis , Greece, Elsevier : *Indoor radon measurements in a Greek city located in the vicinity of lignite-fired power plants* (2010)
- Carpentieri C. et al., Serbia-Italy: Radiation Protection Dosimetry, Vol. 145, No. 2–3, pp. 305–311, *Assessment of Long-Term Radon Concentration Measurement Precision in Field Conditions (Serbian Schools) for a Survey Carried Out by an International Collaboration* (2011)
- Humar M., Sutej T., et al., Slovenia, Radiation Protection Dosimetry vol 45 : *Indoor and Outdoor Radon Survey in Slovenia by Etched Track Detectors* (1992)
- Majborn B., Denmark, Pergamon Journals Ltd : *Measurements of Radon in Dwellings with CR-39 Track Detectors* (1986)
- Larmour Robert, Green Martyn, Northern Ireland, Environmental radon Newsletter, issue 62 : *New radon Map of Northern Ireland Launched* (spring 2010)
- Green B.M.R. et al. Britain, Elsevier : *Surveys of Natural Radiation Exposure in UK Dwellings with Passive and Active Measurement Techniques* (1985)

- Birkholz W. and Klink Th., UK, Britain, Pergamon : *Measurements of Radon Concentrations in Dwelling Houses* (1993)
- Michael C. R. Alavanja et al., American Journal of Public Health July 1999, Vol. 89, No. 7 : *Residential Radon Exposure and Risk of Lung Cancer in Missouri* (1999)
- Farid S.M., Bangladesh, Journal of Islamic Academy of Sciences : *Measurements of Concentrations of Radon and its Daughters in Dwellings using CR-39 Nuclear Track Detector* (1992)
- Shafi-Ur-Rehman, Pakistan, Islamabad, PhD Thesis : *Radon Measurements with CR-39 Detectors- Implications for Uranium Ore Analysis and Risk Assessment* (november 2005)
- Papaefthymiou H., Mavroudis A., Kritidis P. ,Greece, Elsevier : *Indoor radon levels and influencing factors in houses of Patras, Greece* (2002).
- Papaefthymiou H. and Georgiou C. D., Greece, Elsevier : *Indoor radon levels in primary schools of Patras, Greece* (2007)
- Papachristodoulou C.A., Patiris D.L., Ioannides K.G., Greece, Elsevier : *Exposure to indoor radon and natural gamma radiation in public workplaces in north-western Greece* (2010).
- Bochicchio F., Campos Venuti G., Piermattei S., Torri G., Nuccetelli C., Risica S., Tommasino L., Italy, Radon in the Living Environment, 19-23 April 1999, Athens, Greece : *Results of the National Survey on Radon Indoors in all the 21 Italian Regions* (1999)
- Koo V.S.Y., C.W.Y. Yip, J.P.Y. Ho, D. Nikezic, K.N. Yu, Pergamon : *Sensitivity of LR115 detector in diffusion chamber to ^{222}Rn in the presence of ^{220}Rn* (2002)
- Ipe N. E., J. C. Liu, B. R. Buddemeier, C. J. Miles, C and R. C. Yoderd, *A Comparison of the Neutron Response of CR-39 made by Different Manufacturers* (1992)
- ROBU ELENA, FRANZ JOSEF MARINGER, MASSIMO GARAVALLIA, LUCA PICINI, *Romanian Reports in Physics, Vol. 63, No. 2, P. 376–382* :

INFLUENCE OF EXPOSURE GEOMETRY ON THE RESPONSE OF CR39 SSNT RADON DETECTORS (2011)

- Dwaikat Nidal, Ghassan Safarini, Mousa El-hasan, Toshiyuki Iida, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 574 (2007) 289–291, *CR-39 detector compared with Kodalpha film type (LR115) in terms of radon concentration* (2007)
- Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J. και Simopoulos S.E. *Building materials radon exhalation rate: ERRICCA intercomparison exercise results*. The Science of the Total Environment 272(2001): 109-118, (2001)
- Genitron 1998. *Portable Radon Monitor "AlphaGUARD" User Manual*. Genitron Instruments GmbH, Φρανκφούρτη.
- Genitron 1999. Multiparameter Software AlphaVIEW Version 2.x, AlphaEXPERT Version 3.x *Instruction Manual*. Genitron Instruments GmbH
- Karangelos D.J., Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J., Hinis E.P και Simopoulos S.E. 2004. *Radiological characteristics and investigation of the radioactive equilibrium in the ashes produced in lignite-fired power plants*. Journal of Environmental Radioactivity 77(2004):233-246
- Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J. και Simopoulos S.E. 2001. *Photon attenuation, natural radioactivity content and radon exhalation rate of building materials*. Journal of Environmental Radioactivity 61(2002):257-269
- Αναγνωστάκης Μάριος 1998. *Γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλών ραδιενεργειών στην περιοχή χαμηλών ενεργειών .Διδακτορική Διατριβή ΕΠΤ-ΕΜΠ. Αθήνα 1998.*
- Bochicchio F., Venuti G., Campos, Nuccetelli C., Piermattei S., Risica S., Tommasino L., Torri G, "*Results of the Representative Italian National Survey on Radon Indoors*", Health Physics 71(5):741-748, 1996

