



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΠΜΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ»
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη Μεθόδου Ανίχνευσης Ραδονίου με χρήση
Παθητικών Ανιχνευτών**

ΠΕΤΡΟΥΛΑ ΚΟΝΤΑΚΟΥ

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Ε. Π. Χίνης

Συνεργασία: Δρ. Δ.Ι. Καράγγελος

ΑΘΗΝΑ 2011

Ευχαριστίες

Θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χίνη για την καθοδήγηση που μου παρείχε, για το χρόνο που αφιέρωσε και για την καθ' όλα άψογη συνεργασία μας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής Επίκουρο Καθηγητή κ. Μάριο Αναγνωστάκη και Λέκτορα κ. Νικόλαο Πετρόπουλο για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και τη σημαντική τους συμβολή.

Ξεχωριστά ευχαριστώ τον Δρ. κ. Δημήτρη Καράγγελο που με τις συμβουλές του και τις τεχνικές του γνώσεις στάθηκε δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας.

Θεωρώ επίσης υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω το συμφοιτητή μου Ελευθέριο Ελμαλή για τη βοήθειά του στην πειραματική διαδικασία, αλλά και για τη συμπαράστασή του.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για τη συνεχή και χωρίς όρους στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια...

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σήμερα στο περιβάλλον ανιχνεύονται και φυσικά και τεχνητά ραδιοϊσότοπα και αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις τους και οι ισοτοπικές αναλογίες τους. Ενδιαφέρει κυρίως ο τρόπος μεταφοράς τους και ο τρόπος με τον οποίο μερικά από αυτά εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα, το πόσιμο νερό και τον αέρα της αναπνοής (Παπαστεφάνου, 2010). Αξίζει να σημειωθεί ότι: α) το 82 % της έκθεσης του ανθρώπου σε ραδιενέργεια προέρχεται από φυσικές πηγές και β) σε ποσοστό 47% ανέρχεται η δόση που οφείλεται στο ραδιενεργό Ραδόνιο και τα θυγατρικά του ραδιοϊσότοπα, επί του συνόλου της ραδιενεργού δόσης που λαμβάνει ο άνθρωπος από όλες τις πηγές (φυσικές και ανθρωπογενείς) (UNSCEAR, 2000).

Το Ραδόνιο είναι ένα φυσικό ραδιενεργό αέριο, που προέρχεται από τη διάσπαση του Ουρανίου ^{238}U . Το τελευταίο ανιχνεύεται σε μικρές ποσότητες σε όλα τα πετρώματα και τα εδάφη της γης (ΕΕΑΕ, 2005). Οι αρχικές μελέτες που αφορούσαν το Ραδόνιο είχαν στρέψει την προσοχή τους κυρίως σε ορυχεία και σπήλαια, επειδή εκεί παρουσιάζονταν υψηλότερες συγκεντρώσεις του, σε σχέση με την επιφάνεια της γης. Μετά τη δεκαετία του 1970, όταν άρχισαν να μελετούνται οι συγκεντρώσεις του και σε κατοικίες και κτήρια, διαπιστώθηκε ότι πάντα σε ένα ποσοστό κτηρίων παρουσιάζονται υψηλές τιμές. Στην Ελλάδα διενεργούνται μελέτες από το 1997, από την ΕΕΑΕ, σε κατοικίες και σε χώρους εργασίας.

Η συγκέντρωση του Ραδονίου στα κτήρια εξαρτάται από τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά, την τοποθεσία που είναι αυτά χτισμένα, τον εξαερισμό τους και τις μεταβολές κλιματολογικών-μετεωρολογικών παραμέτρων. Όσοι ζουν και εργάζονται σε κτήρια, που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις, εκτίθενται σε ανάλογες δόσεις ιοντίζουσας ακτινοβολίας χωρίς μάλιστα να το γνωρίζουν πολλές φορές. Το πρόβλημα είναι ότι το Ραδόνιο ^{222}Rn διασπάται σε ραδιενεργά στοιχεία, δύο από τα οποία το Πολώνιο ^{218}Po και το Πολώνιο ^{214}Po , εκπέμπουν σωματίδια άλφα. Τα σωματίδια αυτά είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά στο να βλάπτουν τους ιστούς των πνευμόνων και ενέχονται για την πρόκληση του καρκίνου των πνευμόνων στους ανθρώπους (Δημούδη, 2006). Γι' αυτό επιβάλλεται η μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου σε κατοικίες αλλά και σε χώρους που συναθροίζονται μαζικά άνθρωποι, είτε για εργασία

είτε για άλλους λόγους (εκπαίδευση, νοσηλεία κλπ.). Όπως επισημαίνει η ΕΕΑΕ ο κίνδυνος για την υγεία εξαιτίας του Ραδονίου εξαρτάται από τη συνολική έκθεση, γι' αυτό και πρέπει να μετρείται η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωσή του στον εσωτερικό αέρα της κατοικίας ή του χώρου εργασίας. Είναι μάλιστα προτιμότερο οι μετρήσεις της συγκέντρωσης του Ραδονίου να γίνονται για χρονική περίοδο τουλάχιστον 3 μηνών από παθητικούς ανιχνευτές (ΕΕΑΕ, 2005). Από τα παραπάνω καταδεικνύεται πόσο σημαντική είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του Ραδονίου και η παρακολούθηση των συγκεντρώσεών του, τόσο για εργαστηριακούς λόγους, όσο και για την έγκαιρη ανίχνευσή του στο περιβάλλον.

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ, δραστηριοποιείται στο χώρο της τεχνολογίας μέτρησης συγκεντρώσεων του Ραδονίου από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, με τρία κύρια αντικείμενα έρευνας: α) τη μέτρηση του ρυθμού εκροής Ραδονίου από οικοδομικά υλικά, β) την πειραματική διερεύνηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων μονωτικών υλικών στον περιορισμό του ρυθμού εκροής Ραδονίου από τμήματα δομικών κατασκευών, και γ) τη βαθμονόμηση οργάνων μετρήσεων συγκέντρωσης Ραδονίου στην ατμόσφαιρα. Τα σχετικά πειράματα για όλα αυτά τα αντικείμενα έρευνας γίνονται σε ειδικό χώρο του ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπου υπάρχουν οι θάλαμοι Ραδονίου (Σιμόπουλος, 2006). Στα πλαίσια αυτών των δραστηριοτήτων πραγματοποιήθηκε και η δική μας εργασία για την ανάπτυξη μεθόδου ανίχνευσης Ραδονίου με τη χρήση παθητικών ανιχνευτών. Πιο συγκεκριμένα τα πειράματά μας έλαβαν μέρος στο μεγάλο θάλαμο Ραδονίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ και διήρκεσαν περίπου έξι μήνες. Επιλέχτηκαν οι παθητικοί ανιχνευτές CR-39 της εταιρείας TASTRAK λόγω του χαμηλού τους κόστους και της σχετικής ευκολίας στη χρήση. Υποβάλαμε τους ανιχνευτές στη διαδικασία της χημικής χάραξης μετά από έκθεση στο θάλαμο Ραδονίου, για να γίνουν ορατά τα ίχνη που δημιουργούνται στην επιφάνειά τους από σωματίδια-α. Στη συνέχεια κάναμε την καταμέτρηση των ιχνών με τη βοήθεια μικροσκοπίου και ηλεκτρονικής κάμερας και τέλος βαθμονομήσαμε τους συγκεκριμένους ανιχνευτές προκειμένου αυτοί να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων Ραδονίου στα σπίτια μας και σε άλλους εσωτερικούς χώρους.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	9
1.1 Ραδιενεργός Ακτινοβολία.....	9
1.1.1 Φυσική Ραδιενέργεια.....	10
1.1.2 Τεχνητή ραδιενέργεια.....	13
1.2 Βασικές Έννοιες και Μεγέθη	15
1.3 Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας	16
Κεφάλαιο 2: Ραδόνιο	18
2.1 Γενικά για το Ραδόνιο	18
2.2 Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες Ραδονίου	23
2.3 Σχηματισμός και μεταφορά Ραδονίου	24
2.4 Βιολογικές Επιπτώσεις Ραδονίου και Θυγατρικών του	26
2.4.1 Επιτρεπτά όρια Ραδονίου	28
2.5 Συγκέντρωση Ραδονίου σε Εξωτερικούς Χώρους	31
2.6 Συγκέντρωση Ραδονίου σε Εσωτερικούς Χώρους.....	32
2.7 Τεχνικές Ανίχνευσης Ραδονίου	35
Κεφάλαιο 3: Παθητικές Τεχνικές Μέτρησης Ραδονίου	39
3.1 Γενικά.....	39
3.2 Ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών-SSNTDs	42
3.2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας των SSNTDs.....	43
3.2.2 Αλληλεπίδραση φορτισμένων σωματιδίων με τους ανιχνευτές	44
3.2.3 Μοντέλα μηχανισμών δημιουργίας λανθάνοντος ίχνους	47
3.2.4 Μοντέλα μηχανισμών δημιουργίας εγχαράξιμων ιχνών	48
3.2.5 Χαρακτηριστικά των ιχνών στους πολυμερείς ανιχνευτές μετά από χημική χάραξη.....	52
3.2.6 Χημική χάραξη των ανιχνευτών.....	55
3.3 Ο ανιχνευτής CR-39	56
3.3.1 Σύσταση, παρασκευή και ιδιότητες.....	56
3.3.2 Πειραματική χρήση του ανιχνευτή CR-39	59
3.3.3 Εφαρμογές των ανιχνευτών CR-39 στο Ραδόνιο	59
Κεφάλαιο 4: Πειραματικός εξοπλισμός και μεθοδολογία.....	62
4.1 Εισαγωγή.....	62
4.2 Περιγραφή και πειραματική χρήση του CR-39 της εταιρείας TASL.....	62

4.2.1	Χαρακτηριστικά του CR-39	62
4.2.2	Χρήση του CR-39.....	64
4.2.3	Χημική χάραξη του CR-39.....	66
4.2.4	Προστασία και αποθήκευση του CR-39.....	71
4.3	Καταμέτρηση των ιχνών	72
4.3.1	Πειραματικός Εξοπλισμός.....	72
4.3.2	Βαθμονόμηση Μικροσκοπίου	73
4.3.3	Τυποποίηση μεθόδου αναγνώρισης των ιχνών.....	75
4.3.4	Πείραμα έκθεσης CR-39 σε πηγή σωματιδίων α	76
4.3.5	Επιλογή ρυθμίσεων και διαδικασία καταμέτρησης.....	79
4.4	Πρωτόκολλο πειράματος μέτρησης υποβάθρου.....	80
4.5	Πείραμα έκθεσης σε Ραδόνιο	81
Κεφάλαιο 5: Πειράματα βαθμονόμησης CR-39		84
5.1	Εισαγωγή.....	84
5.2	Θάλαμος Ραδονίου	85
5.2.1	Πηγή Ραδονίου	86
5.2.2	Μετάγχιση Ραδονίου στο Θάλαμο	88
5.3	Ανιχνευτής AlphaGUARD.....	88
5.4	Σχεδιασμός των πειραμάτων βαθμονόμησης	89
5.4.1	Μεθοδολογία πειράματος βαθμονόμησης.....	91
5.5	Πραγματοποίηση πειραμάτων βαθμονόμησης.....	95
5.6	Ανάγνωση των ιχνών.....	100
5.7	Καμπύλη βαθμονόμησης.....	103
5.7.1	Κατασκευή καμπύλης βαθμονόμησης.....	103
Κεφάλαιο 6: Επίλογος		109
6.1	Συμπεράσματα.....	109
6.2	Μελλοντικές Προοπτικές	110
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		112
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Φύλλα καταγραφής πειραμάτων έκθεσης CR-39.....		121

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι παθητικοί ανιχνευτές Πυρηνικών Ιχνών (SSNTDs) χρησιμοποιούνται σε ευρεία κλίμακα για τη μέτρηση των επιπέδων Ραδονίου μέσα σε σπίτια και άλλους εσωτερικούς χώρους. Ένας ανιχνευτής που χρησιμοποιείται για το λόγο αυτό θα πρέπει να βαθμονομείται για τις συγκεντρώσεις του Ραδονίου και των θυγατρικών του, που πιθανόν βρίσκονται στο εσωτερικό των κτηρίων. Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήσαμε βαθμονόμηση παθητικών ανιχνευτών CR-39, με τη βοήθεια του θαλάμου Ραδονίου του Ε.Μ.Π., για να προσδιορίσουμε τη σχέση μεταξύ της πυκνότητας των ιχνών και της συνολικής έκθεσης σε Ραδόνιο. Από τη διαδικασία αυτή προέκυψε ο συντελεστής βαθμονόμησης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Αρχικά γίνεται μια σύντομη παρουσίαση της ραδιενεργού ακτινοβολίας, καταγράφονται οι βασικές έννοιες και τα μεγέθη που θα μας απασχολήσουν και ορίζονται οι στόχοι μας. Επίσης παρουσιάζονται οι τρόποι σχηματισμού και μεταφοράς του Ραδονίου, οι βιολογικές του επιπτώσεις στον άνθρωπο, ο τρόπος συγκέντρωσής του σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Γίνεται διεξοδική αναφορά στις παθητικές τεχνικές μέτρησης Ραδονίου και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στους ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών SSNTDs, στους οποίους ανήκει και ο ανιχνευτής CR-39, που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνά μας. Ακόμη, αναλύονται τα μοντέλα των μηχανισμών δημιουργίας λανθανόντων και εγχαράξιμων ιχνών, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των ιχνών στους πολυμερείς ανιχνευτές και καταγράφεται η διαδικασία της χημικής τους χάραξης. Στη συνέχεια γίνεται λεπτομερής παρουσίαση των ανιχνευτών CR-39 και των εφαρμογών τους στην ανίχνευση Ραδονίου και περιγράφεται η μέθοδος της χημικής χάραξης και της καταμέτρησης των ιχνών στους CR-39 (TASTRAK) που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνά μας. Επίσης περιγράφεται ο πειραματικός εξοπλισμός και η μεθοδολογία που ακολουθήσαμε για να πραγματοποιήσουμε τα πειράματα ελέγχου και τα πειράματα βαθμονόμησης των ανιχνευτών CR-39 (TASTRAK). Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, κατασκευάζεται η καμπύλη βαθμονόμησης και γίνεται σύντομος σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Ραδιενεργός Ακτινοβολία

Οι περισσότερες κατηγορίες πυρήνων που βρίσκονται στη φύση είναι «ευσταθείς», δηλαδή χωρίς κάποια εξωτερική παρέμβαση διατηρούν σταθερό τον αριθμό των πρωτονίων και των νετρονίων τους. Αν όμως λόγω εξωτερικής διέγερσης ένα νουκλεόνιο ή ένα σύμπλεγμα νουκλεονίων αποκτήσει κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από μια ορισμένη τιμή, τότε αυτό θα διαφύγει εκτός πυρήνα και ο πυρήνας θα χάσει την ευστάθειά του. Για μικρούς πυρήνες ο αριθμός των νετρονίων που απαιτούνται για την ευστάθειά τους είναι ίσος περίπου με τον αριθμό των πρωτονίων τους. Σε πυρήνες όμως με μεγαλύτερο αριθμό πρωτονίων χρειάζεται μεγαλύτερη αναλογία νετρονίων επειδή αυξάνεται αντίστοιχα το μέγεθος των απωστικών ηλεκτρικών δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε πρωτόνιο. Έτσι για να διατηρήσουν την ευστάθειά τους οι μεγαλύτεροι ευσταθείς πυρήνες (με μεγάλο ατομικό αριθμό), αυξάνουν την απαιτούμενη αναλογία νετρονίων και ο αριθμός τους φτάνει να είναι μέχρι και 1,62 φορές μεγαλύτερος από τον αριθμό των πρωτονίων. Αυτό αντιστοιχεί σε αναλογία νετρονίων, περίπου 62% του αριθμού των νουκλεονίων (δηλαδή πρωτονίων και νετρονίων) του πυρήνα (Αντωνόπουλος-Ντόμης, 2004:52).

Οι πολύ μεγάλοι πυρήνες, όπως είναι το Ουράνιο ${}_{92}^{238}\text{U}$, τα ισότοπα του Θορίου ${}_{90}^{234}\text{Th}$ και τα ισότοπα του Ραδίου ${}_{88}^{223}\text{Ra}$ κ.ά. δεν είναι ευσταθείς και κάποια στιγμή, αυθόρμητα, χωρίς εξωτερική διέγερση, μεταστοιχειώνονται με αποβολή (εκπομπή) νουκλεονίων ή με διάρρηξη (αυθόρμητη σχάση) του πυρήνα. Μετατρέπονται έτσι σε κάποιο άλλο είδος πυρήνα με ζεύγος (Z, A) διαφορετικό από το αρχικό, εκπέμποντας συγχρόνως σωματίδια. Αυτή η διαδικασία ονομάστηκε «ραδιενεργός διάσπαση» του ασταθούς πυρήνα και η εκπομπή των σωματιδίων, τα οποία φέρουν σημαντική ενέργεια, «ραδιενεργός ακτινοβολία». Συμπερασματικά, ραδιενέργεια ονομάζεται η ιδιότητα της αυθόρμητης διάσπασης των ραδιενεργών πυρήνων με ταυτόχρονη εκπομπή ραδιενεργών ακτινοβολιών (Αντωνόπουλος-Ντόμης, 2004). Το φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1896 από το Γάλλο φυσικό Antoine Henri Becquerel, ενώ το 1898 οι Γάλλοι χημικοί Pierre και Marie Curie ανακάλυψαν τα ραδιενεργά στοιχεία Πολόνιο, Ράδιο και Θόριο. Το αμέσως επόμενο έτος ανακαλύφθηκε το ραδιενεργό στοιχείο Ακτίνιο από το Γάλλο χημικό Andre Louis

Debiene και το ραδιενεργό αέριο Ραδόνιο από τους βρετανικούς φυσικούς Ernest Rutherford και Frederick Soddy, οι οποίοι το παρατήρησαν σε συνδυασμό με το Θόριο, το Ακτίνιο, και το Ράδιο.

Ραδιενέργεια εκλύεται από φυσικές πηγές, η προέλευση των οποίων ανάγεται είτε στη δημιουργία του σύμπαντος είτε σε μεταβολές που εξακολουθούν να συμβαίνουν στον αστρικό χώρο, αλλά και από πηγές που κατασκεύασε ο άνθρωπος. Έτσι ανάλογα με την προέλευσή της διαχωρίζουμε τη ραδιενέργεια σε: α) φυσική και β) τεχνητή.

1.1.1 Φυσική Ραδιενέργεια

Φυσική ραδιενέργεια δέχεται ο άνθρωπος από το διάστημα (κοσμική ακτινοβολία), από τη γη (ραδιενεργά κοιτάσματα) και από το ίδιο του το σώμα (εσωτερική ραδιενέργεια).

Κοσμική ακτινοβολία: Αν και υπάρχουν πολλοί τύποι κοσμικής ακτινοβολίας ανάλογα με την προέλευση, την ενέργεια, τον τύπο και την πυκνότητα ροής των σωματιδίων, εν τούτοις τρεις είναι εκείνοι που έχουν σχέση με την έκθεση του ανθρώπου στη ραδιενέργεια: η γαλαξιακή, η ηλιακή και η ακτινοβολία που σχηματίζεται από τις ζώνες ακτινοβολίας της γης (Van Allen belts) (UNSCEAR, 2008). Η κοσμική ακτινοβολία είναι προϊόν των συνεχών μεταβολών που συμβαίνουν στον αστρικό χώρο και συνίσταται από σωματίδια-α (δηλαδή πυρήνες Ηλίου), πρωτόνια ή και ακόμη μεγαλύτερους πυρήνες καθώς και λιγότερα ηλεκτρόνια. Όταν όλα αυτά τα σωματίδια εισέλθουν στην ατμόσφαιρα αντιδρούν με τα συστατικά του αέρα (Άζωτο και Οξυγόνο) και παράγουν νέα σωματίδια με αποτέλεσμα να φτάνουν στο έδαφος π-μεσόνια, ηλεκτρόνια και ακτινοβολία γ. Από τις αλληλεπιδράσεις παράγονται επίσης ελαφροί ραδιενεργοί πυρήνες (Ηλίου-3, Βηρυλίου-7, Άνθρακα-14 και Νατρίου-22 κ.λ.π.). Σημειώνεται ότι η τιμή της κοσμικής ακτινοβολίας μειώνεται σταδιακά με αποτέλεσμα να φτάνει στο επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας σχετικά εξασθενημένη (**Σχήμα 1.1**). Έτσι, ενώ η μέση ετήσια συνεισφορά στη δόση που παίρνει ο άνθρωπος από την κοσμική ακτινοβολία είναι 0,3 mSv, η τιμή αυτή φτάνει στα 1 mSv σε υψόμετρο 2.000 (Σιμόπουλος, 1989).



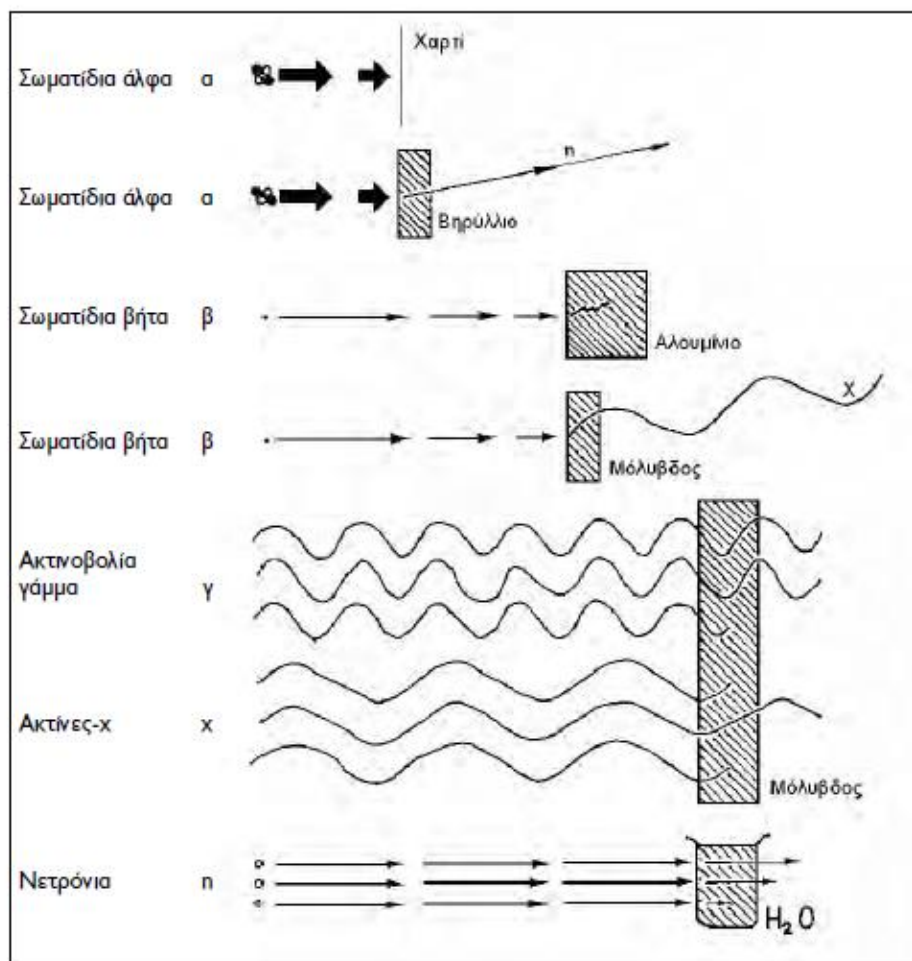
Σχήμα 1.1: Μεταβολή της κοσμικής ακτινοβολίας σε σχέση με το υψόμετρο (Πηγή: ΕΕΑΕ, 2009)

Ακτινοβολία από ραδιενεργά κοιτάσματα:

Τόσο στο φλοιό της γης όσο και στην επιφάνειά της έχουν βρεθεί περισσότερα από σαράντα ραδιενεργά ισότοπα τα οποία προέρχονται στην πλειοψηφία τους από διαδοχικές διασπάσεις άλλων ραδιενεργών ισωτόπων. Το αρχικό ισότοπο κάθε διάσπασης ονομάζεται πατρικό και δίνει το όνομά του σε ολόκληρη τη σειρά, τα προϊόντα της διάσπασής του ονομάζονται θυγατρικά και το τελευταίο σταθερό μέλος είναι το τελικό προϊόν. Έτσι έχουμε το Ουράνιο ^{238}U που δίνει τη σειρά Ουρανίου, το Θόριο ^{232}Th που δίνει τη σειρά Θορίου και το Ουράνιο ^{235}U που δίνει τη σειρά Ακτινίου. Ανάλογα βέβαια με την περιεκτικότητα ενός τόπου σε ραδιενεργά κοιτάσματα μεταβάλλεται και η εκπεμπόμενη από το υπέδαφος ακτινοβολία (Σιμόπουλος, 1989).

Τα ραδιοϊσότοπα που βρίσκονται στο φλοιό της γης εκπέμπουν ακτινοβολίες άλφα, βήτα και γάμμα. Επειδή όμως τα σωματίδια άλφα και βήτα δεν έχουν τη δυνατότητα να διέλθουν ακόμη και από σχετικά μικρά πάχη ύλης, συγκρατούνται στο μεγαλύτερο μέρος τους από το έδαφος και τον αέρα και δε φτάνουν στο ανθρώπινο σώμα. Για το λόγο αυτό η μόνη αξιόλογη εξωτερική ακτινοβολία που δέχεται ο άνθρωπος από τη γη είναι η ακτινοβολία γάμμα (Σχήμα 1.2). Είναι κατανοητό ότι η

ένταση της ακτινοβολίας από τη γη εξαρτάται από τα ορυκτά που υπάρχουν στο υπέδαφος και ιδιαίτερα από τη συγκέντρωση Ουρανίου σε κάθε τόπο. Όμως αν και καταγράφονται περιοχές στη γη στις οποίες η δόση φυσικής ραδιενέργειας είναι εκατό ή χίλιες φορές μεγαλύτερη από την παγκόσμια μέση τιμή (0,5 mSv/έτος), δεν υπάρχει κανένας λόγος ανησυχίας αφού οι άνθρωποι έζησαν εκεί υγιώς επί χιλιάδες χρόνια (Αντωνόπουλος-Ντόμης, 2004). Σημειώνεται ότι η σπουδαιότερη πηγή ραδιενέργειας που φτάνει στον άνθρωπο είναι το αέριο Ραδόνιο το οποίο θα μας απασχολήσει στη συνέχεια της εργασίας μας.



Σχήμα 1.2: Διεσδυτικότητα των διαφόρων τύπων ακτινοβολίας (Πηγή: Υ.Ε.Κ.Α, 2009)

Ακτινοβολία από το εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος (εσωτερική ραδιενέργεια):

Με την εισπνοή και τις τροφές εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα τα ραδιενεργά ισότοπα και ανάλογα με το είδος τους κατακρατούνται για κάποιο

διάστημα από ορισμένα όργανα, ακτινοβολώντας τη γύρω περιοχή. Τα κυριότερα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που εισέρχονται και έχουν ανιχνευτεί στο σώμα μας είναι τα παρακάτω: Άνθρακας ^{14}C , Ραδόνιο ^{222}Rn , Ραδόνιο ^{220}Rn και Κάλιο ^{40}K . Το θετικό είναι ότι τα ισότοπα αυτά έχουν σταθερό ρυθμό εισόδου και εξόδου από το σώμα, λόγω του βιολογικού κύκλου και βρίσκονται τελικά σε κατάσταση ισορροπίας. Επίσης μέσω της τροφικής αλυσίδας εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα τα ραδιενεργά ισότοπα Μόλυβδος ^{210}Pb και Πολώνιο ^{210}Po , που συγκεντρώνονται ιδιαίτερα στα ψάρια και τα θαλασσινά. Το τελευταίο βρίσκεται και στο κρέας των ταράνδων, των καγκουρό και των προβάτων της Δυτικής Αυστραλίας, η οποία είναι πλούσια σε κοιτάσματα Ουρανίου. (Σιμόπουλος, 1989).

1.1.2 Τεχνητή ραδιενέργεια

Αντιλαμβανόμενος ο άνθρωπος την τεράστια ποσότητα ενέργειας που περικλείεται στον πυρήνα, επινόησε τεχνητούς τρόπους για να την απελευθερώσει, με τη βοήθεια των μηχανισμών της πυρηνικής σχάσης και της σύντηξης. Έτσι οδηγήθηκε στην κατασκευή των πυρηνικών αντιδραστήρων και των πυρηνικών όπλων. Οι πρώτοι μετατρέπουν την πυρηνική ενέργεια που εκλύεται κατά την πυρηνική σχάση σε θερμική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική, δημιουργώντας ταυτόχρονα νέα ραδιενεργά άτομα τα οποία εγκλωβίζονται στην καρδιά του αντιδραστήρα. Επιτρέπουν με άλλα λόγια τη μετατροπή της ενέργειας που απελευθερώνεται σε χρήσιμη μορφή, όπως είναι ο ηλεκτρισμός, ο ατμός για βιομηχανικές χρήσεις ή το ζεστό νερό για θέρμανση ολόκληρων πόλεων. Το πρόβλημα είναι ότι αν και οι αντιδραστήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για ειρηνικούς σκοπούς, δημιουργούν μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών υλικών τα οποία θα πρέπει με κάθε τρόπο να διαφυλαχθούν και να αποτραπεί η έκλυσή τους στο περιβάλλον (Παπάζογλου, 1989).

Σε διαρροή ραδιενεργών ουσιών στο περιβάλλον θα μπορούσε επίσης να οδηγήσει ένα πυρηνικό ατύχημα. Είναι σε όλους γνωστό το «ατύχημα Τσερνομπίλ» που συνέβη το βράδυ της 25^{ης} Απριλίου του 1986 στη μονάδα N^ο 4 του Ατομικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής στο Τσερνομπίλ της Σοβιετικής Ουκρανίας, το οποίο ήταν βαθμού 7 στην 7/θμια κλίμακα των πυρηνικών ατυχημάτων που θεσπίστηκε από τη Διεθνή Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας. Το ατύχημα αυτό που προκάλεσε ανθρώπινα θύματα και εκτεταμένη μόλυνση του περιβάλλοντος είναι το χειρότερο που συνέβη ποτέ στον κόσμο σε αντιδραστήρα και το πρώτο που χρειάστηκε να γίνει

εκκένωση του πληθυσμού από τις κατοικίες του (Παπαστεφάνου, 2010). Σημειώνεται ότι μετά το ατύχημα Τσερνομπίλ το ΕΠΤ-ΕΜΠ έκανε δειγματοληψία επιφανειακών εδαφών σε όλη την Ελλάδα προκειμένου να προσδιορίσει τις επιπτώσεις της ραδιενεργού ακτινοβολίας στο σύνολο του ελληνικού πληθυσμού. Έτσι εκτιμήθηκε ότι η συνολική δόση (κατά μέσο όρο) που δέχτηκε τον πρώτο χρόνο μετά το ατύχημα ήταν 34 manSv. Εκτιμήθηκε επίσης ότι η δόση για τα επόμενα σαράντα χρόνια θα ανέλθει συνολικά στα 8.800 manSv (Petrooulos et al., 1996). Όπως αναφέρουν οι Anagnostakis (et al., 1996) από το ραδιενεργό νέφος επιβαρύνθηκαν σε μεγαλύτερο βαθμό οι περιοχές που βρίσκονται κοντά στην Καρδίτσα, τα Τρίκαλα και τη Νάουσα. Μεγάλο πυρηνικό ατύχημα είναι και αυτό που συνέβη στην πόλη Φουκουσίμα της Ιαπωνίας, την άνοιξη του 2011. Το συγκεκριμένο ατύχημα που προκλήθηκε από το σεισμό και το καταστροφικό τσουνάμι της 11ης Μαρτίου στον πυρηνικό σταθμό Daiichi, της εταιρείας Terco, αρχικά θεωρήθηκε 4^{ου} βαθμού. Λίγες μέρες αργότερα η Ιαπωνική Υπηρεσία Πυρηνικής Ασφάλειας το αναβάθμισε με βάση τα επίπεδα Ιωδίου και Καισίου που είχαν μετρηθεί στο περιβάλλον και το κατέταξε στον 7^ο βαθμό.

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι τα πυρηνικά εργοστάσια έχουν εξοπλιστεί με συστήματα προστασίας από τεχνικά και ανθρώπινα λάθη, η ιστορία όμως έχει δείξει ότι ένα πυρηνικό ατύχημα δεν είναι απίθανο να συμβεί. Σε παρόμοιες περιπτώσεις οι ραδιενεργές ουσίες εξέρχονται στον ατμοσφαιρικό αέρα, διασκορπίζονται στο περιβάλλον με τον άνεμο και με την πάροδο του χρόνου πέφτουν στο έδαφος και στο νερό. Τότε υπάρχει σοβαρός κίνδυνος να τις εισπνεύσουν οι άνθρωποι και τα ζώα και αν έχουν πέσει στο έδαφος να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της τροφής (Swedish Radiation Protection Authority, 2006).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η τεχνητή ραδιενέργεια χρησιμοποιείται και για την κατασκευή οπλικών συστημάτων. Οι δοκιμές για την κατασκευή τους τα τελευταία πενήντα χρόνια, δημιούργησαν νέες πηγές έκθεσης του ανθρώπου στην ακτινοβολία. Η συλλογική ενεργός δόση έχει εκτιμηθεί σε 3×10^7 manSv, τιμή που αντιστοιχεί σε έκθεση τριών χρόνων περίπου σε φυσικές πηγές ακτινοβολίας (UNSCEAR, 1988).

Σπουδαίες είναι οι εφαρμογές της τεχνητής ραδιενέργειας και στην ιατρική, για διαγνωστικούς, θεραπευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Σημειώνεται ότι η πρώτη κλινική χρήση της τεχνητής ραδιενέργειας εφαρμόστηκε το 1937 για τη θεραπεία ασθενούς με λευχαιμία στο Πανεπιστήμιο του Berkley της Καλιφόρνια, ενώ ορόσημο θεωρείται το έτος 1946 όταν το ραδιενεργό Ιώδιο χρησιμοποιήθηκε για την

θεραπεία ασθενούς με καρκίνο του θυρεοειδούς. Από το 1960 άρχισε πλέον η ευρεία εφαρμογή της στην κλινική πράξη και την επόμενη δεκαετία η τεχνητή ραδιενέργεια χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση των οργάνων του σώματος (σπλήνας, ήπαρ, εγκέφαλος κλπ.) (Ηλιάδης, 2003).

1.2 Βασικές Έννοιες και Μεγέθη

Κάθε ραδιενεργό ισότοπο ή ραδιοϊσότοπο ενός στοιχείου χαρακτηρίζεται μονοσήμαντα από το είδος και την ενέργεια της ακτινοβολίας την οποία εκπέμπει καθώς και από το χρόνο υποδιπλασιασμού του. Τα πιο συνηθισμένα σωματίδια που εκπέμπονται κατά τη διάσπαση φυσικών ραδιενεργών πυρήνων είναι τα σωματίδια άλφα, βήτα και γάμμα. Εκτός από αυτά εκπέμπονται ακόμη νετρίνα και αντινετρίνα.

- **Σωματίδιο α:** Είναι ο πυρήνας Ηλίου ${}^4_2\text{He}$, θετικά φορτισμένο σωματίδιο, το οποίο εκπέμπεται με κινητική ενέργεια μερικών MeV, που αντιστοιχεί σε ταχύτητα της τάξης των $20.000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

- **Σωματίδιο β:** Είναι ένα ηλεκτρόνιο που προέρχεται από τη διάσπαση ενός νετρονίου σε πρωτόνιο και ηλεκτρόνιο και εκπέμπεται από το μητρικό ασταθή πυρήνα με πολύ μεγάλη ταχύτητα (π.χ. $250.000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$). Η διάσπαση αυτή, που συμβαίνει σε πυρήνες με περίσσεια νετρονίων ως προς την ευστάθεια, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των νετρονίων του πυρήνα κατά ένα και την αύξηση του αριθμού των πρωτονίων επίσης κατά ένα. Σημειώνεται ότι η εκπομπή σωματιδίου β συνοδεύεται από εκπομπή ενός αντινετρίνου, το οποίο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και έχει εξαιρετικά μικρή μάζα συγκρινόμενο με το ηλεκτρόνιο. Για παράδειγμα ο Άνθρακας ${}^{14}\text{C}$ κατά τη διάσπασή του εκπέμπει το σωματίδιο -β με θυγατρικό πυρήνα το μη ραδιενεργό Άζωτο ${}^{14}\text{N}$.

- **Σωματίδιο (ακτινοβολία) γ:** Είναι το φωτόνιο που εκπέμπεται κατά τη μετάβαση ενός πυρήνα από κάποια διεγερμένη ενεργειακή στάθμη σε κάποια άλλη χαμηλότερη και έχει ενέργεια ίση με τη διαφορά ενέργειας των δύο σταθμών (0,1 έως 10 MeV περίπου). Η μόνη διαφορά του θυγατρικού από το μητρικό πυρήνα είναι ότι αυτός βρίσκεται σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη.

Διάρκεια ημίσειας ζωής ή χρόνος υποδιπλασιασμού: Ο χρόνος ημιζωής $T_{1/2}$ ενός ραδιοϊσοτόπου ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε ο αρχικός πυρηνικός πληθυσμός, ανεξάρτητα από την ποσότητά του και την ηλικία του, να

μείνει ο μισός. Έτσι για παράδειγμα το Ουράνιο ^{238}U που με τη διάσπασή του εκπέμπει α σωματίδια έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 4,468 δισεκατομμύρια χρόνια και το Ράδιο ^{226}Ra έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 1.600 χρόνια (Οικονόμου, 1989).

Μονάδα ραδιενέργειας είναι το **Bequerel (Bq)**, που αντιστοιχεί σε μία διάσπαση ασταθούς πυρήνα ανά δευτερόλεπτο. Επειδή είναι πολύ μικρή μονάδα χρησιμοποιούνται τα πολλαπλάσιά της: $1 \text{ kBq} = 10^3 \text{ Bq}$, $1 \text{ MBq} = 10^6 \text{ Bq}$, $1 \text{ GBq} = 10^9 \text{ Bq}$. Μια άλλη μονάδα μέτρησης της ραδιενέργειας είναι το Κιουρί (Curie): $1 \text{ Ci} = 37.000 \text{ MBq}$, με υποδιαιρέσεις: millicurie, microcurie, nanocurie, picocurie, όπου το καθένα είναι ίσο με το ένα χιλιοστό του προηγούμενου του ($1 \text{ Bq} = 27 \text{ pCi}$).

Νόμος ραδιενέργειας, εξίσωσης Bateman: Η ενεργότητα (activity) ενός δείγματος ορίζεται ως ο ρυθμός αποδιέγερσης των ραδιενεργών πυρήνων, ο οποίος περιγράφεται με την εξίσωση:

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N(t)$$

Όπου N ο αριθμός των πυρήνων του δείγματος τη χρονική στιγμή t και λ η σταθερά αποδιέγερσης με χαρακτηριστική τιμή για κάθε πυρήνα:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Ο χρόνος $T_{1/2}$ είναι ο χρόνος ημιζωής του δείγματος, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε η ραδιενέργεια του δείγματος να μειωθεί στο μισό της αρχικής τιμής. Στο σύστημα μονάδων SI, ως μονάδα μέτρησης της ενεργότητας ορίζεται το Bequerel (Bq).

1.3 Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας

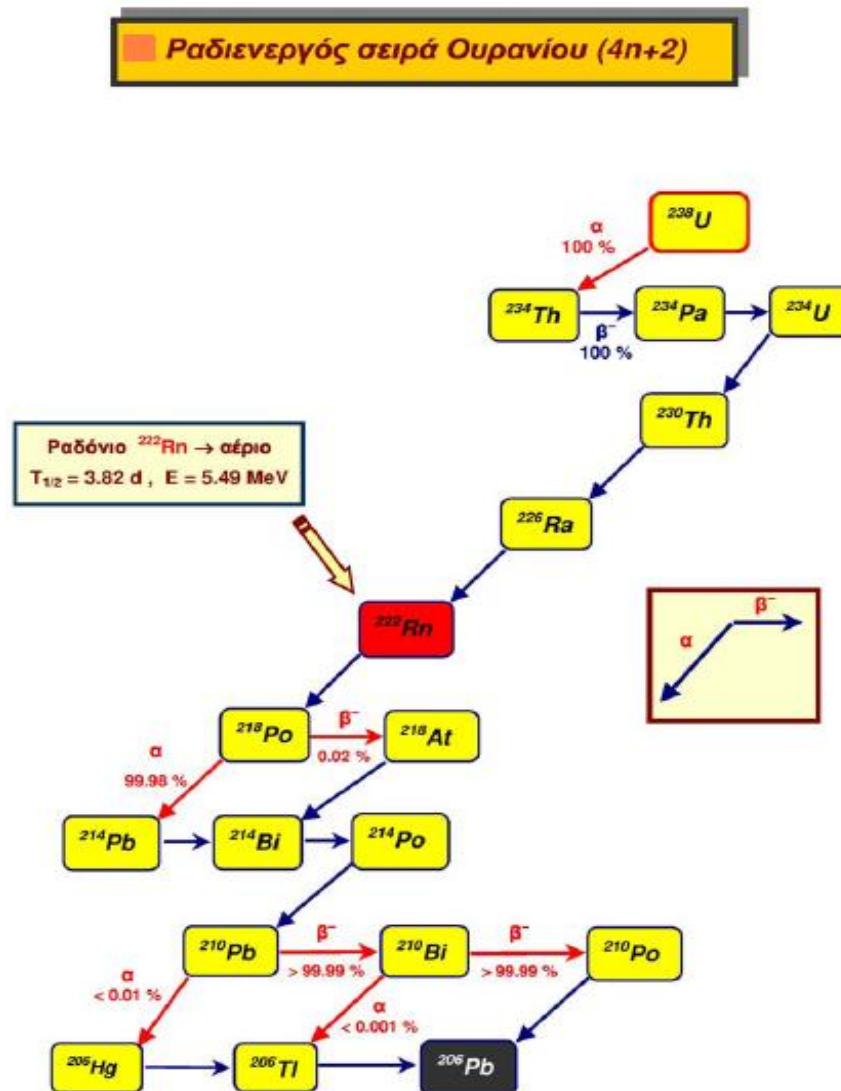
Αν και η μέτρηση των συγκεντρώσεων Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την υγεία του ανθρώπου, απαιτεί συνήθως πολύ ακριβό εξοπλισμό. Αντί γι' αυτό μπορούμε να επιλέξουμε μια απλή και φτηνή μέθοδο που μας επιτρέπει ωστόσο να έχουμε ασφαλή αποτελέσματα. Εκθέτοντας σε ραδιενέργεια τους παθητικούς ανιχνευτές CR-39, μπορούμε να μετρήσουμε τα ίχνη που αφήνουν πάνω τους τα α -σωματίδια και να υπολογίσουμε στη συνέχεια τη μέση συγκέντρωση Ραδονίου κατά τη διάρκεια του χρόνου έκθεσης.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη μεθόδου ανίχνευσης Ραδονίου με παθητικούς ανιχνευτές τύπου CR-39. Πιο συγκεκριμένα να μελετηθούν οι ανιχνευτές CR-39 (TASTRAK) και ο τρόπος χημικής τους χάραξης με καυστικό διάλυμα ώστε τα ίχνη που έχουν καταγραφεί από τις διασπάσεις Ραδονίου να γίνουν ορατά. Επίσης σκοπός της εργασίας ήταν να αναπτυχθεί μέθοδος καταμέτρησης των ιχνών μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης του μικροσκοπίου και τυποποίησης της αναγνώρισής τους σε σχέση με ίχνη τα οποία προέρχονται από φθορές της επιφάνειας των ανιχνευτών. Από τα αποτελέσματα της καταμέτρησης στόχος μας ήταν να κατασκευάσουμε καμπύλη βαθμονόμησης ώστε να προκύψει ένας συντελεστής βαθμονόμησης που θα συνδέει την πυκνότητα των ιχνών με τη συνολική έκθεση στην οποία έχουν εκτεθεί οι ανιχνευτές.

Κεφάλαιο 2: Ραδόνιο

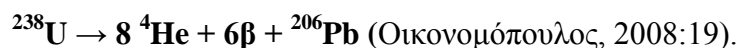
2.1 Γενικά για το Ραδόνιο

Το αδρανές αέριο Ραδόνιο ανακαλύφθηκε το 1900 στο Halle της Γερμανίας από τον Dorn, που το ονόμασε «εκροή Ραδίου» (radium emanation), ενώ απομονώθηκε το 1908 από τους Ramsay και Gray, οι οποίοι και προσδιόρισαν την πυκνότητά του (είναι το βαρύτερο από όλα τα ευγενή αέρια) (L.A. National Laboratory). Εμφανίζει 27 ισοτοπικές μορφές, από το ^{200}Rn μέχρι το ^{226}Rn , αλλά τρία από τα ισότοπά του είναι τα πιο γνωστά: το Ραδόνιο ^{222}Rn , το Ακτινόνιο ^{219}Rn και το Θορόνιο ^{220}Rn . Το Ραδόνιο ^{222}Rn ανήκει στη φυσική ραδιενεργό σειρά του Ουρανίου (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Σειρά διάσπασης Ουρανίου ^{238}U (Πηγή: Τσέρτος, χχ)

Το μητρικό ραδιοϊσότοπο της φυσικής ραδιενεργού σειράς Ουρανίου είναι το ^{238}U και το τελικό θυγατρικό της ο Μόλυβδος ^{206}Pb . Οκτώ από τα μέλη της σειράς εκπέμπουν σωματίδια-α και τα υπόλοιπα έξι, σωματίδια-β. Το Ραδόνιο ^{222}Rn είναι το έκτο από το σύνολο των δεκατεσσάρων παραγώγων. Η συνολική σειρά του ^{238}U είναι:

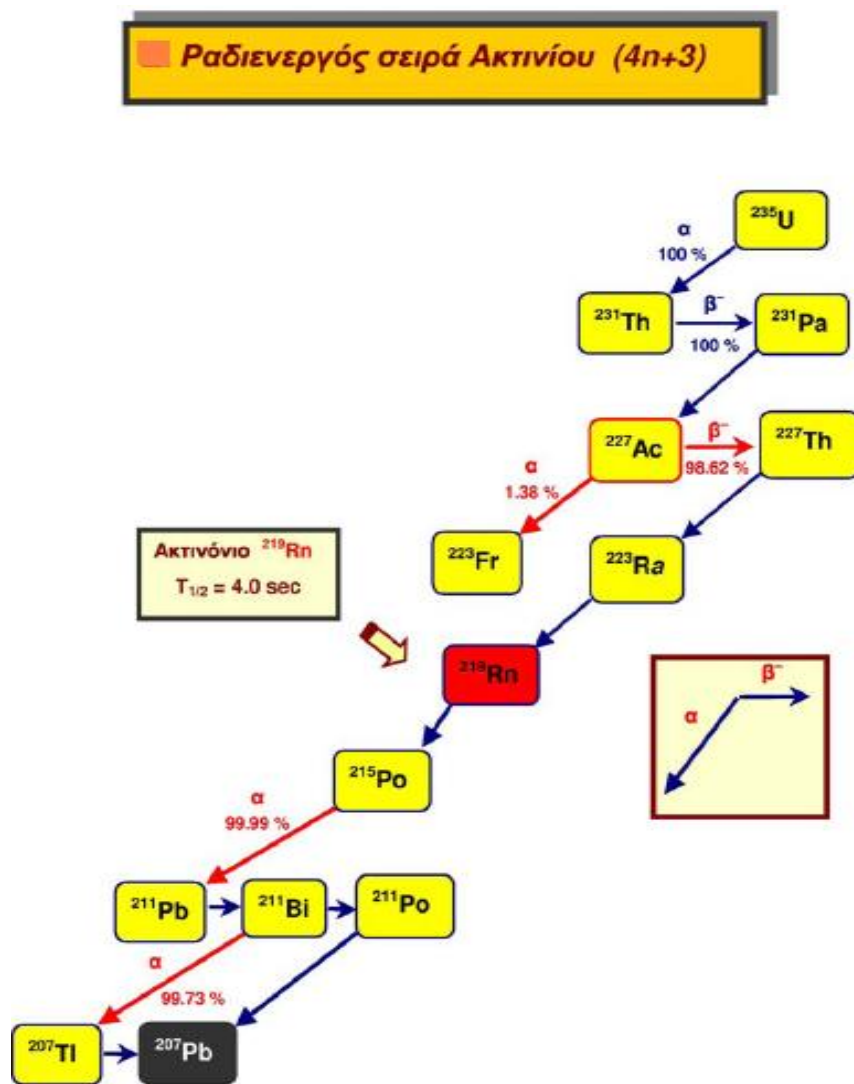


Το Ραδόνιο ^{222}Rn παράγεται με α-διάσπαση του ασταθούς ισότοπου του Ραδίου ^{226}Ra και δίνει ένα σύνολο ισωτόπων, τα οποία χωρίζονται σε δύο ομάδες:
 α) τα βραχύβια θυγατρικά ισότοπα: ^{218}Po (RaA), ^{214}Pb (RaB), ^{214}Bi (RaC), ^{210}Po (RaC), με χρόνους ημίσειας ζωής μικρότερους των 30 λεπτών (**Πίνακας 2.1**).
 β) τα μακρόβια θυγατρικά ισότοπα: ^{210}Pb (RaD), ^{210}Bi (RaE), ^{210}Po (RaF), με χρόνους ημίσειας ζωής μεγαλύτερους της μιας ημέρας (UNSCEAR, 1988).