Παράρτημα

A. Οδηγίες τοποθέτησης δοσιμέτρων CR-39

1. Αν δεν τοποθετήσουμε τα δοσίμετρα άμεσα στο επιθυμητό σημείο, φυλάμε το σακουλάκι στο ψυγείο χωρίς να το ανοίξουμε.
2. Όταν είμαστε έτοιμοι για την τοποθέτηση ανοίγουμε το σακουλάκι προσεκτικά έτσι ώστε να μην το καταστρέψουμε, για να ξαναχρησιμοποιηθεί κατά την επιστροφή των δοσιμέτρων.
3. Βγάζουμε τα δοσίμετρα και τα τοποθετούμε το ένα δίπλα στο άλλο στο σημείο επιλογής μας.
4. Το σημείο επιλογής μας είναι το δωμάτιο που ξοδεύουμε περισσότερο χρόνο μέσα στο σπίτι (υπνοδωμάτιο ή καθιστικό κατά προτίμηση).
5. Δεν ανοίγουμε τα δοσίμετρα.
6. Το σημείο τοποθέτησης των δοσιμέτρων μπορεί να είναι ένας πάγκος ή τραπέζι σε απόσταση 1m από πόρτες ή παράθυρα.
7. Μετά την τοποθέτηση συμπληρώνουμε άμεσα στο φύλλο όλα τα στοιχεία.
8. Τα δοσίμετρα θα παραμείνουν για έκθεση 1 μήνα ακριβώς.
9. Την τελευταία ημέρα της έκθεσης τοποθετούμε τα δοσίμετρα στην ίδια σακούλα που ήταν την οποία κλείνουμε όσο το δυνατό πιο αεροστεγώς (π.χ. με σελοτέιπ).
10. Συμπληρώνουμε τα τελευταία στοιχεία στο φύλλο και επιστρέφουμε τα δοσίμετρα.

Β. Φόρμα συμπλήρωσης στοιχείων

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΜΕ CR-39

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΗΣ	
-----------------------	--

ΠΟΛΗ	
ΔΗΜΟΣ	
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	
ΤΚ	

ΤΥΠΟΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ	
------------------------	--

ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	
------------------------	--

Α/Α ΔΟΣΙΜΕΤΡΟΥ		
-----------------------	--	--

ΟΡΟΦΟΣ	
---------------	--

ΧΩΡΟΣ	
--------------	--

ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ	ΗΜ/ΝΙΑ		ΩΡΑ	
-------------------	---------------	--	------------	--

ΣΥΛΛΟΓΗ	ΗΜ/ΝΙΑ		ΩΡΑ	
----------------	---------------	--	------------	--

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	

Γ. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάγνωση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις των διατάξεων ALPHA-GUARD.

>> NEW << DataEXPERT modules :
The integrated solution for online monitoring networks

Offers...

- Unlimited number of background maps
- Eventlist for system and probe status
- Alarm management

Offers...

Automatic report generation:

- Period daily, monthly, yearly or user specified
- Table or chart output

Report Type: Day
SKYREPORT
Gammatracer GENTRON
Day: 05-October-2002

Location	Measurement Interval (min)	Alarm Rate (cpm/h)	Time of measurement	Meas. data state (Y/N/A)
11105	30	120	051022002 0015	04
11106	30	88	051022002 01 00	04
11105	30	88	051022002 01 00	04
11105	30	88	051022002 01 00	04
11106	30	88	051022002 01 00	04
11107	30	88	051022002 01 00	04
11106	30	88	051022002 01 00	04

Offers...

Quality assurance:

- Automatic daily system check
- Online quality check of incoming data

Offers...

Chart visualization of:

- Measured and related quality data
- Comfortable zoom and mathematical options

Offers...

Visualization of:

- Passing alarm level 1 (yellow)
- Passing alarm level 2 (red)

Gentilon Instruments GmbH, Heerstrasse 149, D-60488 Frankfurt, ++49 (0)69976514-0, sales@gentilon.de - 03/2003

Δ. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο Bresser που χρησιμοποιήθηκε για την ανάγνωση των a-tracks στις επιφάνειες των ανιχνευτών.



Ε. Ο χάρτης της αττικής με ορισμένα σημεία δειγματοληψίας από την έκθεση των ανιχνευτών στις κατοικίες.