Στοιχεία	Z	Εκπομπή	Ημι-ζωή
Ουράνιο-238	92	α	$4,51 \times 10^9$ έτη
Θόριο-234	90	β, γ	24,1 ημέρες
Προτακτίνιον-234	91	β, γ	1,18 λεπτά
Ουράνιο-234	92	α	$2,48 \times 10^5$ έτη
Θόριο-230	90	α	8×10^4 έτη
Ράδον-226	88	α, γ	1622 έτη
Ραδόνιο-222	86	α	3,825 ημέρες
Πολώνιον-218	84	α, β	3,05 λεπτά
Μόλυβδος-214	82	β, γ	26,8 λεπτά
Αστατίνη-218	85	α	2 δευτερόλεπτα
Βισμούθιο-214	83	β, α, γ	19,7 λεπτά
Πολώνιο-214	84	α	$1,6 \times 10^{-4}$
Θάλλιον-210	81	β, γ	1,3 λεπτά
Μόλυβδος-210	83	β, γ	20 έτη
Βισμούθιο-210	83	β, α	5,0 ημέρες
Πολώνιο-210	84	α	138,4 ημέρες
Θάλλιον-206	81	β	4,2 λεπτά
Μόλυβδος-206	82	σταθερό	

Πίνακας 2.1: Σειρά της ραδιενεργής μεταστοιχείωσης του Ουρανίου-238

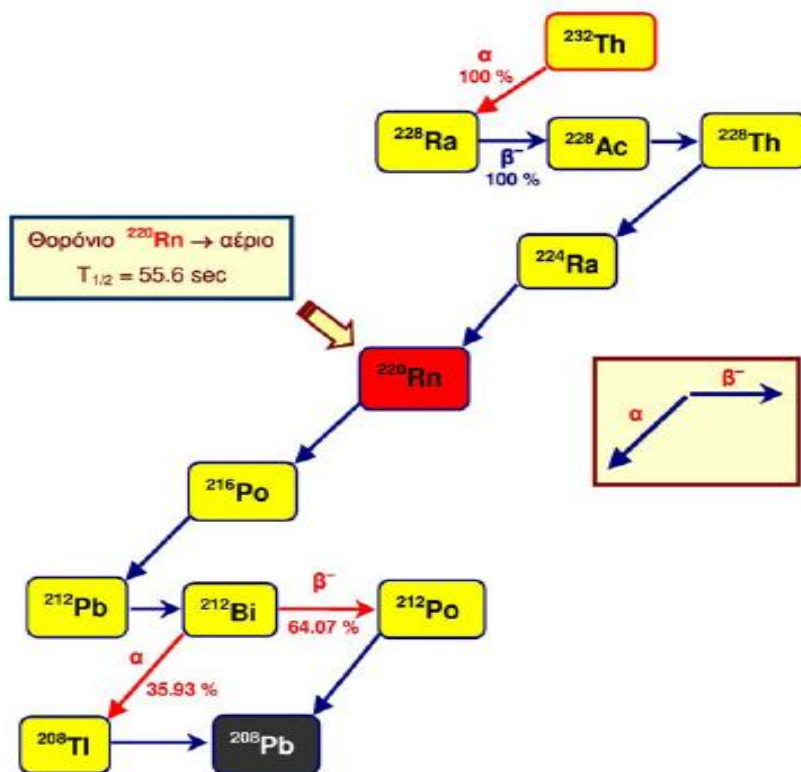
Το Ακτινόνιο ^{219}Rn ανήκει στη φυσική ραδιενεργό σειρά του Ακτινίου (Σχήμα 2.2). Το μητρικό ραδιοϊσότοπο της σειράς αυτής είναι το Ουράνιο ^{235}U και το τελικό θυγατρικό ο Μόλυβδος ^{207}Pb . Επτά σωματίδια- α και τέσσερα σωματίδια- β εκπέμπονται από τα μέλη της συγκεκριμένης ραδιενεργού σειράς (Οικονομόπουλος, 2008).



Σχήμα 2.2: Σειρά διάσπασης Ακτινίου (Πηγή:(Τσέρτος, χχ).

Το Θωρόνιο ^{220}Rn ανήκει στη φυσική ραδιενεργό σειρά του Θωρίου (Σχήμα 2.3). Το μητρικό ραδιοϊσότοπο της σειράς αυτής είναι το Θόριο ^{232}Th και το τελικό θυγατρικό ο Μόλυβδος ^{208}Pb . Έξι σωματίδια- α και τέσσερα σωματίδια- β εκπέμπονται από τα μέλη της συγκεκριμένης ραδιενεργού σειράς (Οικονομόπουλος, 2008).

Ραδιενεργός σειρά Θορίου (4n)



Σχήμα 2.3: Σειρά διάσπασης Θορίου (Πηγή: Τσέρτος, χχ).

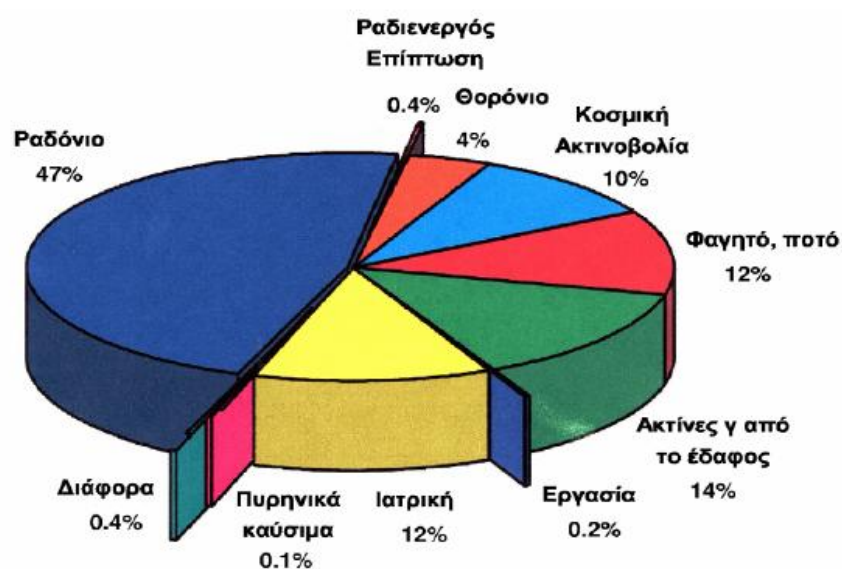
Στη συνέχεια της εργασίας μας όταν κάνουμε λόγο για Ραδόνιο θα αναφερόμαστε στο Ραδόνιο ^{222}Rn . Το Ραδόνιο ^{222}Rn θεωρείται το σημαντικότερο από τα τρία ισότοπα λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο ημιζωής και τη σχετική τους αφθονία. Το Ραδόνιο ^{222}Rn έχει το μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής (3.8d) σε σχέση με αυτόν του ^{220}Rn που είναι 55.6s και του ^{219}Rn που είναι μόλις 4s και είναι το μόνο που μπορεί να μεταφερθεί σε αρκετά μεγάλη απόσταση από την πηγή του, λόγω του χρόνου υποδιπλασιασμού του (Νικολόπουλος 2000; Singh et al., 1986).

Επιπλέον, οι συγκεντρώσεις του Ραδονίου ^{222}Rn στο έδαφος είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές του Ακτινίου ^{219}Rn και παρότι ο ρυθμός παραγωγής του ^{222}Rn και του Θορονίου ^{220}Rn είναι περίπου ίδιος, λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής του δεύτερου, το μεγαλύτερο ποσοστό του δεν προλαβαίνει να διαχυθεί στην ατμόσφαιρα. Έτσι το ποσοστό συνεισφοράς του ^{220}Rn στις μετρήσεις Ραδονίου θεωρείται συνήθως αμελητέο. Για το λόγο αυτό, από πλευράς ακτινοβολίας το ^{222}Rn

θεωρείται 20 φορές πιο σημαντικό από το ^{220}Rn (Durrani & Ilic, 1997; Singh et al., 1986; Σιμόπουλος, 1989).

Το Ραδόνιο διαφεύγει και διαχέεται στο περιβάλλον από τα υλικά που βρίσκονται σε επαφή με την ατμόσφαιρα και περιέχουν Ουράνιο ^{238}U καθώς και τα θυγατρικά του ραδιοϊσότοπα (Αντωνόπουλος-Ντόμης, 2004:108). Κύριες πηγές έκλυσης Ραδονίου στο ανθρώπινο περιβάλλον είναι τα εδάφη γύρω από τις κατοικίες καθώς και τα οικοδομικά υλικά, αφού τα ισότοπά του βρίσκονται σε πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση στο έδαφος από ότι στον ατμοσφαιρικό αέρα (10^3 - 10^4 φορές). Στη βιβλιογραφία σημειώνεται ότι οι εκροές Ραδονίου από οικοδομικά υλικά (σκυρόδεμα, γρανίτες, διάφορα είδη τσιμεντόλιθων) μπορεί να φτάσουν μέχρι $50 \text{ Bqm}^2 \text{ h}^{-1}$ (Louizi et al., 1994). Άλλες μικρότερης σημασίας πηγές έκλυσής του, όπως θα αναφέρουμε αναλυτικότερα στη συνέχεια της εργασίας μας, είναι το νερό του υπεδάφους, οι ιαματικές πηγές, διάφορα φυσικά αέρια κλπ. (UNSCEAR, 2000).

Κατά την αποδιέγερσή του, το Ραδόνιο διασπάται σε Πολώνιο εκπέμποντας σωματίδια-α και ακτίνες γ. Περίπου το 47% της συνολικής ετήσιας δόσης ραδιενέργειας που λαμβάνει ο μέσος κάτοικος της γης οφείλεται στο Ραδόνιο και στα θυγατρικά του ραδιοϊσότοπα (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Παράγοντες που συνεισφέρουν στη μέση ετήσια δόση (2,4 mSv) του μέσου κατοίκου του πλανήτη. Το 47% προέρχεται από ραδόνιο (Πηγή: ΕΕΑΕ 2005).

Η εισπνοή τους μπορεί να επιφέρει βλάβες στον πνευμονικό ιστό, προκαλώντας καρκίνο του πνεύμονα. Όμως η ύπαρξη Ραδονίου στη φύση δεν έχει

μόνο επιβλαβή αποτελέσματα, αφού προσφέρει και πολλά οφέλη στον άνθρωπο, όπως είναι η ανίχνευση κοιτασμάτων Ουρανίου, ο εντοπισμός γεωθερμικών πεδίων, η χρήση του στην πρόγνωση σεισμών και ηφαιστειακής δραστηριότητας κλπ (Fleischer, 1988; Segovia et al., 1995; Khalil et al., 2002; Wattananikorn et al., 1998; Karagelos, et al., 2002). Τα επίπεδα συγκέντρωσης του Ραδονίου, που αναδύεται μέσα από το στερεό φλοιό της γης, εξαρτώνται από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους αλλά και από ατμοσφαιρικούς παράγοντες όπως είναι η υγρασία και η βαρομετρική πίεση.

2.2 Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες Ραδονίου

Το Ραδόνιο ^{222}Rn έχει ατομικό αριθμό 86 και ηλεκτρονική δομή ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$) που δεν επιτρέπει τη συμμετοχή του σε μεγάλο αριθμό αλληλεπιδράσεων, λόγω της σχετικά χαμηλής ενέργειας ιονισμού του (10.74 eV) (Πατήρης, 2009). Το Ραδόνιο είναι ένα φυσικό άχρωμο, άοσμο, άγευστο, ραδιενεργό αέριο, το βαρύτερο μέλος της ομάδας των ευγενών αερίων (περίπου 100 φορές βαρύτερο από το υδρογόνο). Φωσφορίζει έντονα όταν ψύχεται κάτω από το σημείο υγροποίησής του, γίνεται κίτρινο σε χαμηλές θερμοκρασίες και κόκκινο-πορτοκαλί στη θερμοκρασία του υγρού οξυγόνου. Στον πίνακα που ακολουθεί (**Πίνακας 2.2**) εμφανίζονται οι φυσικές ιδιότητες του Ραδονίου.

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ	
Πυκνότητα (1atm και 0° C)	9,73 gL ⁻¹
Σημείο ζέσεως (1 atm)	-62° C
Συντελεστής διάχυσης στον αέρα	0,1 cm ² s ⁻¹
Συντελεστής διάχυσης στο νερό	10 ⁻⁵ cm ² s ⁻¹
Ιξώδες (1atm και 20° C)	0,229 poise
Διαλυτότητα στο νερό (1atm και 20° C)	230 cm ³ kg ⁻¹
Διαλυτότητα στη γλυκερίνη (1atm και 18° C)	0,2 cm ³ kg ⁻¹

Πίνακας 2.2: Φυσικές ιδιότητες ραδονίου (Πηγή: Οικονομόπουλος 2008)

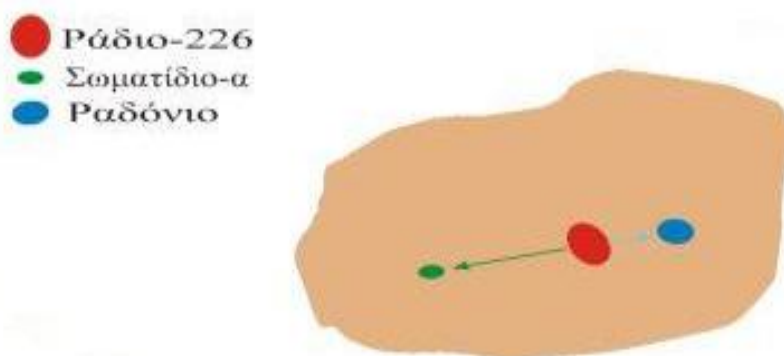
2.3 Σχηματισμός και μεταφορά Ραδονίου

Πηγή Ραδονίου ονομάζουμε κάθε εστία παραγωγής ή κάθε αφετηρία διαφυγής Ραδονίου. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται επειδή υπάρχουν πηγές οι οποίες παράγουν συνεχώς Ραδόνιο (όσες περιέχουν ^{226}Ra) και άλλες που είναι εμπλουτισμένες σε Ραδόνιο, ως αποτέλεσμα της χημικής διάλυσής του. Το έδαφος της γης, για παράδειγμα, και όλα τα υλικά που προέρχονται απ' αυτό ανήκουν στο πρώτο είδος πηγών, ενώ ο ατμοσφαιρικός αέρας και το φυσικό αέριο στο δεύτερο.

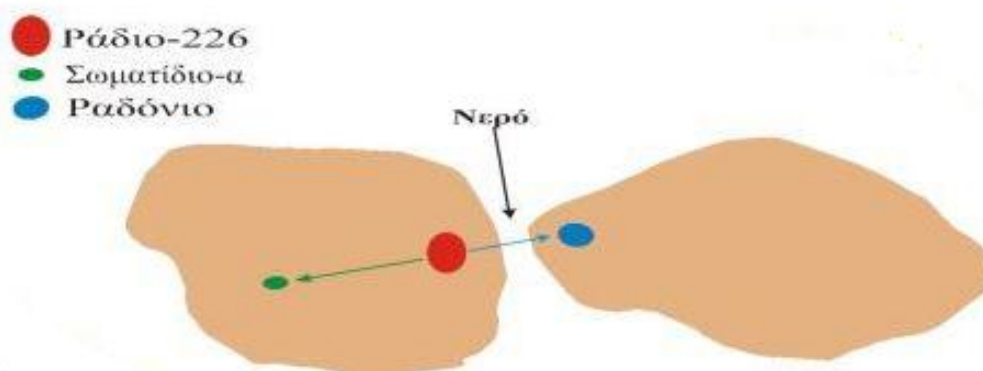
Για να σχηματιστεί το Ραδόνιο περνάει πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα επειδή το Ουράνιο ^{238}U , το πρώτο δηλαδή μέλος της συγκεκριμένης ραδιενεργής σειράς, έχει χρόνο υποδιπλασιασμού $4,5 \times 10^9$ y, όσο περίπου η ηλικία του πλανήτη γη. Αυξημένες συγκεντρώσεις Ουρανίου υπάρχουν στους γρανίτες, στα φωσφορικά άλατα, στους σχιστόλιθους, καθώς και σε βραχώδεις περιοχές στις οποίες βρίσκονται ορυχεία Ουρανίου (Durrani & Ilic, 1997). Έτσι το Ραδόνιο ^{222}Rn ανιχνεύεται στους κόκκους των εδαφικών πετρωμάτων και παρότι το Ουράνιο και το Ράδιο που είναι στερεά στοιχεία εγκλωβίζονται εκεί, αυτό σαν αέριο που είναι μπορεί να διαφύγει. Η διαφυγή του βέβαια εξαρτάται από κάποιες φυσικές ιδιότητες του εδάφους όπως είναι η υγρασία, το πορώδες, η διαπερατότητα σε νερό και αέρα και το μέγεθος των κόκκων.

Ο τρόπος με τον οποίο εισέρχεται στην ατμόσφαιρα το Ραδόνιο από τη γη είναι η διάχυση μέσα από ρωγμές και πόρους και η απορροή του από την επιφάνεια του εδάφους. Το Ραδόνιο που παράγεται κατά την απορροή (emanation) διαφεύγει από τους κόκκους και εισέρχεται στους πόρους του υλικού. Έτσι ορίζουμε ως παράγοντα απορροής του Ραδονίου (η) το ποσοστό από το συνολικά παραγόμενο Ραδόνιο που εισέρχεται στους πόρους του υλικού στη μονάδα του χρόνου. Οι μηχανισμοί μέσω των οποίων συντελείται το φαινόμενο της απορροής είναι κυρίως η ανάκρουση του πυρήνα του Ραδονίου κατά τη διάσπαση του Ra^{226} (recoil emanation) και σε μικρότερο βαθμό η διάχυση του Ραδονίου από τους κόκκους (diffusion emanation) (Στούλος, 1998). Πιο αναλυτικά, αφού πραγματοποιηθεί η διάσπαση του Ραδίου, δημιουργείται ένας πυρήνας Ραδονίου ο οποίος με την ανάκρουση αποκτά κινητική ενέργεια. Με βάση την ενέργεια αυτή και ανάλογα με το υλικό του κόκκου ο συγκεκριμένος πυρήνας έχει τρεις δυνατότητες: α) να παραμείνει στον ίδιο κόκκο (**Σχήμα 2.5**), β) να μετακινηθεί από έναν κόκκο σε κάποιον γειτονικό (**Σχήμα 2.6**)

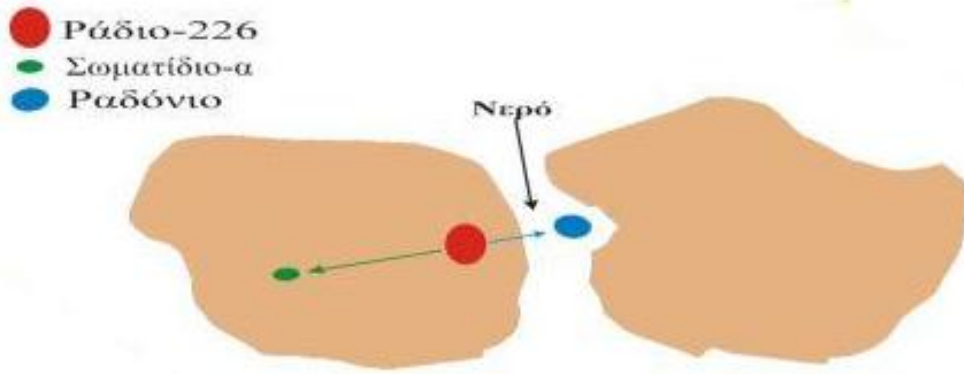
και γ) να βγει από τον κόκκο και να περάσει στον αέρα ή στο νερό που βρίσκεται ανάμεσα στους κόκκους (Σχήμα 2.7). Σημειώνεται ότι η κινητική ενέργεια που αποκτά ο ανακρουόμενος πυρήνας Ραδονίου είναι αρκετά μικρή (Νικολόπουλος, 2000; Οικονομόπουλος, 2008). Έτσι το μήκος ανάκρουσης (recoil path) για το ^{222}Rn κυμαίνεται από 20 μέχρι 70 nm για τα κοινά ορυκτά υλικά της γης, 100 nm για το νερό και 63 nm για τον αέρα. Η υγρασία του εδάφους παίζει σπουδαίο ρόλο στην απελευθέρωση του Ραδονίου από το έδαφος και στη διάχυσή του στο χώμα, καθ' όσον το μήκος ανακρούσεως είναι μεγαλύτερο στο νερό, όπως προαναφέρθηκε. Έτσι, αυξάνεται η πιθανότητα τα άτομα του Ραδονίου να παραμείνουν στους πόρους, παρά να απελευθερώνονται από τους κόκκους (Παπαστεφάνου, 2010:60-62).



Σχήμα 2.5: Ανακρουόμενο άτομο Ραδονίου παραμένει στον ίδιο κόκκο.



Σχήμα 2.6: Ανακρουόμενο άτομο μεταβαίνει σε γειτονικό κόκκο



Σχήμα 2.7: Ανακρουόμενο άτομο μεταβαίνει σε διάκενο των κόκκων (Πηγή: Οικονομόπουλος, 2008).

Επειδή το Ραδόνιο ^{222}Rn είναι το μακροβιότερο από τα άλλα ραδιενεργά ισότοπα (Θορόνιο ^{220}Rn και Ακτινόνιο ^{219}Rn) μπορεί να προέρχεται από βαθύτερα στρώματα του εδάφους σε αντίθεση με τα άλλα δύο που προέρχονται από μικρά βάθη, αφού μπορούν να διασπαστούν κατά την έξοδό τους από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα. Σε κάθε περίπτωση οι συγκεντρώσεις Ραδονίου ενδέχεται να υφίστανται διακυμάνσεις που εξαρτώνται από ατμοσφαιρικά φαινόμενα και παραμέτρους, όπως είναι η θερμοκρασία, η ατμοσφαιρική πίεση, οι βροχοπτώσεις, το μέγεθος των σεισμών κλπ. (Παπαστεφάνου, 2010: 20).

2.4 Βιολογικές Επιπτώσεις Ραδονίου και Θυγατρικών του

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του ραδιοϊσότοπα συνεισφέρουν περίπου κατά 50% στη συνολική δόση ραδιενέργειας που δέχεται ο άνθρωπος από φυσικές πηγές. Αυτά εισπνεόμενα εγκαθίστανται στο πνευμονικό επιθήλιο το οποίο και ακτινοβολούν προκαλώντας καρκίνο του πνεύμονα (Λουΐζη & Νικολόπουλος, 1998). Μόλις τη δεκαετία του '50 έγινε αντιληπτό ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της δόσης που δέχονται οι πνεύμονες μετά την εισπνοή Ραδονίου οφείλεται στα βραχύβια προϊόντα της ραδιενεργού διάσπασής του και όχι στο ίδιο το αέριο. Αυτό συμβαίνει επειδή το χημικά αδρανές εισπνεόμενο Ραδόνιο, που έχει σχετικά μεγάλο χρόνο ημιζωής, συγκρινόμενο με το χρόνο της αναπνοής, δεν προλαβαίνει να διασπαστεί όλο. Έτσι από το Ραδόνιο που εισέρχεται στους πνεύμονες με την αναπνοή, ένα μικρό μόνο μέρος διαλύεται στο αίμα και διαχέεται σε ολόκληρο το σώμα και ένα άλλο μέρος επιστρέφει στην ατμόσφαιρα με την εκπνοή

(Αντωνόπουλος-Ντόμης (2004:109). Το υπόλοιπο διασπάται στα στερεά θυγατρικά του ραδιοϊσότοπα, που είναι χημικά ενεργά και βραχύβια. Αυτά εγκαθίστανται στους ιστούς του αναπνευστικού συστήματος και πιθανόν να προλάβουν να διασπαστούν στο μακρόβιο ^{210}Pb πριν απωθηθούν με το μηχανισμό της αναπνοής, εναποθέτοντας με τον τρόπο αυτό ενέργεια και προκαλώντας έντονο ιονισμό. Έτσι αλλοιώνεται η δομή μεγαλομοριακών σχηματισμών στο εσωτερικό του κυττάρου με αποτέλεσμα την απορρύθμιση της λειτουργίας και πιθανόν την καρκινογένεση αργότερα (Νικολόπουλος, 2000). Το Ραδόνιο μπορεί επίσης, υπό ορισμένες συνθήκες να επηρεάσει εκτός από τους πνεύμονες το δέρμα και το στομάχι.

Τις δεκαετίες '60 και '70 αρκετές μελέτες έδειξαν αυξημένη θνησιμότητα των εργαζομένων σε ορυχεία (Ουρανίου και άλλα), η οποία φάνηκε να έχει σχέση με την έκθεση σε Ραδόνιο. Όπως αναφέρει ο Σιδέρης (1989:144) έρευνα των τελευταίων χρόνων έδειξε ότι μεταξύ των μεταλλωρύχων που εργάζονται σε ορυχεία Ουρανίου στη Ρωσία, τον Καναδά, την Κίνα και την Τσεχοσλοβακία καταγράφεται συχνά καρκίνος των βρόγχων και του πνεύμονα. Το γεγονός αυτό φαίνεται να οφείλεται στη συγκέντρωση Ραδονίου ^{222}Rn στους πνεύμονες των εργαζομένων, αλλά και στην εξωτερική ακτινοβολία που δέχονται από εναποθέσεις Ραδίου ^{226}Ra στα τοιχώματα των στοών του ορυχείου. Σε άλλες έρευνες μελετήθηκε επίσης η πρόκληση γενετικών ανωμαλιών και η επίδρασή του Ραδονίου στο ανοσοποιητικό σύστημα των μεταλλωρύχων. Παράλληλα έγιναν και πειραματικές μελέτες, οι οποίες έδειξαν ότι η εισπνοή του Ραδονίου προκαλεί αλλοιώσεις και καρκίνο στους πνεύμονες των ζώων. Πρόσφατες έρευνες σε Ευρώπη, Βόρεια Αμερική και Κίνα επιβεβαιώνουν ότι ακόμη και χαμηλότερη συγκέντρωση Ραδονίου, όπως αυτή που ανιχνεύεται στο εσωτερικό των σπιτιών μπορεί να ευθύνεται, υπό συνθήκες, για τον καρκίνο του πνεύμονα (WHO, 2009).

Σε κάθε περίπτωση η έκθεση του πνεύμονα στη ραδιενέργεια εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η συγκέντρωση των ραδιοϊσοτόπων στον αέρα, ο ρυθμός αναπνοής, οι φυσικές ιδιότητες των ραδιοϊσοτόπων, η περιοχή του πνεύμονα όπου εναποτίθεται η σκόνη και ο ρυθμός απομάκρυνσής της (Ιωαννίδης,1992).

Μερικοί από τους παραπάνω παράγοντες, όπως είναι η μέση συγκέντρωση Ραδονίου μπορούν να προσδιοριστούν σχετικά εύκολα, ενώ κάποιοι άλλοι, όπως είναι οι συγκεντρώσεις θυγατρικών δεν είναι εύκολο να μετρηθούν σε συστηματική και ευρείας κλίμακας βάση. Σήμερα η εκτίμηση του κινδύνου από την έκθεση σε Ραδόνιο γίνεται με τους παρακάτω τρεις τρόπους: α) δοσιμετρικά μοντέλα, β) επιδημιολογικές

μελέτες εργατών σε ορυχεία και γ) επιδημιολογικές μελέτες γενικού πληθυσμού (Νικολόπουλος, 2000).

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO, 2009) το 3-14% των περιστατικών καρκίνου του πνεύμονα αποδίδονται σε έκθεση στο Ραδόνιο. Όπως αναφέρει ο Σιμόπουλος (1989:156) 10.000 περίπου θάνατοι από καρκίνο του πνεύμονα, από τους 130.000 που καταγράφονται ετησίως στην Αμερική, μπορούν να αποδοθούν στα υψηλά επίπεδα Ραδονίου που υπάρχει στα σπίτια και το οποίο εισέρχεται από το έδαφος μέσω των θεμελίων και άλλων οδών.

2.4.1 Επιτρεπτά όρια Ραδονίου

Διάφορα κράτη και διεθνείς οργανισμοί έχουν θεσπίσει κανονισμούς, έχουν εκδώσει οδηγίες και έχουν ψηφίσει νόμους για την καλύτερη προστασία του κοινού από το Ραδόνιο. Στις νομοθετικές ρυθμίσεις ελέγχου γίνεται καθορισμός των μέγιστων επιτρεπόμενων συγκεντρώσεων Ραδονίου, η υπέρβαση των οποίων άλλοτε πρέπει να συνοδεύεται από απλό έλεγχο και άλλοτε από συγκεκριμένες δράσεις. Στην πρώτη περίπτωση τα όρια ονομάζονται επίπεδα αναφοράς (reference levels-limits) και στη δεύτερη επίπεδα δράσης (action levels-limits) (Νικολόπουλος, 2000).

Λαμβάνοντας υπόψη τους κινδύνους από την έκθεση του ανθρώπου σε Ραδόνιο, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας μείωσε στο 1/10 το συνιστώμενο μέγιστο επιτρεπτό όριό του και με το εγχειρίδιο που εξέδωσε με τίτλο «Το Ραδόνιο σε εσωτερικούς χώρους» (Handbook on Indoor Radon) κάλεσε τις αρχές δημόσιας υγείας αλλά και τις βιομηχανίες να πάρουν τα κατάλληλα μέτρα. Τα νέα προτεινόμενα επίπεδα αναφοράς είναι πλέον $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, ενώ το προηγούμενο συνιστώμενο μέγιστο όριο που είχε εκδοθεί το 1996 ήταν $1.000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Με την οδηγία 593 επίσης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (COM(2011), τα επίπεδα αναφοράς δεν πρέπει να υπερβαίνουν (κατά μέσο όρο ετησίως) τα $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ για νέες κατοικίες και τα $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ για υφιστάμενες κατοικίες και κτίρια στα οποία έχει πρόσβαση το κοινό. Εκτός από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας και άλλοι εθνικοί και διεθνείς οργανισμοί έχουν θεσπίσει τις δικές τους τιμές ορίων. Στον **Πίνακα 2.3** συγκεντρώνονται οι σημαντικότεροι από αυτούς και τα όρια που έχουν θέσει για τις συγκεντρώσεις Ραδονίου σε κατοικίες.

Οι πρώτες χώρες επίσης, στις οποίες έγιναν εκτεταμένες μετρήσεις συγκέντρωσης Ραδονίου στις κατοικίες και καθιερώθηκαν από πολύ νωρίς επίπεδα δράσης ήταν η Σουηδία, οι Η.Π.Α., το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ελβετία και η Γερμανία

κ.ά. Πιο αναλυτικά στη Σουηδία από το 1990 έχουν καθιερωθεί ως επίπεδα δράσης τα $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ για τις υπάρχουσες κατοικίες και τα $140 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ για τις νεόδμητες. Στις Η.Π.Α. τα επίπεδα δράσης δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα $150 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ κατά μέσο όρο ετησίως, σε όλες τις κατοικίες και στο Ηνωμένο Βασίλειο τα $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Η Γερμανία επίσης έχει εκδώσει συστάσεις από το 1994 σύμφωνα με τις οποίες τα επίπεδα αναφοράς είναι τα $250 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Η ίδια χώρα εξέδωσε συστάσεις για περαιτέρω έλεγχο σε κατοικίες που παρουσιάζουν τιμές υψηλότερες των $1.000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Νικολόπουλος, 2000).

Οργανισμός	Υπάρχουσες κατοικίες ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)	Νεόδμητες κατοικίες ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)
ΕΕΑΕ	400	200
ICRP	400	200
CEC	400	200
WHO	200	200
EPA	150	150

Πίνακας 2.3: Επιτρεπτά επίπεδα Ραδονίου σε κατοικίες (Πηγή: ICRP: Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας- CEC: Ευρωπαϊκή Κοινότητα)

Στη Ελλάδα έχουν διενεργηθεί μετρήσεις σε 2.000 περίπου κατοικίες για να ανιχνευτεί η συγκέντρωση Ραδονίου, τόσο από την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, όσο και από διάφορα εργαστήρια. Όπως προκύπτει ο αριθμητικός μέσος της συγκέντρωσης είναι $60 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Οι παράγοντες που συντελούν στη μη ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων είναι το γεωλογικό υπόστρωμα, ο τρόπος έδρασης των ελληνικών κατοικιών και οι κλιματολογικές συνθήκες (ΕΕΑΕ, 2005).

Σύμφωνα με τη σύσταση 90/143/EURATOM 21/02/1990 σχετικά με την προστασία του πληθυσμού από την έκθεση στο Ραδόνιο μέσα σε κτήρια, τα επίπεδα αναφοράς για την ανάληψη διορθωτικής δράσης είναι τα $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ και το επίπεδο μελέτης για μελλοντικές κατασκευές ανέρχεται στα $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Στο ίδιο κείμενο, συνιστάται η καθιέρωση ενός κατάλληλου συστήματος για τον περιορισμό οποιασδήποτε έκθεσης στις συγκεντρώσεις Ραδονίου μέσα στα κτήρια.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στη χώρα μας, όσον αφορά τους εργασιακούς χώρους, σύμφωνα με τον κανονισμό Ακτινοπροστασίας (ΦΕΚ 216B, 5/3/2001), που

είναι πλήρως εναρμονισμένος με την Οδηγία 96/29/EURATOM 31/5/1996, τα επίπεδα δράσης για τη συγκέντρωση Ραδόνιου είναι:

α) Εργασιακοί χώροι στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών), είναι μικρότερη από $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ εξαιρούνται περαιτέρω ελέγχου και μέτρων ακτινοπροστασίας.

β) Σε εργασιακούς χώρους στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών), είναι μεγαλύτερη από $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ και μικρότερη από $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ θα πρέπει να διερευνηθεί η δυνατότητα μείωσης των ανωτέρω συγκεντρώσεων με κατάλληλες τεχνικές. Οι χώροι αυτοί χαρακτηρίζονται ως επιβλεπόμενες περιοχές, τα δε λαμβανόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας εγκρίνονται από την ΕΕΑΕ.

γ) Εργασιακοί χώροι στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών), είναι μεγαλύτερη από $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ και μικρότερη από $3000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ χαρακτηρίζονται ως ελεγχόμενες περιοχές και οι πρακτικές αδειοδοτούνται από την ΕΕΑΕ, τα δε λαμβανόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας εγκρίνονται από την ΕΕΑΕ.

δ) Η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση του ραδονίου σε εργασιακούς χώρους, δεν μπορεί να υπερβαίνει τα $3000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ λαμβανομένων υπόψη των 2000 ωρών διάρκειας εργασίας. (ΕΕΑΕ, 2009).

Σε κάθε περίπτωση τα επίπεδα αυτά μπορούν να μειωθούν μέσω πολύ αποτελεσματικών και σχετικά μη δαπανηρών τεχνικών, όπως το σφράγισμα των ρωγμών στα δάπεδα και τους τοίχους και η βελτίωση του εξαερισμού των κτηρίων. Οι Polprong & Bovornkitti (1998) επισημαίνουν ότι η μείωση της εισόδου μπορεί να επιτευχθεί επίσης αντιστρέφοντας τη διαφορά πίεσης μεταξύ κτηρίου και εδάφους. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι είναι πλέον αναγκαία η διεξαγωγή ενημερωτικών εκστρατειών προκειμένου να πληροφορηθεί το κοινό τους πιθανούς κινδύνους από Ραδόνιο, ιδιαίτερα οι εργοδότες που είναι και οι κύριοι υπεύθυνοι για τους χώρους εργασίας θα πρέπει να ελέγχουν συστηματικά τα επίπεδα του αερίου και εάν οι συγκεντρώσεις είναι πάνω από τα επιτρεπτά όρια, να λαμβάνουν διορθωτικά μέτρα (Kendall & Smith, 2002; IAEA, International Labour Office, 2003).

2.5 Συγκέντρωση Ραδονίου σε Εξωτερικούς Χώρους

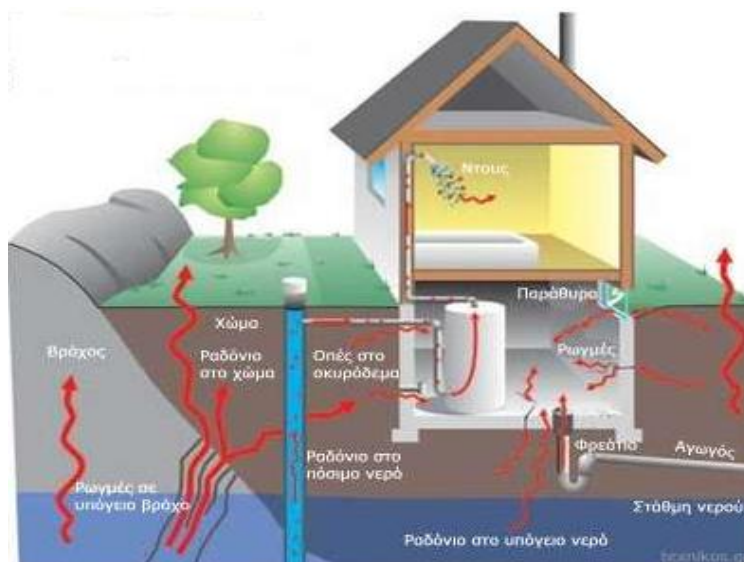
Το Ραδόνιο που παράγεται στο έδαφος από τη μεταστοιχείωση του Ραδίου και των πετρωμάτων Ουρανίου, παρουσιάζει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε μεταμορφωσιγενή, πυριγενή πετρώματα (π.χ. γρανίτης), ενώ απουσιάζει σε περιοχές με ιζηματογενή πετρώματα (π.χ. ασβεστολιθικά) τα οποία είναι και τα πιο συνηθισμένα στον Ελλαδικό χώρο. Επειδή παράγεται στο εσωτερικό των πετρωμάτων και παγιδεύεται εκεί, διαφεύγει αργά προς την ατμόσφαιρα μέσα από πόρους και ρωγμές και όταν εισέλθει σε αυτήν αραιώνεται και διασκορπίζεται. Έτσι εξ' αιτίας των χαμηλών του συγκεντρώσεων στον εξωτερικό αέρα αποτελεί σημαντικά μικρότερο κίνδυνο από ότι στον εσωτερικό. Γενικά στον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα η συγκέντρωση μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Σημειώνεται ότι η κατανομή τόσο του Ραδονίου όσο και των προϊόντων της διάσπασής του στον εξωτερικό αέρα, εξαρτάται από την κατακόρυφη θερμοκρασιακή κλίση, την κατεύθυνση και την ένταση του ανέμου που πνέει στη συγκεκριμένη περιοχή (Δημούδη, 2006).

Πηγές Ραδονίου είναι και το νερό που προέρχεται από υδροφόρα στρώματα σε πετρώματα Ουρανίου και ιδιαίτερα τα νερά των θερμών πηγών (thermal springs) τα οποία είναι πλούσια σε Ράδιο ^{226}Ra . Η διάσπαση του ^{226}Ra και του ^{222}Rn στα νερά αυτά έχει σαν αποτέλεσμα την ανύψωση της θερμοκρασίας μέχρι και του σημείου βρασμού ($100 \text{ }^\circ\text{C}$) (Παπαστεφάνου, 2010: 50-51). Μια ιδιαίτερη περίπτωση είναι τα νερά των πηγαδιών που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος, τα οποία ενδέχεται να έχουν συγκέντρωση Ραδονίου από $100 \text{ KBq}\cdot\text{m}^{-3}$ μέχρι $100 \text{ MBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Αλλά και τα υπόγεια ύδατα των κοιλοτήτων που είναι εμπλουτισμένες με το Ραδόνιο του εδάφους, επιβαρύνουν το δίκτυο ύδρευσης σε πολλές περιπτώσεις (UNSCEAR, 1988). Έντονη μπορεί να είναι επίσης η παρουσία Ραδονίου σε περιπτώσεις που τα υπόγεια νερά κινούνται κοντά σε ρήγματα και περιοχές με ηφαιστειακή δραστηριότητα ή είναι εγκλωβισμένα μέσα σε καρστικές κοιλότητες (Segonia et al., 1997). Στο νερό της θάλασσας αντίθετα η συγκέντρωση του αερίου είναι ιδιαίτερα χαμηλή και για το λόγο αυτό και ο ατμοσφαιρικός αέρας πάνω από τους ωκεανούς παρουσιάζει επίσης πολύ χαμηλά ποσοστά ($\sim 0.1 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$). Έτσι εξηγείται γιατί η συγκέντρωση Ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα των μικρών ιδιαίτερα νησιών και των παράκτιων περιοχών είναι μειωμένη σε σχέση με αυτή των ηπειρωτικών περιοχών (Νικολόπουλος, 2000:20).

Έκλυση Ραδονίου στην ατμόσφαιρα παρατηρείται, τέλος και κατά την καύση γαιάνθρακα στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εξ' αιτίας του γεγονότος ότι η καύσιμη ύλη περιέχει ποσότητες Ουρανίου. Σε κάθε περίπτωση η συγκέντρωση του ^{222}Rn είναι συνάρτηση της γεωγραφικής θέσης της περιοχής και των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν τη συγκεκριμένη εποχή. Συνήθως το ελάχιστο της συγκέντρωσης παρατηρείται την άνοιξη και το καλοκαίρι και το μέγιστο το φθινόπωρο και το χειμώνα. Τέλος, η μέση συγκέντρωση Ραδονίου σε εξωτερικούς χώρους υπό φυσιολογικές συνθήκες είναι περίπου $9 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (NCRP 1988), ενώ σημαντικές μεταβολές μπορεί να εμφανιστούν σε περιόδους βροχής ή αυξημένης υγρασίας, θερμοκρασιακών αναστροφών ή σεισμικής έξαρσης (Nazaroff, 1988).

2.6 Συγκέντρωση Ραδονίου σε Εσωτερικούς Χώρους

Το Ραδόνιο εκλύεται μέσα από τη γη, σε όλα τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη, σε διαφορετικές ποσότητες που εξαρτώνται από την περιεκτικότητα του φλοιού σε ραδιενεργά κοιτάσματα. Όταν με διάφορους τρόπους φτάσει σε κλειστούς χώρους, παγιδεύεται εκεί και εμφανίζει μέγιστες συγκεντρώσεις. Ο συνηθέστερος δρόμος εισόδου του σε σπίτια και άλλα κτήρια είναι τα σημεία των κακών κατασκευών (θεμέλια, αποχετεύσεις κλπ.) όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.8**, που επιτρέπουν την επικοινωνία του εδάφους με το εσωτερικό του κτίσματος (Σιμόπουλος, 1989).



Σχήμα 2.8: Μεταφορά Ραδονίου (Πηγή: Folke,χχ)

Πιο αναλυτικά πέντε είναι οι τρόποι με τους οποίους το Ραδόνιο εισέρχεται σε εσωτερικούς χώρους: α) από το έδαφος, το οποίο μάλιστα θεωρείται ως η σημαντικότερη πηγή εισόδου του στο εσωτερικό των κτηρίων. Στην περίπτωση αυτή έχουμε έκλυση μέσω των ρωγμών του πατώματος και των τοίχων. Διάφορα υλικά όπως είναι το συμπαγές τσιμέντο μπορούν πάντως να ανακόψουν την πορεία του προς το εσωτερικό (Rogers et al, 1995). Ένας άλλος τρόπος για να εμποδίσουμε την είσοδό του είναι να χρησιμοποιήσουμε επιστρώσεις με μικρή διαπερατότητα για επικάλυψη ρωγμών σε τοίχους και πατώματα (Yu, 1993). Η είσοδος του Ραδονίου ^{222}Rn , όπως αναφέρθηκε παραπάνω, επηρεάζεται σημαντικά από τη διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του αέρα του εδάφους. Αυτή οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας που υπάρχει μέσα και έξω από το κτήριο, στις μετακινούμενες προς το εσωτερικό αέριες μάζες και στον εξαερισμό του χώρου, ο οποίος μπορεί να είναι φυσικός ή τεχνητός, β) από δομικά υλικά, όπως είναι γρανίτες και πέτρες, καθώς επίσης και διάφορα είδη τσιμέντου. Στη Σουηδία για παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε για δεκαετίες ένα είδος τσιμέντου που στη συνέχεια αποδείχτηκε ιδιαίτερα ραδιενεργό ($1.400\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) και η χρήση του διακόπηκε τη δεκαετία του '70, γ) από τον περιβάλλοντα αέρα, δ) από τους σωλήνες ύδρευσης και αποχέτευσης και ε) από το φυσικό αέριο (Σιμόπουλος, 1989).

Όπως είναι αναμενόμενο οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του Ραδονίου που εισέρχεται από το έδαφος καταγράφονται σε υπόγεια κατοικιών και δημοσίων κτηρίων, ενώ τα διαμερίσματα των υπερκείμενων ορόφων επιβαρύνονται κυρίως από τον ατμοσφαιρικό αέρα και τα οικοδομικά υλικά. Σύμφωνα με τον UNSCEAR (1993) σε μια τυπική ισόγεια κατοικία που συγκεντρώνει γύρω στα $50\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ Ραδόνιο, η συνεισφορά του εδάφους είναι περίπου το 60%, ενώ τα οικοδομικά υλικά και ο εξωτερικός ατμοσφαιρικός αέρας μοιράζονται εξ' ίσου το υπόλοιπο 40%. Αντίθετα, στα διαμερίσματα υπερκείμενων ορόφων όπου η συγκέντρωση Ραδονίου είναι περίπου $20\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, η συνεισφορά του εδάφους είναι μηδενική και το υπόλοιπο ποσοστό μοιράζονται εξ' ίσου ο εξωτερικός ατμοσφαιρικός αέρας και τα οικοδομικά υλικά (**Πίνακας 2.4**). Σημειώνεται ότι τα ποσοστά αυτά ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά από κατοικία σε κατοικία.

	Ισόγειο	Διαμερίσματα ορόφων
Πηγή Ραδονίου	συγκέντρωση Ραδονίου: 50 Bq·m ⁻³	συγκέντρωση Ραδονίου 20 Bq·m ⁻³
Έδαφος	~ 60% ήτοι: 30 Bq·m ⁻³	0%
Οικοδομικά υλικά	~20% ήτοι: 10 Bq·m ⁻³	~50% ήτοι: 10 Bq·m ⁻³
ατμοσφαιρικός αέρας	~20% ήτοι: 10 Bq·m ⁻³	~50% ήτοι: 10 Bq·m ⁻³

Πίνακας 2.4: Συγκέντρωση Ραδονίου στο εσωτερικό κατοικιών (Πηγή: UNSCEAR, 1993)

Καθώς το Ραδόνιο δεν αλληλεπιδρά με άλλα χημικά στοιχεία η συγκέντρωσή του σε εσωτερικούς χώρους καθορίζεται μόνο από τη διαδικασία εισόδου και από τη διαδικασία απομάκρυνσής του. Και στις δυο περιπτώσεις σημαντικό ρόλο παίζουν οι καιρικές συνθήκες, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτηρίου, ο εξαερισμός του κλπ. Οι Font & Baixeras (2003) χρησιμοποιούν το μοντέλο RAGENA (Radon Generation, Entry and Accumulation) για να περιγράψουν την είσοδο του Ραδονίου ²²²Rn στο εσωτερικό των κτηρίων. Βάσει του συγκεκριμένου μοντέλου δύο είναι οι φυσικές διεργασίες εισόδου: α) Είσοδος λόγω διάχυσης, όταν η κίνηση του αερίου οφείλεται στις διαφορές συγκέντρωσής του μέσα στον αέρα. Ο μηχανισμός αυτός εφαρμόζεται σε περίπτωση διακίνησής του μέσα στους πόρους του εδάφους, και β) Είσοδος λόγω άλλων μηχανισμών κίνησης που οφείλονται σε διαφορά πίεσης.

Αν θεωρηθεί: α) ότι η κατανομή Ραδονίου παραμένει σταθερή σε όλους τους χώρους μιας κατοικίας, και β) ότι ο ρυθμός εξαερισμού και εισροής του αερίου είναι σταθερός, η συγκέντρωσή του περιγράφεται με την παρακάτω διαφορική εξίσωση (Porstendorfer et al., 1978; UNSCEAR, 1986; Στούλος, 1998:10):

$$\frac{dC_{in}}{dt} = j(SIV) + \frac{A+R_{rest}}{V} + KC_{out} - (\lambda+k)C_{in}$$

της οποίας η λύση δίνει τη συγκέντρωση Ραδονίου μέσα στην κατοικία C_{in} σε Bq·m⁻³

$$C_{in} = \left(\frac{k}{\lambda + k} \right) \cdot \left(\frac{jS + A + R_{rest}}{kV} \right) \cdot \{1 - \exp [-(\lambda + k)t]\}$$

όπου J (Bq·m⁻²sec⁻¹) είναι ο ρυθμός εκπομπής Ραδονίου από τους τοίχους της κατοικίας, A και R_{rest} (Bq·m⁻³sec⁻¹) ο ρυθμός εισροής Ραδονίου στην κατοικία από το

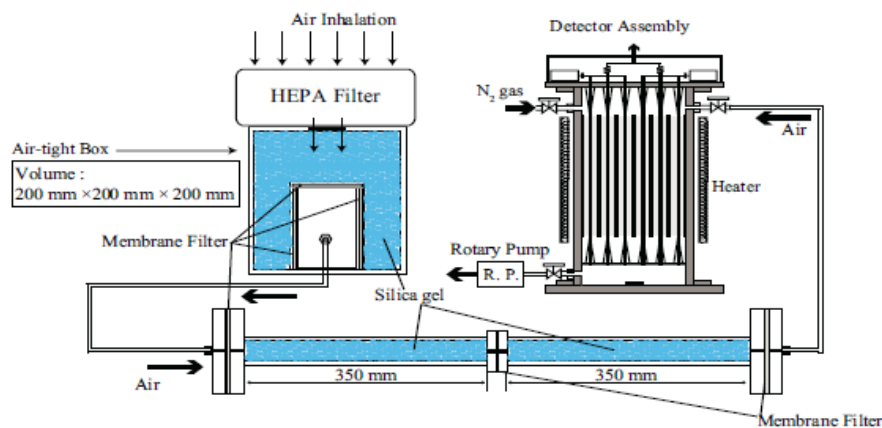
έδαφος και τις άλλες δευτερεύουσες πηγές, S και V η επιφάνεια των τοίχων και ο όγκος της κατοικίας αντίστοιχα, λ η σταθερά διάσπασης του ραδιοϊσοτόπου και k ο ρυθμός εξαερισμού (ventilation rate) της κατοικίας, που εκφράζει τον αριθμό των πλήρων αλλαγών αέρα της κατοικίας στη μονάδα του χρόνου.

Τέλος, σημειώνεται ότι αφού εισέλθει το Ραδόνιο σε κάποιο εσωτερικό χώρο διασπάται στα βραχύβια θυγατρικά του ισότοπα τα οποία μπορούν να σχηματίσουν χημικές ενώσεις σε αντίθεση με το ίδιο το Ραδόνιο. Αυτά συμπεριφέρονται εντελώς διαφορετικά από το Ραδόνιο τόσο στη συσσώρευση όσο και στην απομάκρυνσή τους (Nazaroff & Nero, 1988; Νικολόπουλος, 2000).

2.7 Τεχνικές Ανίχνευσης Ραδονίου

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι προσδιορισμού του ^{222}Rn και των θυγατρικών του η συντριπτική πλειοψηφία των οποίων στηρίζεται στην ανίχνευση α -σωματιδίων που εκπέμπονται από τα ραδιοϊσότοπα κατά τη ραδιενεργό διάσπασή τους. Δύο είναι συνήθως τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται προκειμένου να ταξινομηθούν αυτές: ο απαιτούμενος χρόνος μέτρησης και η ανάγκη ή μη ηλεκτρικής ενέργειας του ανιχνευτικού συστήματος. Όσον αφορά τον απαιτούμενο χρόνο μέτρησης υπάρχουν οι παρακάτω μέθοδοι:

α) Μέθοδοι **αρπαγής** (grab sampling): Στις συγκεκριμένες μεθόδους απαιτείται συνήθως ηλεκτρική ενέργεια και στο σύστημα συλλογής αλλά και στο σύστημα καταγραφής των δεδομένων. Αυτές χρησιμοποιούνται για γρήγορες εκτιμήσεις και για περιπτώσεις που το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη χρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων Ραδονίου σε ένα ορισμένο χώρο (Prichard et al, 2003). Κατά την εφαρμογή τους συλλέγεται δείγμα αέρα ($250\text{-}1.000\text{ cm}^3$) για μικρό χρονικό διάστημα, το οποίο κυμαίνεται από μερικά λεπτά μέχρι μερικές ώρες. Με κατάλληλα ανιχνευτικά συστήματα ακτινοβολίας άλφα ή γάμμα (**Σχήμα 2.9**) γίνεται η καταμέτρηση της ραδιενέργειας και προσδιορίζονται οι συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων. Το αποτέλεσμα που δίνουν είναι μια τιμή που αντιστοιχεί στη μέση συγκέντρωση Ραδονίου στον αέρα κατά τη διάρκεια της καταγραφής, αλλά επειδή αυτή πραγματοποιείται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, πρακτικά δίνει την τιμή της συγκέντρωσης του αερίου στη χρονική στιγμή που αρχίζει η μέτρηση (Πατήρης, 2009).



Σχήμα 2.9 : Μέθοδος αρπαγής (Πηγή: Kada et al., 2011)

β) Μέθοδοι **συνεχούς καταγραφής** (continuous measurements): Κατά τη χρήση των μεθόδων συνεχούς καταγραφής ανιχνεύεται και καταγράφεται η συγκέντρωση ραδιενέργειας σε ένα χώρο ανά τακτά χρονικά διαστήματα με αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι ένα σύνολο τιμών οι οποίες δείχνουν τις μεταβολές συγκέντρωσης του αερίου στη μονάδα του χρόνου. Στις μεθόδους αυτές χρησιμοποιούνται ανιχνευτές ικανοί να καταγράφουν γρήγορα τις συγκεντρώσεις ραδιενέργειας (συνήθως αερίου) επειδή αν και η συνολική διάρκεια καταγραφής αφορά μεγάλα χρονικά διαστήματα, ωστόσο κάθε μια από τις επιμέρους μετρήσεις πραγματοποιείται μέσα σε λίγα λεπτά. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου το αντικείμενο της μελέτης είναι η χρονική διακύμανση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας και όταν πραγματοποιούνται συσχετίσεις με μεγέθη που μεταβάλλονται συνεχώς (υγρασία, θερμοκρασία, ρυθμός έκλυσης Ραδονίου κλπ) (Νικολόπουλος, 2000; Πατήρης, 2009). Για παράδειγμα το 1998, στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος χρηματοδοτούμενου από την Ιαπωνική Κυβέρνηση, τοποθετήθηκε συσκευή συνεχούς μέτρησης του Ραδονίου σε μια από τις γεωτρήσεις από τις οποίες υδρεύεται η Αταλάντη, με σκοπό να μελετηθούν οι μεταβολές της περιεκτικότητας του Ραδονίου στην αέρια φάση υπογείων νερών πριν από σεισμούς. Από τις μετρήσεις προέκυψε ότι υπήρχαν χαρακτηριστικές μεταβολές στις τιμές του αερίου πριν από όλες τις σεισμικές δονήσεις που έγιναν στην περιοχή του ρήγματος της Αταλάντης (Μητρόπουλος & συν., 2001). Σημαντικές μελέτες της μεταβολής της περιεκτικότητας του Ραδονίου στα υπόγεια νερά με στόχο την πρόγνωση σεισμών γίνονται στην Ιαπωνία από το 1973. Το 1977 ανέπτυξαν μάλιστα μέθοδο αυτόματης, συνεχούς μέτρησης των μεταβολών της περιεκτικότητας του

Ραδονίου η οποία μέχρι σήμερα βελτιώνεται συνεχώς δίνοντας σημαντικά αποτελέσματα. Οι επιστήμονες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η παραπάνω μέθοδος μπορεί να αποτελέσει ένα εξαιρετικό εργαλείο για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη σεισμικών δονήσεων σε τοπικό επίπεδο (Μητρόπουλος & συν., 2004). Συμπερασματικά, τα βασικά πλεονεκτήματα των μεθόδων συνεχούς καταγραφής είναι η άμεση προειδοποίηση, η συνεχής καταγραφή, η εποπτεία των επιπέδων Ραδονίου στο χώρο μελέτης και η χαρτογράφηση, ενώ απαιτούνται συστήματα που τροφοδοτούνται είτε από εξωτερική είτε από εσωτερική πηγή ενέργειας.

γ) Μέθοδοι **χρονικά ολοκληρωμένων** μετρήσεων (time-integrated measurements): Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιούνται μετρήσεις συγκέντρωσης Ραδονίου για μεγάλα χρονικά διαστήματα (από μερικές μέρες μέχρι αρκετούς μήνες) με τη χρήση ενεργητικών και παθητικών ανιχνευτών. Το αποτέλεσμα των μετρήσεων είναι η μέση τιμή όλων των πραγματικών συγκεντρώσεων Ραδονίου εντός του χρονικού διαστήματος της μέτρησης (Νικολόπουλος, 2000). Σημειώνεται ότι δείγματα χρονικά ολοκληρωμένων μετρήσεων πάνω από μία έως αρκετές εβδομάδες, προσφέρουν πιο αξιόπιστες μετρήσεις.

δ) Τεχνικές **εκτίμησης συγκεντρώσεων ραδονίου σε παλαιότερες περιόδους** (retrospective techniques), από την μέτρηση των μεγάλης ημιζωής θυγατρικών, που έχουν επικαθίσει σε επιφάνειες (Nazaroff and Nero, 1988).

Όσον αφορά την ανάγκη ή μη ηλεκτρικής ενέργειας του ανιχνευτικού συστήματος υπάρχουν οι παρακάτω μέθοδοι: α) οι **ενεργητικές** (active techniques), οι οποίες απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια και τη χρήση αντλιών αέρα. Οι μέθοδοι αυτές προϋποθέτουν την παρουσία προσωπικού και είναι αρκετά δαπανηρές, και β) οι **παθητικές** (passive techniques), οι οποίες δεν απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια μετά την τοποθέτηση των ανιχνευτών στο σημείο μέτρησης, είναι απλές και εύκολες στη χρήση τους και έχουν χαμηλό κόστος, όπως θα αναλυθεί διεξοδικότερα στη συνέχεια της εργασίας. Είναι δε οι πλέον κατάλληλες για ερευνητική εργασία και για μακροχρόνιες μετρήσεις. Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης Ραδονίου με παθητικούς ανιχνευτές ($Bq \cdot m^{-3}$) εκφράζει τη μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση Ραδονίου, η οποία είναι και η πλέον αντιπροσωπευτική για τον εσωτερικό αέρα μιας κατοικίας (ΕΕΑΕ, 2009).

Οι συσκευές μέτρησης του Ραδονίου και των θυγατρικών του σύμφωνα με το πρωτόκολλο του ERA (1992) είναι οι παρακάτω:

α) Συσκευές Παρακολούθησης Ραδονίου (Continuous Radon Monitoring, CR),

β) Ανιχνευτές Ιχνών Άλφα (Alpha Track Detectors , AT or ATD),

γ) Ανιχνευτές Ραδονίου με Θάλαμο Ιόντων Electret, (Electret Ion Chamber Radon Detectors , EC or ES, EL),

δ) Ανιχνευτές Προσρόφησης Ενεργού Άνθρακα, (Activated Charcoal Adsorption Devices, AC),

ε) Συσκευές Υγρού Σπινθηρισμού Άνθρακα, (Charcoal Liquid Scintillation Devices, LS),

στ) Διάφοροι Τύποι Συλλογής και Ανάλυσης Δείγματος, (Grab Radon Sampling, GB,GC,GS, Pumb/Collapsible Bag devices, PB and Three-Day Integrating Evacuated Scintillation Cells, SC)

ζ) Ανιχνευτές Ιχνών χωρίς Φίλτρο (Unfiltered Track Detectors-UT).

Όλες οι τεχνικές για τη μέτρηση του Ραδονίου στηρίζονται στην ανίχνευση και την καταγραφή της ραδιενεργού ακτινοβολίας, η οποία εκπέμπεται κατά τη διάσπαση της αλυσίδας του Ραδονίου που περιέχεται σε ένα συγκεκριμένο όγκο αέρα. Κυρίως γίνεται ανίχνευση και καταγραφή α- σωματιδίων και γ- φωτονίων. Με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών στη συνέχεια γίνεται βαθμονόμηση έτσι ώστε το σύνολο των α- και γ- εκπομπών που καταγράφονται να μετατρέπονται σε συγκεντρώσεις Ραδονίου (Νικολόπουλος, 2000). Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου ονομάζονται ανιχνευτές ή μετρητές Ραδονίου και θα αναλυθούν διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο. Σημειώνεται ότι τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί νέες βελτιωμένες τεχνολογικά μέθοδοι για την ανίχνευση του Ραδονίου και των θυγατρικών του, οι οποίες όμως πάντα βασίζονται στην ανίχνευση και την καταγραφή των αποτυπωμάτων που αφήνει η ακτινοβολία άλφα ή γάμμα στο τελικό τμήμα της συσκευής ανίχνευσης (Βογιάννη, 2005).

Κεφάλαιο 3: Παθητικές Τεχνικές Μέτρησης Ραδονίου

3.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό μελετούνται οι παθητικές τεχνικές μέτρησης Ραδονίου και γίνεται σύντομη περιγραφή των ανιχνευτών electret και ενεργού άνθρακα. Στη συνέχεια δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στους ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών με τους οποίους θα ασχοληθούμε στα πλαίσια της δικής μας εργασίας. Επίσης γίνεται λεπτομερής περιγραφή του παθητικού ανιχνευτή πυρηνικών ιχνών CR-39, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα πειραματική διαδικασία.

Σύμφωνα με τους Gervino et al. (2004) τρεις είναι κυρίως οι τύποι ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται στις παθητικές τεχνικές: i) οι ανιχνευτές electret (E-PERMs), ii) οι ανιχνευτές ενεργού άνθρακα (charcoal canisters) και iii) οι ανιχνευτές καταγραφής ιχνών α- ακτινοβολίας (alpha-track detectors).

i) Ανιχνευτές electret: Το electret είναι ένα κομμάτι διηλεκτρικού υλικού το οποίο, αν δεν υποστεί κάποια μεταβολή, παρουσιάζει σχετικά μόνιμο φορτίο δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ένα ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο. Το εν λόγω υλικό τοποθετείται μέσα σε ένα κατάλληλα κατασκευασμένο δοχείο που ανοιγοκλείνει με τη βοήθεια ενός περιστροφικού πώματος. Έτσι όταν το πώμα είναι ανοικτό το Ραδόνιο εισέρχεται στον ανιχνευτή, ενώ όταν κλείνει παύει πλέον να εισέρχεται (**Σχήμα 3.1**). Το Ραδόνιο διασπώμενο, ιονίζει τον αέρα μέσα στο δοχείο και παράγει ιόντα τα οποία κτυπούν την επιφάνεια του διηλεκτρικού υλικού μεταβάλλοντας το φορτίο του. Η μεταβολή του δυναμικού στο χρόνο μέτρησης, μέσω κατάλληλων υπολογισμών, δίνει τη συγκέντρωση του Ραδονίου.



Σχήμα 3.1: Ανιχνευτής electret (E-PERM) (Πηγή: <http://www.actionradon.com/>)

Η παραπάνω μέθοδος δεν ήταν πρακτική μέχρι πρότινος, οπότε κατασκευάστηκαν electrets αξιόπιστοι ακόμη και κάτω από συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: α) το χαμηλό της κόστος, β) το γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις σχετικά μεγάλου χρονικού διαστήματος, και γ) το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται από την υγρασία του κοντινού περιβάλλοντος. Από την άλλη πλευρά όμως δεν ανταποκρίνεται επαρκώς στις πολύ χαμηλές και στις ιδιαίτερα υψηλές δόσεις ακτινοβολίας και παρουσιάζει αυξημένη πιθανότητα σφάλματος λόγω της ευαισθησίας του διηλεκτρικού υλικού στη γ -ακτινοβολία του κανονικού υποβάθρου (Monnin & Seidel, 1997; Νικολόπουλος και συν., 1997).

ii) Ανιχνευτές ενεργού άνθρακα: Η λειτουργία των συγκεκριμένων ανιχνευτών βασίζεται στην ιδιότητα του ενεργού άνθρακα να προσροφά αέρια και ατμούς της ατμόσφαιρας, συμπεριλαμβανομένου του Ραδονίου. Για το λόγο αυτό, κατάλληλη ποσότητα ενεργού άνθρακα (καθαρός άνθρακας σε μορφή κόκκων) κλείνεται σε ένα μεταλλικό επίπεδο δοχείο, το οποίο έχει όγκο περίπου 400 cm^3 (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Δοχείο ενεργού άνθρακα (charcoal canister)
(Πηγή: <http://www.rdsjk.com/SCM.html>)

Σημειώνεται ότι καθένας από τους κόκκους παρουσιάζει πολύ μεγάλο μικροπορώδες, με αποτέλεσμα ο λόγος της επιφάνειάς του προς τον όγκο του να είναι δυσανάλογα μεγάλος. Έτσι κατά τη διάρκεια της έκθεσης το Ραδόνιο προσροφάται στην επιφάνεια του ενεργού άνθρακα ενώ μετά το τέλος αυτής το δοχείο απομακρύνεται από το χώρο και σφραγίζεται προσεκτικά για να μην αποβληθεί το προσροφηθέν αέριο. Κατόπιν γίνεται καταμέτρηση των φωτονίων που εκπέμπονται από τις διασπάσεις του Ραδονίου, με ανιχνευτές NaI ή Ge και καταγράφονται οι συγκεντρώσεις του σε $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ή $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$. Ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων είναι

ευθέως ανάλογος με τη μέση τιμή της συγκέντρωσης του Ραδονίου στο χώρο που είχαν τοποθετηθεί τα δοχεία.

Η παραπάνω μέθοδος είναι χαμηλού κόστους και ικανοποιητικής ακρίβειας. Χρησιμοποιείται ωστόσο μόνο για μετρήσεις μικρής διάρκειας (από 24 ώρες έως και 7 ημέρες), καθώς η μέτρηση βασίζεται στο Ραδόνιο και τα βραχύβια θυγατρικά του, τα οποία διασπώνται σε μεγάλης διάρκειας μετρήσεις. Επιπλέον, σε μεγάλης διάρκειας μετρήσεις ο ενεργός άνθρακας απορροφά υγρασία, η οποία στη συνέχεια τον εμποδίζει να προσροφήσει Ραδόνιο. Οι ανιχνευτές ενεργού άνθρακα θα πρέπει να στέλνονται το συντομότερο δυνατόν στο εργαστήριο για να είναι μετρήσιμος ο ρυθμός εκπομπής της ακτινοβολίας από τις διασπάσεις του Ραδονίου. Επίσης, όταν ολοκληρώνεται η διαδικασία της καταγραφής, οι ανιχνευτές θερμαίνονται ώστε να απομακρύνεται η υγρασία και να είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίησή τους (Νικολόπουλος και συν., 1997; Gervino et al., 2004; Brogna et al., 2007). Σημειώνεται ότι στο ΕΠΤ-ΕΜΠ έχουν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν διπλωματικές εργασίες βαθμονόμησης δοχείων με ενεργό άνθρακα (Μαρινάκης, 2007; Πασχαλίδης, 2008).

iii) Ανιχνευτές Πυρηνικών Ιχνών (Solid State Nuclear track Detectors), στους οποίους υπάγονται και οι ανιχνευτές καταγραφής ιχνών α- ακτινοβολίας (alpha-track detectors). Αυτοί είναι μονωτικά στερεά τα οποία είτε συναντώνται στη φύση, είτε κατασκευάζονται από τον άνθρωπο. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανιχνευτών πυρηνικών ιχνών, όπως είναι για παράδειγμα τα ανόργανα κρύσταλλα, τα γυαλιά και τα πλαστικά (πολυμερή υλικά). Τα υλικά αυτά έχουν την εξής ιδιότητα: όταν ένα πυρηνικό σωματίδιο προσκρούει ή διεισδύει μέσα τους, τούς προκαλεί μόνιμες ζώνες ζημίας σε ατομική κλίμακα, οι οποίες δεν είναι καταρχήν ορατές. Με την παραπάνω διαδικασία δημιουργούνται ίχνη τα οποία καλούνται λανθάνοντα (latent tracks). Μέσω μιας κατάλληλης χημικής ή ηλεκτροχημικής χάραξης, που θα αναλυθεί στη συνέχεια, και με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου, γίνεται δυνατή η αναγνώριση των συγκεκριμένων ιχνών (Kalsi et al., 2005; Monnin & Seidel, 1997).

3.2 Ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών-SSNTDs

Πιο αναλυτικά, οι ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα σε πολλούς τομείς, από την αρχαιολογία και τη γεωφυσική μέχρι την πυρηνική φυσική και την εξερεύνηση του διαστήματος. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα στις εφαρμογές της πυρηνικής φυσικής είναι: α) το μικρό τους μέγεθος, β) η ανθεκτικότητά τους σε υψηλές θερμοκρασίες, γ) η ικανότητά τους να διακρίνουν την καταγραφόμενη ακτινοβολία παρουσία υψηλού υποβάθρου λιγότερο ιονίζουσας ακτινοβολίας (π.χ. καταγραφή προϊόντων σχάσης παρουσία υψηλού υποβάθρου α- ή γ- ακτινοβολίας), δ) η ευκολία στη χρήση και το χαμηλό τους κόστος, ε) η άριστη προσαρμογή τους για μετρήσεις μεγάλης διάρκειας και στ) το ότι διατηρούν τις πληροφορίες (ίχνη) που έχουν καταγραφεί για πολλά χρόνια ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία και αρχαιοθέτηση των δεδομένων μελλοντικά.

Στο παραπάνω πλαίσιο οι SSNTDs χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση του Ραδονίου και των ισοτόπων του. Τα σωματίδια-α που εκπέμπονται κατά την αποδιέγερση του Ραδονίου και των θυγατρικών του, προσπίπτουν στην επιφάνεια των ανιχνευτών και δημιουργούν μικροσκοπικά ίχνη που έχουν διάμετρο από 50-100 Å. Μετά από κατάλληλη χημική χάραξη, το ίχνο αυτό μετατρέπεται σε ένα στενό κανάλι και γίνεται ορατό με τη χρήση μικροσκοπίου (Kalsi et al., 2005; Pugliesi et al., 2007). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως υπάρχουν διάφοροι τύποι ανιχνευτών πυρηνικών ιχνών και μάλιστα μερικοί από αυτούς είναι πιο ευαίσθητοι στο ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων-α που παράγονται κατά την αποδιέγερση του Ραδονίου. Αυτοί οι ανιχνευτές είναι κυρίως εστέρες κυτταρίνης (νιτρική και οξική) και πολυκαρβονικά πολυμερή. Οι SSNTDs ωστόσο, δεν παρουσιάζουν ευαισθησία στις β- και γ-ακτίνες, δηλαδή οι ακτίνες αυτές δεν αφήνουν μεμονωμένα ίχνη στην επιφάνεια των ανιχνευτών ικανά να γίνουν ορατά μετά από χημική χάραξη. (Khan & Durrani, 1972; Monnin & Seidel, 1997).

Οι πιο διαδεδομένοι τύποι ανιχνευτών πυρηνικών ιχνών είναι οι ανιχνευτές CR-39 (Allyldiglicol Polycarbonate), οι LR-115 (Cellulose Nitrate) και οι ανιχνευτές Makrofol (Bisphenol-A Polycarbonates). Μεγαλύτερη ευαισθησία στην καταγραφή σωματιδίων παρουσιάζουν οι δύο πρώτοι τύποι, ωστόσο ο LR-115 μπορεί να ανιχνεύσει μόνο α-σωματίδια με ενέργεια κάτω από τα 4 MeV (Bonetti et al., 1991; Papastefanou, 2002). Στον **Πίνακα 3.1** αναφέρονται οι ιδιότητες των πιο γνωστών ανιχνευτών πυρηνικών ιχνών.

SSNTD	CN	PC	PET	CR-39
Σύνθεση	C ₆ H ₈ O ₉ N ₂	C ₁₆ H ₁₄ O ₃	C ₁₀ H ₈ O ₄	C ₁₂ H ₁₈ O ₇
Πυκνότητα	1.33-1.60	1.20	1.39	1.30
Πάχος	100-1000 μm	75-250 μm	100-200 μm	500 μm
Ομοιομορφία	Κακή	Καλή	Καλή	Καλή
Όψη Επιφάνειας	Ομαλή, υψηλό υπόβαθρο	Ομαλή, χαμηλό υπόβαθρο	Ομαλή, χαμηλό υπόβαθρο	Ομαλή, μέτριο υπόβαθρο
Χημικό Διάλυμα	NaOH aq.sol.	NaOH aq.sol.	NaOH aq.sol.	NaOH aq.sol.

CN= Cellulose nitrate, PC= Polycarbonate, PET= Polyethylene terphthalate and CR-39= Allyl diglycol carbonate

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες ορισμένων ανιχνευτών πυρηνικών ιχνών

(Πηγή: Kalsi et al., 2005)

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι ανιχνευτές SSNTDs παρουσιάζουν και τα παρακάτω μειονεκτήματα: α) οι μετρήσεις που καταγράφουν αντιστοιχούν στη συνολική ροή των σωματιδίων και όχι σε μία χρονικά εξαρτημένη καταγραφή τους, β) η καταμέτρηση των ιχνών με το ανθρώπινο μάτι είναι κουραστική και χρονοβόρα διαδικασία, ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ημιαυτόματες μέθοδοι καταμέτρησης και γ) τα αποτελέσματά τους δε μπορούν να εξετασθούν σε πραγματικό χρόνο ή on-line χωρίς τη χρήση σύνθετου εξοπλισμού, η οποία όμως θα αντιστρατευόταν το πλεονέκτημα της απλότητάς τους (Monnin & Seidel, 1997; Durrani, 1997).

3.2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας των SSNTDs

Ο πρώτος ο οποίος παρατήρησε ότι εκπεμπόμενα σωματίδια που προσπίπτουν σε κρύσταλλο LiF αφήνουν στην επιφάνειά του μικροσκοπικά ίχνη, ήταν ο Young το 1958 (Herburn & Windle, 1980). Ο Young χρησιμοποίησε δέσμη νετρονίων για να ακτινοβολήσει ένα λεπτό φύλλο Ουρανίου και να δημιουργηθούν με τον τρόπο αυτό σχάσεις των πυρήνων του. Τα θραύσματα της σχάσης προσέκρουσαν στη συνέχεια στην επιφάνεια του κρυστάλλου LiF αφήνοντας κάποια ίχνη. Μέσω μιας ειδικής επεξεργασίας με καυστικό διάλυμα τα ίχνη αυτά έγιναν ορατά με τη βοήθεια ενός μικροσκοπίου. Έναν χρόνο αργότερα οι Silk και Barnes, που βρίσκονταν στα ίδια εργαστήρια με τον Young, παρατήρησαν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο παρόμοιες ζώνες ζημίας στο ορυκτό mica. Το 1962 οι Price και Walker, αγνοώντας τη

δημοσίευση του Young, αναφέρουν ότι τα παραπάνω ίχνη μπορούν να μεγεθυνθούν με χημική χάραξη του mica, ενώ ο Fleischer γενίκευσε τα ανωτέρω ως φαινόμενο των διηλεκτρικών στερεών.

Η βασική αρχή λειτουργίας των SSNTDs είναι η εξής: όταν φορτισμένα σωματίδια προσκρούουν στην επιφάνεια των ανιχνευτών πυρηνικών ιχνών, μεταβάλλουν τοπικά τη δομή τους είτε ιονίζοντας την ύλη από την οποία διέρχονται, είτε εκτινάσσοντας τα άτομα των ανιχνευτών από τις προκαθορισμένες θέσεις τους. Το αποτέλεσμα αυτών των διεργασιών είναι η δημιουργία σχετικά συνεχόμενων περιοχών ζημίας κατά μήκος της τροχιάς των φορτισμένων σωματιδίων (Fleischer et al., 1964). Όταν στη συνέχεια ο ανιχνευτής εκτεθεί σε καυστικό διάλυμα (όπως NaOH ή KOH; HF ή HNO₃), αρχίζουν οι χημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτού και του διαλύματος. Οι αλληλεπιδράσεις όμως, είναι πολύ πιο έντονες στις περιοχές ζημίας, δηλαδή κατά μήκος των λανθανόντων ιχνών. Έτσι, χαράσσεται η επιφάνεια του υλικού με μεγαλύτερο ρυθμό σε αυτά τα σημεία συγκριτικά με την υπόλοιπη επιφάνεια του ανιχνευτή και δημιουργούνται εσοχές, των οποίων το βάθος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι ανάλογα με το μέγεθος του λανθάνοντος ίχνους. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται χημική χάραξη (chemical etching) ή αλλιώς εμφάνιση των ιχνών (track visualization). Ο σχηματισμός των ιχνών ως εκ τούτου πραγματοποιείται: α) μέσω της αλληλεπίδρασης του φορτισμένου σωματιδίου με το υλικό του ανιχνευτή, οπότε και δημιουργείται το λανθάνον ίχνος και β) μέσω της αλληλεπίδρασης του υλικού με το καυστικό διάλυμα οπότε και δημιουργείται το εγχαράξιμο ίχνος (Durrani, 1997; Nikezic & Yu, 2004; Πατήρης, 2008).

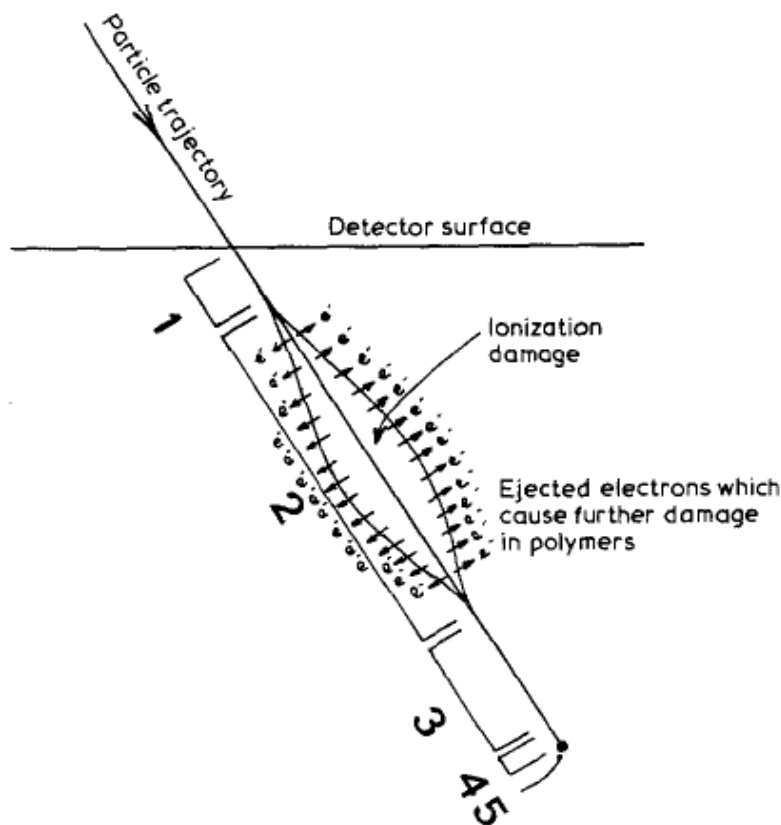
3.2.2 Αλληλεπίδραση φορτισμένων σωματιδίων με τους ανιχνευτές

Σύμφωνα με τους Hepburn & Windle (1980) η αλληλεπίδραση ενός φορτισμένου σωματιδίου με τον ανιχνευτή και η πρόκληση περιοχών ζημίας ως αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης, μπορεί να χωριστεί σε πέντε διαδοχικές φάσεις (**Σχήμα 3.3**):

1. Στην πρώτη φάση το σωματίδιο χάνει μερικά ή όλα του τα ηλεκτρόνια καθώς διεισδύει στον ανιχνευτή.
2. Τη στιγμή της διείσδυσης το σωματίδιο κινείται με τόσο μεγάλη ταχύτητα, ώστε το ίχνος που προκαλεί στον ανιχνευτή δε μπορεί να εμφανιστεί με τη χημική χάραξη.

3. Το σωματίδιο προκαλεί την κύρια ζημία (σχηματισμός λανθάνοντος ίχνους) στον ανιχνευτή.
4. Το σωματίδιο συνεχίζει να διεισδύει στον ανιχνευτή χωρίς να προκαλεί σημαντική ζημία.
5. Το σωματίδιο επιβραδύνεται έχοντας πιθανόν δημιουργήσει μία δεύτερη σύντομη περιοχή ζημίας μέχρις ότου σταματήσει.

Οι παραπάνω φάσεις δεν εμφανίζονται υποχρεωτικά σε κάθε αλληλεπίδραση φορτισμένου σωματιδίου και ανιχνευτή. Η 2^η φάση για παράδειγμα θα εμφανιστεί μόνο εάν το σωματίδιο έχει κατά την είσοδο του στον ανιχνευτή πολύ μεγάλη ενέργεια. Συχνά, ιδιαίτερα στην περίπτωση των πολυμερών, η 4^η φάση δεν παρατηρείται και η περιοχή της κύριας καταστροφής συγχωνεύεται με την 5^η.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα με τα πέντε στάδια διείσδυσης σωματιδίου σε ανιχνευτή.

(Πηγή: Hepburn & Windle, 1980).

Πιο αναλυτικά, στην 1^η φάση το φορτισμένο σωματίδιο χάνει μερικά ή όλα τα ηλεκτρόνια του καθώς διεισδύει στον ανιχνευτή και αλληλεπιδρά με τα άτομα και ιδιαίτερα με τα ηλεκτρόνια του υλικού του ανιχνευτή. Στη συνέχεια (2^η φάση) όταν το σωματίδιο βρίσκεται πλέον στο εσωτερικό του ανιχνευτή, κινείται με τόσο μεγάλη

ταχύτητα, ώστε δεν είναι δυνατόν να αφήσει ίχνος που να μπορεί να εμφανιστεί με τη χημική χάραξη. Αυτό συμβαίνει διότι η ζημία που προκαλείται δεν είναι συνεχόμενη και έτσι δε δημιουργείται ανιχνεύσιμο ίχνος. Υπάρχουν ωστόσο ανιχνευτές στους οποίους απουσιάζει η 2^η φάση. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα των ανιχνευτών που είναι κατασκευασμένοι από πολυκαρβονικά. Στην περίπτωση που π.χ. σωματίδια ⁵⁶Fe προσπέσουν πάνω στην επιφάνεια των πολυκαρβονικών, αφήνουν ίχνος που ξεκινά κατευθείαν από την επιφάνεια πρόσκρουσης. Αντίθετα στους ανιχνευτές που είναι κατασκευασμένοι από ορυκτό mica (ανθεκτικό υλικό), το σωματίδιο κινείται αρχικά με πολύ μεγάλες ταχύτητες προκαλώντας ζημία η οποία δεν είναι αρκετά συνεχόμενη για να αφήσει ένα εγχαράξιμο ίχνος. Σ' αυτούς η 2^η φάση διαρκεί μέχρις ότου μειωθεί η ταχύτητα του σωματιδίου και ξεκινήσει να δημιουργείται το ίχνος.

Η 3^η φάση ξεκινά τη στιγμή που το σωματίδιο κινείται αρκετά αργά προσδίδοντας την επαρκούμενη «πυκνότητα ζημίας» (damage density) στη διαδρομή του και τελειώνει όταν έχει επιβραδυνθεί και έχει επανακτήσει τα ηλεκτρόνια του ώστε δεν είναι ικανό να προκαλέσει άλλη παρόμοια καταστροφή. Η φάση αυτή περιγράφει στην ουσία την περιοχή στην οποία εμφανίζεται η κύρια ζημία, δηλαδή το λανθάνον ίχνος. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα που περιγράφουν τη διαδικασία της συγκεκριμένης καταστροφής τα οποία και θα αναπτύξουμε παρακάτω. Στην 4^η φάση το σωματίδιο έχει επιβραδυνθεί σημαντικά από τις αλληπάλληλες συγκρούσεις με τα άτομα του ανιχνευτή. Υπάρχει ένα κατώτατο όριο στην ταχύτητα του φορτισμένου σωματιδίου κάτω από το οποίο δε μπορεί να προκληθεί ίχνος ικανό να φανεί με τη χημική χάραξη. Η φάση αυτή απουσιάζει εν γένει από τα πλαστικά και τα πολυκαρβονικά. Τέλος, η 5^η φάση περιγράφει τον τερματισμό της τροχιάς του φορτισμένου σωματιδίου. Θεωρείται ότι λειτουργεί ένας διαφορετικός μηχανισμός καταστροφής καθώς το σωματίδιο, έχοντας επανακτήσει τα ηλεκτρόνια του, επιτέλους φτάνει σε κατάσταση ηρεμίας. Ο διαφορετικός αυτός μηχανισμός αναφέρεται στην ανάκρουση των ατόμων του υλικού από τις θέσεις του, λόγω των συγκρούσεων με το σωματίδιο.

3.2.3 Μοντέλα μηχανισμών δημιουργίας λανθάνοντος ίχνους

Τα κυριότερα μοντέλα που περιγράφουν τη διαδικασία της καταστροφής (3^η φάση), δηλαδή το σχηματισμό του λανθάνοντος ίχνους, είναι σύμφωνα με τους Hepburn & Windle (1980) τα παρακάτω:

1. Μοντέλο μετατόπισης των ατόμων (Atomic Displacement Model):

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, τα λανθάνοντα ίχνη δημιουργούνται ως αποτέλεσμα της μετατόπισης των ατόμων από τις αρχικές τους θέσεις μετά από τις συγκρούσεις με το φορτισμένο σωματίδιο. Επακόλουθο αυτής της σύγκρουσης είναι οι αλυσιδωτές μετατοπίσεις και των γειτονικών ατόμων. Το συγκεκριμένο μοντέλο ωστόσο, έχασε την ισχύ του λόγω των εξής ισχυρισμών: Τα λανθάνοντα ίχνη θα έπρεπε να δημιουργούνται και στα μέταλλα και στους ημιαγωγούς, κάτι το οποίο όμως δεν έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά. Επίσης, τα ίχνη θα έπρεπε να σχηματίζονται πιο εύκολα κοντά στο τέλος της τροχιάς του σωματιδίου, όπου ο αριθμός των ελαστικά ανακρουώμενων ατόμων είναι μεγαλύτερος. Στην πραγματικότητα όμως, η ζημία στην περιοχή αυτή δεν είναι εγχαράξιμη (etchable) (Hepburn & Windle 1980; Sher, 2008).

2. Μοντέλο θερμικής έκρηξης (Thermal Spike Model):

Το μοντέλο της θερμικής έκρηξης υποθέτει ότι με το πέρασμα του φορτισμένου σωματιδίου παράγεται έντονη θέρμανση (άνοδος θερμοκρασίας) σε εντοπισμένη περιοχή των κρυσταλλικών πλεγμάτων του υλικού του ανιχνευτή. Στην περιοχή αυτή αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες στη συνέχεια μειώνονται λόγω της θερμικής αγωγιμότητας. Στα μέταλλα και στους καλούς ημιαγωγούς, αυτή η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας γρήγορα διαχέεται στα πλέγματα. Έτσι τα υλικά αυτά δε μπορούν να καταγράψουν τη διαδρομή φορτισμένων σωματιδίων. Αντίθετα στους μονωτές δημιουργείται ένα στενό και έντονο κανάλι, το οποίο προέρχεται από τοπική βλάβη της δομής τους, ικανής να προκαλέσει εγχαράξιμο ίχνος. Υπάρχουν δύο απαραίτητες προϋποθέσεις για το σχηματισμό του ίχνους. Πρώτον, η συνθήκη της υψηλής θερμοκρασίας θα πρέπει να ισχύει για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα και δεύτερον, η κανονική θερμική αγωγιμότητα του υλικού θα πρέπει να είναι χαμηλή. Οι προϋποθέσεις αυτές καταδεικνύουν ότι ο σχηματισμός ιχνών έχει πολύ μεγάλες πιθανότητες να συμβεί στα μονωτικά υλικά και πολύ μικρές στα μέταλλα. Παρότι το

μοντέλο αυτό προβλέπει σωστά μερικά χαρακτηριστικά της δημιουργίας ιχνών στα υλικά, παράμετροι όπως το εύρος του λανθάνοντος ίχνους και η εξάρτησή του από τη δομή του υλικού δε φάνηκε να συμφωνούν με τα πειραματικά δεδομένα (Sher, 2008).

3. Μοντέλο αστάθειας του πλέγματος (Lattice Instability Model):

Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διεισδύει στο υλικό του ανιχνευτή προκαλεί τον ιονισμό της ύλης. Σύμφωνα με το μοντέλο της αστάθειας του πλέγματος, όμοια φορτισμένα ιόντα τα οποία βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις απωθούνται αμοιβαία, με αποτέλεσμα την επακόλουθη δημιουργία ζημίας. Αρχικά, η απόθεση των ιόντων παρατηρήθηκε στο πλαίσιο των μετατοπίσεων των ιοντικών κρυστάλλων. Το μοντέλο αυτό είναι το επικρατέστερο από τα τρία που αναφέρθηκαν, με βασικό κριτήριο την απουσία του σχηματισμού των ιχνών στα μέταλλα. Το κύριο χαρακτηριστικό των μετάλλων είναι η παρουσία υψηλά κινητικών (ελεύθερων) ηλεκτρονίων και στην περίπτωση του μοντέλου της αστάθειας πλέγματος, τα ηλεκτρόνια αυτά μπορούν να παρέχουν σχεδόν στιγμιαία «επισκευή» των ιόντων που δημιουργούνται από το διεισδύσιμο σωματίδιο. Πιο συγκεκριμένα, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ενώνονται με τα ιόντα δημιουργώντας και πάλι άτομα και μόρια. Με τον τρόπο αυτό, τα ιόντα δεν παραμένουν αρκετό χρόνο ώστε να υπάρξει το στάδιο της αμοιβαίας άπωσής τους και εν συνεχεία η δημιουργία ζημίας. Έτσι εξηγείται ο μη σχηματισμός λανθανόντων ιχνών στα μέταλλα και ο σχηματισμός τους στα μονωτικά υλικά (Herburn & Windle 1980).

3.2.4 Μοντέλα μηχανισμών δημιουργίας εγχαράξιμων ιχνών

Υπάρχουν αρκετές παράμετροι οι οποίες καθορίζουν αν το λανθάνον ίχνος που δημιουργείται στην επιφάνεια του ανιχνευτή, θα είναι και εγχαράξιμο μέσω της χημικής χάραξης. Τέτοιες είναι:

- Το φορτίο, η μάζα και η ταχύτητα του προσκρουόμενου σωματιδίου
- Η χημική σύσταση και το μοριακό βάρος του υλικού του ανιχνευτή
- Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες τη στιγμή της ακτινοβολήσης
- Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της ακτινοβολήσης και της χημικής επεξεργασίας
- Η θερμοκρασία και η φύση του καυστικού διαλύματος

Από τις παραπάνω παραμέτρους, η εγχαράξιμότητα των ιχνών που αφήνουν τα σωματίδια σε ένα υλικό εξαρτάται κυρίως από το φορτίο, τη μάζα και την ταχύτητα του εισερχόμενου σωματιδίου (Sher, 2008). Οι κυριότεροι μηχανισμοί που περιγράφουν το σχηματισμού του εγχαράξιμου ίχνους είναι σύμφωνα με τον Enge (1995) οι παρακάτω:

1. Ολική απώλεια ενέργειας (The total energy loss):

Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο αλληλεπιδρά με ένα μέσο ως αποτέλεσμα της δύναμης Coulomb, η ενέργειά του κατανέμεται κυρίως στα ηλεκτρόνια των μορίων του μέσου και σε πολύ μικρότερο βαθμό στους πυρήνες του. Η φυσική ποσότητα που περιγράφει την επιβράδυνση των φορτισμένων σωματιδίων στην ύλη ως αποτέλεσμα αυτής της κατανομής ενέργειας είναι η γραμμική μεταφορά ενέργειας LET (linear energy transfer), η οποία ισούται με (dE/dx) . Εκφράζει δηλαδή την ποσότητα ενέργειας (dE) που μεταφέρεται από το σωματίδιο στο υλικό, ανά διάστημα κίνησης (dx). Για κάθε υλικό που ανιχνεύει ίχνη, υπάρχει μία ορισμένη κρίσιμη τιμή του ρυθμού απώλειας της ενέργειας (dE/dx_{Critical}), τέτοια ώστε όσα σωματίδια έχουν αισθητά μικρότερη τιμή από αυτή, δε θα μπορέσουν να αφήσουν εγχαράξιμα ίχνη. Αντίστοιχα, σωματίδια με τιμές μεγαλύτερες από την κρίσιμη θα έχουν 100% απόδοση εγγραφής. Το μοντέλο αυτό απέτυχε όταν εφαρμόστηκε σε σχετικιστικά σωματίδια και η πρόβλεψη ότι ένα σχετικιστικό ιόν θα άφηνε ένα εγχαράξιμο ίχνος στο cellulose nitrate δεν επιβεβαιώθηκε (Fleischer et al., 1975; Nikezic & Yu, 2004; Sher, 2008).

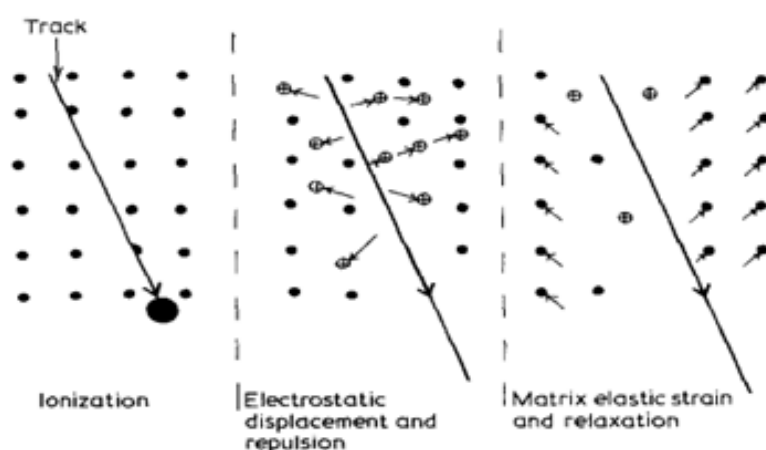
2. Τροποποιημένη απώλεια ενέργειας (Modified energy loss):

Σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο, για να σχηματισθεί ένα εγχαράξιμο ίχνος, δε λαμβάνεται υπόψη η ολική απώλεια ενέργειας, όπως είδαμε προηγουμένως, αλλά μία περιορισμένη ποσότητα της απώλειας αυτής. Θα πρέπει ωστόσο η ποσότητα της περιορισμένης απώλειας ενέργειας να υπερβαίνει μία κρίσιμη τιμή, χαρακτηριστική του κάθε υλικού ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία του εγχαράξιμου ίχνους. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιβολή ενός ανώτατου ορίου στην ενέργεια των δ-ακτίνων. Ακτίνες δ ονομάζουμε την ακτινοβολία που προέρχεται από ορισμένα ηλεκτρόνια τα οποία αποκτούν τόση ενέργεια ώστε διαφεύγουν μακριά, εκτός της περιοχής του ίχνους, σε ακτίνα 30-50 Å. Οι πιο γνωστές θεωρίες της τροποποιημένης απώλειας ενέργειας είναι: α) η θεωρία του πρωτεύοντος ιονισμού PI (Primary Ionisation Rate)

και β) η θεωρία της περιορισμένης απώλειας ενέργειας REL (restricted energy loss). Η θεωρία του PI λαμβάνει υπόψη την επίδραση που έχει ο ιονισμός του πρωτεύοντος ιόντος και αγνοεί τον ιονισμό που προέρχεται από τα χαμηλής ενέργειας δευτερεύοντα ηλεκτρόνια. Τα τελευταία δημιουργούνται από τις μακρινές συγκρούσεις του πρωτεύοντος ιόντος με τα ηλεκτρόνια του ανιχνευτή. Σύμφωνα με τη θεωρία REL μόνο περιορισμένη ποσότητα απώλειας ενέργειας που καταναλώνεται στις παραπάνω μακρινές συγκρούσεις λαμβάνεται υπόψη. Επίσης απορρίπτονται δευτερεύοντα ηλεκτρόνια υψηλών ενεργειών που έχουν δημιουργηθεί από τις κοντινές συγκρούσεις (Enge 1995; Nikezic & Yu, 2004).

3. Μοντέλο της ιοντικής έκρηξης (The ion explosion spike model):

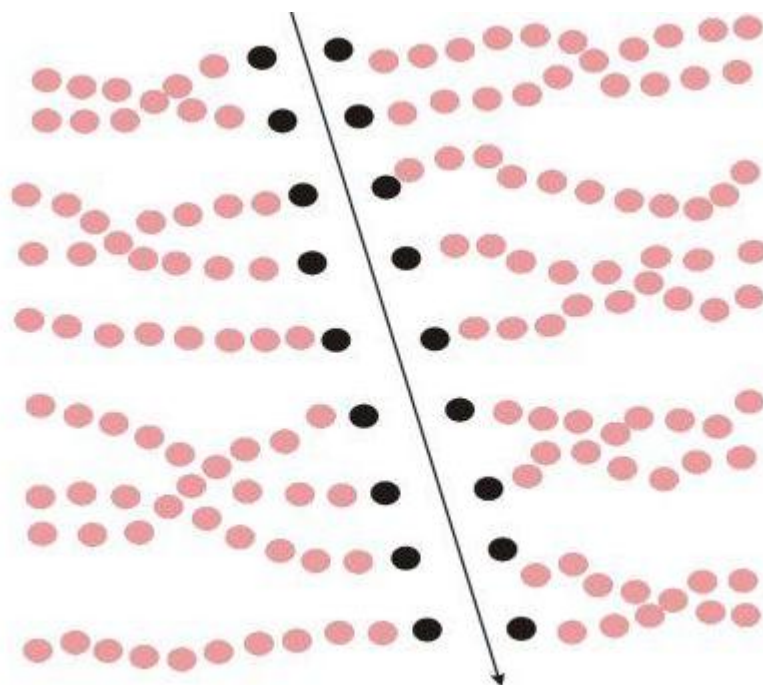
Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, ο μηχανισμός δημιουργίας εγχαράξιμων ιχνών λειτουργεί διαφορετικά στα ανόργανα διηλεκτρικά και διαφορετικά στα οργανικά πολυμερή. Τα φορτισμένα σωματίδια συγκρούονται με τα άτομα ενός ανόργανου διηλεκτρικού μεταδίδοντας ενέργεια σε αυτά, η οποία απορροφάται κυρίως από τα ηλεκτρόνια των ατόμων. Τα ηλεκτρόνια στη συνέχεια διεγείρονται και ορισμένα από αυτά απομακρύνονται από τα άτομα διεισδύοντας στο περιβάλλον υλικό ως ακτίνες δ οι οποίες προκαλούν μικρή επιπλέον καταστροφή. Ωστόσο τα άτομα τα οποία έχουν χάσει τα ηλεκτρόνιά τους, ομαδοποιημένα καθώς είναι κατά μήκος της διαδρομής του φορτισμένου σωματιδίου, ανακρούονται λόγω της άπωσης των ομόσημων ηλεκτρικών φορτίων τους (Σχήμα 3.4). Η γραμμική συγκέντρωση της ζημίας λόγω



Σχήμα 3.4: Τα στάδια του ion explosion spike model: για τη δημιουργία ιχνών σε ανόργανα διηλεκτρικά στερεά (Πηγή: Hepburn & Windle, 1980)

της ανάκρουσης των ιόντων (“ion explosion”) είναι που δημιουργεί το εγχαράξιμο ίχνος. Στα ανόργανα διηλεκτρικά η καταστροφή γύρω από το ίχνος δεν είναι συνεχόμενη, αλλά εμφανίζονται εναλλασσόμενα περιοχές με μεγάλη καταστροφή και άλλες με λιγότερη.

Στην περίπτωση τώρα των πολυμερών, υπάρχουν επιπλέον μηχανισμοί καταστροφής εκτός από την ανάκρουση των ιόντων. Τα μόρια των πολυμερών μπορεί να υποβαθμιστούν με ενέργειες χαμηλότερες από αυτές που απαιτούνται για ιονισμό και να δημιουργηθούν τοπικοί μετασχηματισμοί της δομής τους. Ο σχηματισμός ελευθέρων ριζών μπορεί να οδηγήσει, μέσω διάφορων ραδιοχημικών διαδικασιών, στη διάρρηξη των μοριακών αλυσίδων των πολυμερών (**Σχήμα 3.5**), δηλαδή σε δραστική μείωση του μοριακού τους βάρους, αλλά και σε σχηματισμό νέων συστατικών κατά μήκος της τροχιάς των σωματιδίων. Απαιτούνται χαμηλότερες ενέργειες για την αποδόμηση των πολυμερών, που σημαίνει ότι οι ακτίνες δ συμβάλλουν σημαντικά στην καταστροφή από μόνες τους. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ενισχυμένη τιμή εγχαραξιμότητας συγκριτικά απομακρυσμένων από τον πυρήνα του ίχνους περιοχών, στον οποίο υπερισχύει ο μηχανισμός της ανάκρουσης των ιόντων (Herburn & Windle, 1980).



Σχήμα 3.5: Σχηματική απεικόνιση της θραύσης των αλυσίδων του πολυμερούς που πραγματοποιείται κατά την πρόσπτωση στην επιφάνεια των φορτισμένων σωματιδίων (Πηγή: Οικονομόπουλος, 2000)

4. Ο πυρήνας του λανθάνοντος ίχνους (The “core” of a latent track):

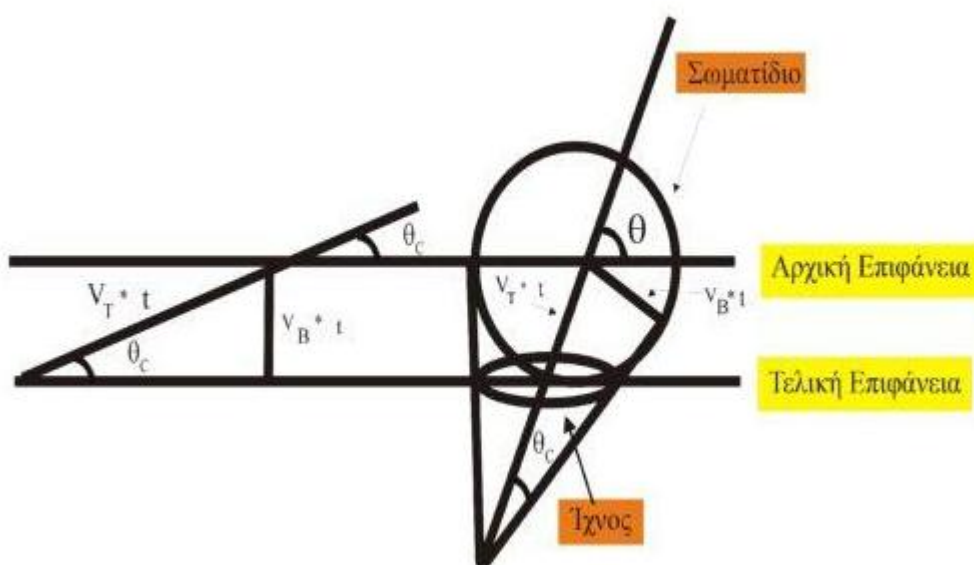
Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, το καυστικό διάλυμα ταξιδεύει με μεγαλύτερη ευκολία στην περιοχή που βρίσκεται το λανθάνον ίχνος απ’ ό τι στην υπόλοιπη περιοχή του ανιχνευτή. Στη συνέχεια το διάλυμα αποκολλά το υλικό που έχει υποστεί βλάβη και το μεταφέρει εκτός της προσβληθείσας περιοχής. Με την παραπάνω διαδικασία γεννάται το εγχαράξιμο ίχνος. Όσον αφορά το λανθάνον ίχνος, αυτό θεωρείται ότι χωρίζεται σε δύο στρώματα: α) το εσωτερικό που ονομάζεται πυρήνας και β) το εξωτερικό στρώμα, το λεγόμενο penumbra. Πιο αναλυτικά, ο πυρήνας του λανθάνοντος ίχνους μπορεί να οριστεί με διάφορους τρόπους: α) ως κεντρική περιοχή του ίχνους στην οποία αποτίθεται σημαντική ποσότητα της απώλειας ενέργειας του ιόντος, β) ως φυσικός πυρήνας, δηλαδή ζώνη της άμεσης διέγερσης των μορίων από το ιόν, η διάμετρος της οποίας είναι ανάλογη με τη στιγμιαία ταχύτητα του ιόντος και γ) ως χημικός πυρήνας, δηλαδή κεντρική ζώνη του ίχνους με δραματικά μειωμένο μοριακό βάρος που παρουσιάζει ενισχυμένο, τοπικό ρυθμό εγχαραξιμότητας και ευπάθεια σε χρωματισμό με διάφορους χημικούς παράγοντες. Σε κάθε περίπτωση, ο πυρήνας που αποτελείται από υψηλές συγκεντρώσεις ιονισμένων και διεγερμένων μορίων, παράγεται πρωτίστως από το ίδιο το ιόν και μερικώς από δευτερεύοντα ηλεκτρόνια τα οποία γεννούνται από αυτό. Στο penumbra από την άλλη που δημιουργείται από δευτερεύοντα ηλεκτρόνια τα οποία διαθέτουν αρκετή ενέργεια ώστε να διαφύγουν από τον πυρήνα του ίχνους, η πυκνότητα των ιονισμών και των διεγέρσεων είναι μία ραγδαίως μειούμενη συνάρτηση της ακτινικής απόστασης από το κέντρο του ίχνους (Enge 1995; Hnatowicz, 2003).

Μέχρι σήμερα δεν έχει κατανοηθεί πλήρως ούτε είναι κοινά αποδεκτή η ακριβής διαδικασία που δημιουργεί τα ίχνη στον ανιχνευτή. Από τα παραπάνω μοντέλα αυτό που κυριαρχεί είναι το μοντέλο της ιοντικής έκρηξης (ion explosion spike model) (Durrani, 1997, 2008; Οικονομόπουλος, 2008).

3.2.5 Χαρακτηριστικά των ίχνων στους πολυμερείς ανιχνευτές μετά από χημική χάραξη

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ίχνους που δημιουργείται στα πολυμερή και η διάμετρος του ανοίγματός του εξαρτώνται βασικά από δύο μεγέθη: α) την ταχύτητα χάραξης του υλικού του ανιχνευτή V_B (bulk etching velocity) που σχετίζεται με το διάλυμα που χρησιμοποιείται για τη χημική χάραξη και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται η επεξεργασία αυτή και β) την ταχύτητα χάραξης της

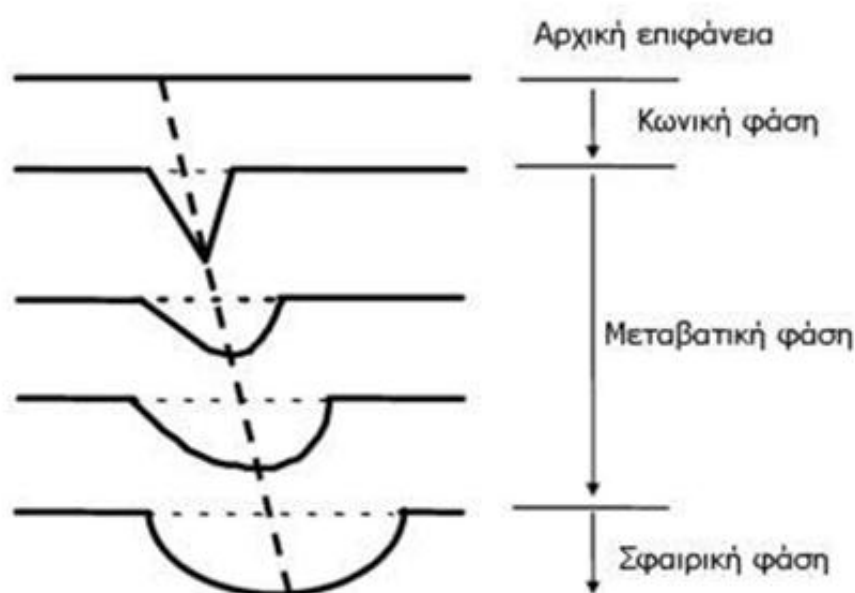
περιοχής του ίχνους V_T (track etching velocity) που σχετίζεται με την αλληλεπίδραση των φορτισμένων σωματιδίων με το υλικό. Ο λόγος $V=V_T/V_B$ αποτελεί μία πολύ χρήσιμη παράμετρο για τον καθορισμό των ιδιοτήτων καταγραφής των φορτισμένων σωματιδίων στα διηλεκτρικά μέσα, κρυσταλλικά και πολυμερή. Εκτός από αυτό όμως, μας πληροφορεί επίσης για την κρίσιμη γωνία χάραξης θ_c (critical angle of etching) και για την αποδοτικότητα της χημικής χάραξης (etching efficiency). Η κρίσιμη γωνία χάραξης εκφράζει τη χαμηλότερη τιμή που μπορεί να πάρει η γωνία πρόσπτωσης του σωματιδίου ως προς την επιφάνεια του ανιχνευτή, ώστε το ίχνος που θα αφήσει να μπορεί να εμφανιστεί με τη διαδικασία της χημικής χάραξης. Τα ίχνη που δημιουργούνται από σωματίδια που προσπίπτουν με μικρότερη γωνία ουσιαστικά «σβήνονται» από τη γενική διάβρωση της επιφάνειας του υλικού, πριν προλάβουν να γίνουν ορατά. Η αποδοτικότητα της χημικής χάραξης αφορά την πιθανότητα εμφάνισης ίχνους όταν ο ανιχνευτής βρίσκεται σε επαφή με πηγή φορτισμένων σωματιδίων μεγάλου πάχους και ισούται με $\cos^2\theta_c$, όπου $\theta_c = \sin^{-1}(V_B/V_T)$. Στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 3.6**) παρουσιάζονται τα μεγέθη που μόλις αναφέρθηκαν.



Σχήμα 3.6: Κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης. Όταν κατεργαζόμαστε έναν ακτινοβολημένο ανιχνευτή με κατάλληλο διάλυμα, η ταχύτητα της χάραξης κατά μήκος της λανθάνουσας διαδρομής (V_T)- latent track- είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα V_B σε άλλη θέση στο μέσο. Στο σχήμα αυτό, η αναλογία V_T/V_B είναι ίση με 3 (Πηγή: Οικονομόπουλος, 2000)

Για τα ισχυρώς φορτισμένα σωματίδια, όπως είναι για παράδειγμα τα θραύσματα της σχάσης, η ταχύτητα V_T μπορεί να είναι πολλές φορές μεγαλύτερη από τη V_B και στην περίπτωση αυτή το ίχνος έχει σχήμα στενόμακρο, σχεδόν κυλινδρικό

με πολύ μικρό άνοιγμα συγκριτικά με το μήκος του. Αυτό συμβαίνει ειδικά στην περίπτωση των κρυσταλλικών μέσων. Για τα σωματίδια-α ωστόσο, ο λόγος $V=V_T/V_B$ δεν είναι πολύ μεγάλος. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του ανιχνευτή CR-39, όπου το V παίρνει τιμές από το 2 έως το 3 (Durrani, 1997; Οικονομόπουλος, 2008). Το σχήμα των ίχνων μεταβάλλεται επίσης σημαντικά κατά τη διάρκεια της χημικής χάραξης. Αν θεωρήσουμε ότι αυτή διαρκεί τόσο ώστε το διαβρωτικό διάλυμα να φτάσει στο τέρμα της τροχιάς του σωματιδίου, το σχήμα κάθε ίχνους διέρχεται από τρεις φάσεις. Οι φάσεις αυτές όπως βλέπουμε παρακάτω (**Σχήμα 3.7**) είναι η κωνική (conical), η μεταβατική (transitional) και η σφαιρική (spherical).



Σχήμα 3.7: Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων που διέρχεται το σχήμα του ίχνους κατά τη διαδικασία της χημικής χάραξης των ανιχνευτών. Μετά τη σφαιρική φάση οπότε και το καυστικό διάλυμα έχει φθάσει στο σημείο τερματισμού της τροχιάς του σωματιδίου, οι λόγοι του V_B και V_T είναι ίσοι. (Πηγή: Πατήρης, 2009)

Στην κωνική και τη μεταβατική φάση, το σχήμα του ίχνους μετατρέπεται σταδιακά σε κωνικό με ολοένα αμβλυνόμενη κορυφή. Καθ' όλη τη διάρκεια των συγκεκριμένων φάσεων ο ρυθμός V_T εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερος του V_B . Η μεταβατική φάση ολοκληρώνεται όταν το καυστικό διάλυμα φτάσει στο σημείο τερματισμού της τροχιάς του φορτισμένου σωματιδίου, οπότε και το σχήμα του ίχνους του μετατρέπεται σε σφαιρικό. Εάν η χημική χάραξη του ανιχνευτή συνεχιστεί, η περιοχή του ίχνους χαράσσεται με τον ίδιο πλέον ρυθμό V_B όπως και η

υπόλοιπη επιφάνεια του ανιχνευτή, ενώ το σχήμα του ίχνους παραμένει σφαιρικό και απλώς αυξάνει σε μέγεθος (Πατήρης, 2009).

3.2.6 Χημική χάραξη των ανιχνευτών

Η χημική χάραξη των ανιχνευτών που αναφέρεται παραπάνω, είναι στην ουσία μία διαδικασία διάβρωσης της επιφάνειάς τους και αποτελεί την πιο κοινά χρησιμοποιούμενη μέθοδο για την εμφάνιση των ίχνων που δημιουργούνται από την ακτινοβολία στους ανιχνευτές πυρηνικών ίχνων. Σύμφωνα με τον S.A Durrani (1997) η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε ένα θερμοστατικό λουτρό το οποίο είναι γεμάτο με νερό σε θερμοκρασία που κυμαίνεται από 40°C έως 70°C (σε εξαιρετικές περιπτώσεις οι θερμοκρασίες αυτές μπορεί να φτάσουν και τους 90°C). Οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για τη χημική διάβρωση των ανιχνευτών είναι τα υδατικά διαλύματα NaOH ή KOH με μοριακή συγκέντρωση από 2 έως 6 M. Η διάρκεια παραμονής των ανιχνευτών στα παραπάνω διαλύματα κυμαίνεται από 2 έως 6 ώρες. Ο χρόνος επεξεργασίας, η θερμοκρασία του θερμοστατικού λουτρού, η μοριακότητα των καυστικών διαλυμάτων είναι παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό της διάβρωσης και μάλιστα όσο αυξάνονται, τόσο αυξάνεται και το μέγεθος της δημιουργούμενης κοιλότητας στο σημείο του λανθάνοντος ίχνους. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προστεθεί αιθυλική αλκοόλη στο καυστικό διάλυμα ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο την ευαισθησία κάποιων πλαστικών ανιχνευτών (polycarbonates), αν και λειτουργεί ακριβώς αντίθετα σε άλλους όπως ο CR-39. Οι ανιχνευτές αρχικά βυθίζονται στο καυστικό διάλυμα το οποίο βρίσκεται μέσα σε ποτήρι ζέσεως και στη συνέχεια τοποθετούνται έτσι ώστε το διάλυμα αυτό να μπορέσει να εξαπλωθεί παντού. Το σύστημα ανιχνευτών-ποτήρι ζέσεως τοποθετείται σε υδατόλουτρο σταθερής θερμοκρασίας και όταν περάσει ο επιθυμητός χρόνος, οι ανιχνευτές αφαιρούνται από το καυστικό διάλυμα. Αφού ξεπλυθούν με τρεχούμενο νερό και στη συνέχεια στεγνώσουν είναι έτοιμοι να μετρηθούν με ένα οπτικό μικροσκόπιο. Η διάμετρος των ίχνων μπορεί να πάρει τιμές από λίγα μm μέχρι 50μm ή ακόμη παραπάνω μετά από παρατεταμένη χημική χάραξη. Στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 3.2**) παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι των SSNTDs και οι συνθήκες της χημικής τους χάραξης.

Κατηγορία	Υλικό Ανιχνευτή	Συνθήκες Χημικής Χάραξης	Ελαφρύτερο Ανιχνεύσιμο Σωματίδιο	Κρίσιμη Γωνία Q_c
Ορυκτά/ Κρύσταλλα	Olivine Zircon Quartz Mica	KOH Soln., 160°C, 6 min; 10% HF, 23°C, 30 sec. 85% H ₃ PO ₄ , 500°C, 1 min. KOH Soln., 210°C, 10 min. 48% HF, 23°C, 3 Sec-40 min.	Fe Ca Ar (100 MeV) Ne (20 MeV)	4° 30' ~ 50°
Γυαλιά	Sodalime glass Phosphate glass	48% HF, 23°C, 3 Sec 48% HF, 23°C, 3 Sec	Ne (20 MeV) F (20 MeV)	~ 2-3°
Πλαστικά	Polycarbonate Plastics (Lexan, Makrafol, Milar) Cellulose Nitrate (Daicell, LR-115 CA-80-15) Allyldiglycol Polycarbonate (CR-39)	6N NaOH, 60°C, 60 min. 3-6 N NaOH, 50°C, 40 min. 6 N NaOH, 70°C, 1-4 hrs	He (0,3 MeV) H (0,5 MeV) H (1,0 MeV)	~ 4-8° ~ 10°

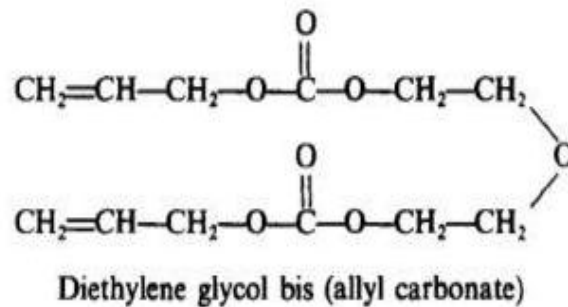
Πίνακας 3.2: Οι διάφοροι τύποι των SSNTDs και οι συνθήκες της χημικής τους χάραξης

(Πηγή: Kalsi et al., 2005)

3.3 Ο ανιχνευτής CR-39

3.3.1 Σύσταση, παρασκευή και ιδιότητες

Ο ανιχνευτής CR-39 (συντόμευση του Columbia Resin) είναι ένα πολυμερές πλαστικό ανθρακικής αλλυλ-διγλυκόλης (allyl diglycol carbonate) και παρασκευάζεται με τον πολυμερισμό του μονομερούς αλλυλ διττανθρακικής διαιθυλενογλυκόλης (diethylenglycol bis allylcarbonate (ADC)) σε υγρή μορφή, με την παρουσία καταλύτη υπερδιττανθρακικού δι-ισοπροπυλίου (diisopropyl peroxtdicarbonate (IPP)) και με θέρμανση. Ο χημικός τύπος του μονομερούς παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 3.8**):



Σχήμα 3.8: Τύπος του μονομερούς (Πηγή: Πατήρης, 2009)

Η χημική δομή του CR-39 το καθιστά σκληρό και ανθεκτικό υλικό σε μηχανικές καταπονήσεις και τριβές καθώς επίσης και σε καυστικά διαλύματα. Επειδή είναι διαπερατό στο ορατό φάσμα του φωτός και σχεδόν μη διαπερατό στις περιοχές του υπεριώδους και των υπέρυθρων, χρησιμοποιείται στην κατασκευή φακών γυαλιών. Ακόμη και μετά από πολύωρη χημική χάραξη με διαλύματα όπως ισχυρά οξέα και βάσεις, οι οπτικές του ιδιότητες δεν αλλοιώνονται. Διατηρεί το σχήμα του και δεν υφίσταται σημαντική παραμόρφωση όταν θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία των 100°C, ενώ η θερμοκρασία τήξης του είναι 130°C. Στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 3.3**) παρουσιάζονται κάποιες από τις βασικές του φυσικές ιδιότητες.

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ CR-39	
Πυκνότητα σε κανονικές συνθήκες	1,32 gr/cm ³
Συντελεστής διάθλασης στους 20°C	1,452
Θερμοχωρητικότητα	0,55 cal/gr °C
Σημείο τήξης	4 °C
Σημείο βρασμού	166 °C

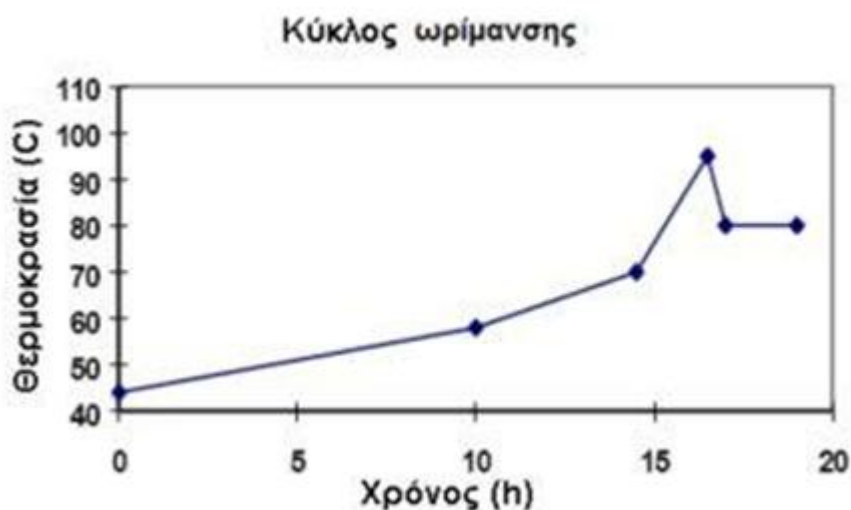
Πίνακας 3.3: Οι φυσικές ιδιότητες του ανιχνευτή CR-39

Ο CR-39 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως ανιχνευτής το 1978 και έκτοτε υπάρχει έντονο εμπορικό ενδιαφέρον για την κατασκευή του. Παρακάτω αναφέρονται οι σημαντικότεροι από τους παρασκευαστές του:

- A) Page Mouldings (Pershore) Ltd, Pershore, Worcs, UK.
- B) American Acrylics and Plastics, Stratsford, CT, USA.
- C) TASL, c/o H H Willis Physics Laboratory, Bristol, UK.
- D) Fujii Optical co, LTD, Japan.

E) Lantrack, UK.

Αν και το υλικό με το οποίο κατασκευάζονται οι ανιχνευτές CR-39 είναι το ίδιο, και θα αναμενόταν όλοι να παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η ρυθμός χάραξης της επιφάνειάς τους V_B διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή (Varques-Lopez et al., 2001). Το αξιοσημείωτο είναι ότι παρατηρούνται διαφορές και μεταξύ ανιχνευτών από την ίδια σειρά παρασκευής. Αυτές αποδίδονται στο γεγονός ότι κατά τον πολυμερισμό τους τα μονομερή σχηματίζουν τρισδιάστατο δίκτυο και είναι πιθανό κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης διαδικασίας να δημιουργηθούν κλειστές περιοχές από αλυσίδες. Μέσα σε αυτές τις κλειστές περιοχές παγιδεύονται μόρια του μονομερούς, τα οποία δεν ενώνονται με άλλα μόρια. Με την τυχαία αυτή απομόνωση μορίων του πολυμερούς δημιουργούνται ανομοιογενείς περιοχές στη δομή του υλικού. Οι κατασκευαστές του CR-39 χρησιμοποιούν τη σταδιακή αυξομείωση της θερμοκρασίας του υλικού με σκοπό την εξίσωση του ρυθμού πολυμερισμού σε όλα τα στάδια παραγωγής του, ώστε να εξαλείψουν το παραπάνω φαινόμενο. Η συγκεκριμένη μέθοδος ονομάζεται κύκλος ωρίμανσης και παρουσιάζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.9). Με την κατασκευαστική αυτή μέθοδο, το φαινόμενο περιορίζεται μεν αλλά δεν εξαλείφεται. Έτσι, η ύπαρξη ανομοιογενειών εντός του υλικού είναι πιθανή με αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση των ρυθμών χάραξης.



Σχήμα 3.9: Κύκλος ωρίμανσης κατά τη διαδικασία πολυμερισμού του CR-39
(Πηγή: Πατήρης, 2009)

3.3.2 Πειραματική χρήση του ανιχνευτή CR-39

Η λειτουργία του ανιχνευτή CR-39 βασίζεται στην ιδιότητα των φορτισμένων σωματιδίων να ιονίζουν τα μόρια του υλικού κατά τη διέλευσή τους. Σωματίδια με μάζα και φορτίο ίσο ή και μεγαλύτερο του πρωτονίου δημιουργούν λανθάνοντα ίχνη στην επιφάνεια του ανιχνευτή, που έχουν διαστάσεις μερικές δεκάδες νανόμετρα. Επειδή τα ίχνη αυτά είναι τόσο μικρά, μπορούν να καταγραφούν μόνο με τη χρήση ηλεκτρονικών μικροσκοπίων. Μετά από χημική χάραξη του ανιχνευτή ωστόσο, είναι δυνατή η μεγέθυνση των ιχνών (τάξη μικρομέτρων) ώστε να καταστούν αυτά ορατά με τη χρήση απλούστερων και λιγότερο δαπανηρών οπτικών μικροσκοπίων. Επίσης, ο ανιχνευτής CR-39 είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στην ακτινοβολία-α σε ένα μεγάλο ενεργειακό εύρος από 0,5-20MeV. Καταγράφει πρωτόνια καθώς και βαρύτερα σωματίδια από τα σωματίδια άλφα όπως προϊόντα σχάσης και χρησιμοποιείται ευρέως και ως μετρητής δόσης από ακτινοβολία νετρονίων.

Τα νετρόνια ως ηλεκτρικά ουδέτερα σωματίδια δεν ιονίζουν κατά τη διέλευσή τους το υλικό του ανιχνευτή, δε σταματούν εντός αυτού και τελικά τον διαπερνούν. Με τον τρόπο αυτό δε δημιουργείται λανθάνον ίχνος άμεσα. Παρόλα αυτά υπάρχει πιθανότητα να σκεδασθούν κατά τη διέλευσή τους (spin-spin αλληλεπίδραση) από τα πρωτόνια των ατόμων του υδρογόνου που υπάρχουν σε αφθονία στο υλικό του ανιχνευτή και να μεταφέρουν σε αυτά μέρος της ενέργειάς τους. Μέσω της διαδικασίας αυτής τα πρωτόνια αποκτούν κινητική ενέργεια και ως φορτισμένα σωματίδια, κινούνται εντός του υλικού ιονίζοντας τα μόριά του. Έτσι, λόγω δηλαδή ανάκρουσης των πρωτονίων, παράγονται ίχνη τα οποία μεγεθυόμενα έχουν τη δυνατότητα να καταγραφούν και να μας παρέχουν, με έμμεσο τρόπο, πληροφορίες για τα διερχόμενα νετρόνια (Klasi et al., 2005; Durrani, 2008; Πατήρης, 2009).

3.3.3 Εφαρμογές των ανιχνευτών CR-39 στο Ραδόνιο

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται συνήθως για τις μετρήσεις Ραδονίου και των θυγατρικών του είναι οι: LR-115, CN-85, Makrofol, CR-39 και PATRAS. Από αυτούς μεγαλύτερη ευαισθησία στις μετρήσεις παρουσιάζουν οι LR-115, CN-85 και CR-39 (Bonetti et. al., 1991). Από δε τους τρεις τελευταίους μόνον οι CR-39 μπορούν να καταγράψουν σωματίδια -α με ενεργειακό εύρος 0,5-20 MeV, γι' αυτό και καλύπτουν πλήρως το φάσμα ενεργειών των σωματιδίων που εκπέμπονται από το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του (Οικονομόπουλος, 2008). Προκειμένου να γίνει

επιλογή του καταλληλότερου είδους πλαστικού ανιχνευτή στη μέτρηση του Ραδονίου σε κατοικίες, πραγματοποιήθηκε από το Στούλο (1998) έκθεση όλων των ειδών των ανιχνευτών σε εσωτερικό χώρο για χρονικό διάστημα 64 d. Από τα αποτελέσματα μέτρησης της πυκνότητας των ιχνών προκύπτει ότι οι CR-39 έχουν απόδοση μέτρησης (ικανότητα εγγραφής-εμφάνισης ιχνών από την ακτινοβολία α Ραδονίου και των προϊόντων διάσπασής του) αρκετά υψηλότερη από αυτήν των CN-85 και πολύ υψηλότερη από αυτήν των LR-115 (Πίνακας 3.4).

Πυκνότητα Ιχνών (tracks cm ⁻²)	
Τύπος Ανιχνευτή	Πυκνότητα Ιχνών (tr. cm ⁻²)
CR-39	2158 ± 168
CN-85	1747 ± 131
LR-115	1266 ± 163

Πίνακας 3.4: Πυκνότητα ιχνών που μετρήθηκαν μετά από ακτινοβολήση 64 ημερών (Πηγή: Στούλος, 1998)

Όπως αναφέρει ο Στούλος (1998) οι διαφοροποιήσεις στην απόδοση οφείλονται στο γεγονός ότι οι ανιχνευτές CR-39 έχοντας ταχύτητα διάβρωσης του «παρθένου» πλαστικού ίση με $1,3 \pm 0,1 \mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ στις συγκεκριμένες συνθήκες χημικής χάραξης (Πίνακα 3.5) εμφανίζουν σωματίδια άλφα που καλύπτουν ενεργειακό φάσμα από 28 MeV, με οριακή γωνία εμφάνισης $\theta_c=8^\circ$ έως και $E_\sigma > 7,7 \text{ MeV}$.

Τύπος Ανιχνευτή	Συνθήκες Χημικής Διάβρωσης
CN-85	6 N NaOH, 50°C, 3 h
LR-115	2,5 N NaOH, 60°C, 2 ± 0,25 h
CR-39	6 N NaOH, 70°C, 8 h ανάδευση

Πίνακας 3.5: Συνθήκες χημικής χάραξης πλαστικών ανιχνευτών (Πηγή: Στούλος, 1998)

Στις συγκεκριμένες συνθήκες χημικής χάραξης οι ανιχνευτές LR-115 έχοντας ταχύτητα διάβρωσης του «παρθένου» πλαστικού ίση με $2,5 \mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ εμφανίζουν σωματίδια άλφα με κάτω όριο ενέργειας $1,7 \pm 0,2 \text{ MeV}$, σε οριακή γωνία εμφάνισης $\theta_c \sim 20^\circ$ και άνω όριο ενέργειας $E_\sigma = 4,1 \pm 0,2 \text{ MeV}$. Στις συγκεκριμένες επίσης συνθήκες οι ανιχνευτές CN-85 με ταχύτητα διάβρωσης του «παρθένου» πλαστικού

ίση με $1,6 \mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ εμφανίζουν σωματίδια άλφα με κάτω όριο ενέργειας 1,8 MeV, σε οριακή γωνία εμφάνισης $\theta_c = 14^\circ$ και άνω όριο ενέργειας $E_\sigma \sim 6 \text{ MeV}$.

Το γεγονός ότι οι ανιχνευτές CR-39 έχουν άνω όριο ενέργειας μεγαλύτερο από 7.7 MeV, τους δίνει τη δυνατότητα να εμφανίζουν ίχνη που προέρχονται από τις άλφα διασπάσεις των θυγατρικών του Ραδονίου, τα άτομα, ιόντα ή συσσωματώματα των οποίων αποτέθηκαν στην επιφάνεια του ανιχνευτή (φαινόμενο plate-out). Αν και το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται σε όλους τους τύπους ανιχνευτών ιχνών επηρεάζει μόνο εκείνους που έχουν άνω όριο ενέργειας εμφάνισης σωματιδίων α - μεγαλύτερο από 6 MeV. Σημειώνεται ότι το φαινόμενο του plate-out δεν παραμένει σταθερό σε συνθήκες περιβάλλοντος και οι μεταβολές του εκφράζονται διαμέσου του παράγοντα ισορροπίας (F) μεταξύ του Ραδονίου και των προϊόντων διάσπασής του (Στούλος, 1998).

Οι τρόποι χρήσης των CR-39 για την ανίχνευση του Ραδονίου και των θυγατρικών του διαφέρουν συνήθως ως προς τη γεωμετρία της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, άλλοτε χρησιμοποιούνται μέσα σε κύπελλα με μεμβράνες διάχυσης και ειδικά φίλτρα ώστε να εμποδίζεται η είσοδος των θυγατρικών ισοτόπων του αερίου στη διάταξη και άλλοτε χρησιμοποιούνται γυμνοί ώστε να ανιχνεύεται και το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του (Kahn et. Al, 1990). Τέλος, όπως αναφέρουν οι Pic & Sutej (1997) οι ανιχνευτές CR-39 λόγω της ευαισθησίας τους, της σταθερότητάς τους σε ποικίλους περιβαλλοντικούς παράγοντες και του υψηλού βαθμού οπτικής τους διαύγειας, χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανίχνευση του Ραδονίου που υπάρχει στο περιβάλλον.

Κεφάλαιο 4: Πειραματικός εξοπλισμός και μεθοδολογία

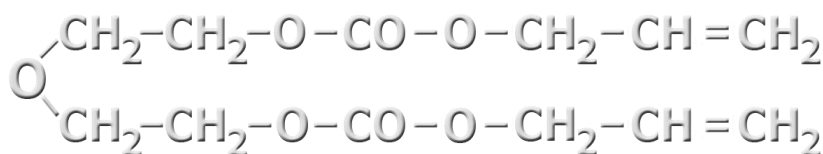
4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι μέθοδοι και καταγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήσαμε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων βαθμονόμησης των ανιχνευτών CR-39. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι ανιχνευτές αυτού του τύπου μετρούν μέσες τιμές συγκεντρώσεων Ραδονίου για κάποιο χρονικό διάστημα, είναι εύχρηστοι, κυρίως για μετρήσεις ευρείας κλίμακας ή για μετρήσεις διαπίστωσης του βαθμού επικινδυνότητας κατοικιών ή άλλων χώρων, και έχουν μικρό κόστος. Οι πειραματικές διατάξεις και τα πειράματα μας έλαβαν μέρος στο εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), το οποίο διαθέτει τον κατάλληλο εξοπλισμό και τα απαραίτητα υλικά για την πραγματοποίηση της έρευνάς μας.

4.2 Περιγραφή και πειραματική χρήση του CR-39 της εταιρείας TASI

4.2.1 Χαρακτηριστικά του CR-39

Οι ανιχνευτές CR-39 που χρησιμοποιήσαμε για την πραγματοποίηση της παρούσης έρευνας είναι της εταιρείας Track Analysis Systems Ltd, Bristol, UK. Η εμπορική ονομασία των ανιχνευτών αυτών είναι TASTRAK και η χημική τους ονομασία Polyallyl diglycol carbonate (PADC) (παράγραφος 3.4.1). Το PADC είναι ένα πλαστικό ειδικά κατασκευασμένο για την ανίχνευση πυρηνικών ιχνών. Είναι ένα καθαρό, σταθερό πλαστικό ευαίσθητο στα ίχνη που αφήνουν τα ενεργειακά πρωτόνια, τα σωματίδια-άλφα αλλά και οι βαρύτεροι πυρήνες. Τα ίχνη αυτά, μετά από έκθεση μπορεί να αποκαλυφθούν μέσω της διαδικασίας της χημικής χάραξης με διαλύματα όπως είναι τα καυστικά αλκάλια. Παρακάτω παρουσιάζονται ο χημικός τύπος (Σχήμα 4.1) και οι ιδιότητες του PADC (Πίνακας 4.1).



Σχήμα 4.1 : Χημικός τύπος του Polyallyl diglycol carbonate (PADC) (Πηγή: <http://www.tasl.co.uk/plastics.html>).

Ιδιότητες του Polyallyl diglycol carbonate (PADC) της εταιρείας TASL	
Εμφάνιση	Διαφανές, άχρωμο, άκαμπτο πλαστικό
Πυκνότητα	1.30g·cm ⁻³
Διαθέσιμα πάχη	0.75, 1.0 και 1.5 mm, 100-200,500 μm
Ελεγμένο για	Υπόβαθρο και απόκριση σε άλφα-σωματίδια
Διατίθεται σε	Ολόκληρα φύλλα ή σε τεμάχια

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες του Polyallyl diglycol carbonate (PADC) (Πηγή: <http://www.tasl.co.uk/index.html>)

Στη συνέχεια της εργασίας μας και όποτε αναφερόμαστε σε ανιχνευτές ή CR-39 θα εννοούμε τους TASTRAK. Οι ανιχνευτές που προμηθευτήκαμε ήταν κατανεμημένοι σε φύλλα. Καθένα από τα πέντε φύλλα που είχαμε στη διάθεσή μας περιελάμβανε 90 αριθμημένους ανιχνευτές που είχαν διαστάσεις 2,5cm x 2,5cm έκαστος (**Σχήμα 4.2**). Κάθε παρτίδα ανιχνευτών είχε υποβληθεί σύμφωνα με τον κατασκευαστή: α) σε προηγούμενο έλεγχο του υπόβαθρου και β) σε έλεγχο της συμπεριφοράς των ανιχνευτών όταν αυτοί εκτίθενται στην άλφα ακτινοβολία. Ο συγκεκριμένος έλεγχος θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικός προκειμένου να εξασφαλιστούν υψηλά στάνταρ στη δοσιμετρία πλαστικών.



Σχήμα 4.2: Φύλλο 90 αριθμημένων ανιχνευτών CR-39 μέσα σε μεταλλική σακούλα

4.2.2 Χρήση του CR-39

Οι σύγχρονες χρήσεις των ανιχνευτών είναι μεταξύ άλλων η δοσιμετρία Ραδονίου και νετρονίων, η μελέτη της σύντηξης, η εξερεύνηση Ουρανίου, η μελέτη των κοσμικών ακτινών. Στα πλαίσια της δικής μας εργασίας, χρησιμοποιήσαμε τους ανιχνευτές ως δοσίμετρα συγκεντρώσεων Ραδονίου, δηλαδή τους χρησιμοποιήσαμε για να μετρήσουμε τις συγκεντρώσεις Ραδονίου σε συγκεκριμένο χώρο. Κάθε δοσίμετρο περιλαμβάνει έναν ανιχνευτή και ένα κύπελλο που αποτελείται από μία βάση και ένα κάλυμμα. Τα κύπελλα χρησιμοποιούνται για να αποτρέπεται η είσοδος των θυγατρικών του Ραδονίου μέσα στο δοσίμετρο. Με τον τρόπο αυτό, είμαστε σίγουροι ότι τα λανθάνοντα ίχνη που δημιουργούνται επάνω στην επιφάνεια των ανιχνευτών προέρχονται μόνο από το Ραδόνιο ή τα θυγατρικά που δημιουργήθηκαν στο εσωτερικό του ανιχνευτή, και όχι από θυγατρικά που υπάρχουν στο περιβάλλον χωρίς να βρίσκονται σε ισορροπία με το Ραδόνιο (Hadler et al., 1991). Η θωράκιση του ανιχνευτή μέσα στο κύπελλο έχει ιδιαίτερη σημασία για την εξασφάλιση της επαναληψιμότητας, ώστε να είναι δυνατή η βαθμονόμηση του ανιχνευτή.

Προκειμένου να προετοιμάσουμε τα δοσίμετρα ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία τηρώντας τις οδηγίες του κατασκευαστή:

1. Βάζουμε στα κύπελλα αυτοκόλλητη ετικέτα με τον κωδικό αριθμό του CR-39 που πρόκειται να τοποθετηθεί μέσα (**Σχήμα 4.3**).
2. Βγάζουμε τους ανιχνευτές από το ψυγείο, ανοίγουμε την πλαστική σακούλα στην οποία βρίσκονται και παίρνουμε το ένα φύλλο.
3. Τοποθετούμε τους υπόλοιπους CR-39 στην πλαστική σακούλα, τη θερμοκολλούμε και τη βάζουμε πίσω στο ψυγείο.
4. Αφήνουμε το φύλλο που βγάλαμε να φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου, ανοίγουμε τη μεταλλική σακούλα και διαχωρίζουμε όσους ανιχνευτές χρειαζόμαστε. Τους υπόλοιπους τους τοποθετούμε ξανά στη θερμοκολλημένη πλαστική σακούλα στο ψυγείο.
5. Ξεπλένουμε με απιονισμένο νερό και καθαρίζουμε με οινόπνευμα τους ανιχνευτές που έχουμε επιλέξει (**Σχήμα 4.4α**).
6. Ψεκάζουμε και τις δύο όψεις των ανιχνευτών με αντιστατικό σπρέι (**Σχήμα 4.4β**). Αυτό το κάνουμε διότι σύμφωνα με τον Miles (1997) τα ηλεκτροστατικά φορτία που υπάρχουν στην εσωτερική επιφάνεια των

δοσιμέτρων επηρεάζουν την απόθεση (plate out) των φορτισμένων προϊόντων διάσπασης του Ραδονίου.

7. Σκουπίζουμε ελαφρά με χαρτί τους ανιχνευτές και τους τοποθετούμε στην εσοχή της βάσης του κύπελλου με την αριθμημένη όψη προς τα πάνω (**Σχήμα 4.5**).
8. Κλείνουμε το κύπελλο ερμητικά και στη φάση αυτή το δοσίμετρο είναι έτοιμο για έκθεση.

Για να πραγματοποιήσουμε τη δική μας έρευνα είχαμε στη διάθεσή μας 450 κύπελλα, όσοι δηλαδή ήταν και οι ανιχνευτές μας.



Σχήμα 4.3: Αυτοκόλλητη ετικέτα στο καπάκι του κύπελλου



Σχήμα 4.4α: Καθαρισμός των ανιχνευτών με οινόπνευμα, απιονισμένο νερό



Σχήμα 4.4β: Καθαρισμός των ανιχνευτών με αντιστατικό σπρέι.



Σχήμα 4.5: Ελαφρύ σκούπισμα των ανιχνευτών με χαρτί και τοποθέτησή τους με την αριθμημένη όψη προς τα πάνω στην εσοχή της βάσης του κυπέλλου

4.2.3 Χημική χάραξη του CR-39

Η διαδικασία που ακολουθήσαμε ώστε να εμφανιστούν τα λανθάνοντα ίχνη τα οποία κατέγραψαν οι ανιχνευτές CR-39 κατά τη διάρκεια της έκθεσής τους, είναι η χημική χάραξη, την οποία αναλύσαμε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτή περιλαμβάνει τη βύθιση των ανιχνευτών σε καυστικό διάλυμα για ορισμένο χρονικό διάστημα και σε περιβάλλον καλά ελεγχόμενης θερμοκρασίας. Παρακάτω περιγράφουμε αναλυτικά τα βήματα που ακολουθούμε κάθε φορά που πραγματοποιούμε τη διαδικασία της χημικής χάραξης, σύμφωνα με τις οδηγίες της εταιρείας TASL:

1. Παρασκευάζουμε καυστικό διάλυμα 6.25N NaOH. Για να το παρασκευάσουμε διαλύουμε 250g NaOH, τα οποία ζυγίζουμε σε αναλογικό ζυγό τύπου Mettler P-1200, σε 1L H₂O. Προκειμένου δε να γίνει πιο γρήγορα και σωστά η διάλυση του NaOH στο H₂O χρησιμοποιούμε μαγνητικούς αναδευτήρες τύπου IKAMAG RH (Σχήμα 4.6). Επισημαίνουμε ότι, επειδή η διάλυση του NaOH είναι ισχυρά εξώθερμη, η προσθήκη του NaOH στο διάλυμα πρέπει να γίνεται με αργό ρυθμό και με συνεχή ανάδευση.



Σχήμα 4.6: Αναλογικός ζυγός τύπου Mettler P-1200 & Μαγνητικός αναδευτήρας τύπου IKAMAG RH

2. Γεμίζουμε με νερό το θερμοστατικό λουτρό, τύπου Memmert WB/OB7-45 (Σχήμα 4.7) ρυθμίζοντάς το στην ενδεικνυόμενη θερμοκρασία (95°C). Το λουτρό χρησιμεύει για να θερμάνουμε το καυστικό διάλυμα στο οποίο βυθίζονται οι ανιχνευτές. Η θέρμανση του λουτρού από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στην επιθυμητή διαρκεί περίπου 2h. Για το λόγο είναι σημαντικό να ξεκινάει η διαδικασία της θέρμανσής του αρκετά νωρίτερα από κάθε έκθεση, έτσι ώστε να είναι έτοιμο τη στιγμή που πρέπει να πραγματοποιηθεί η χάραξη.



Σχήμα 4.7: Θερμοστατικό λουτρό τύπου Memmert WB/OB7-45

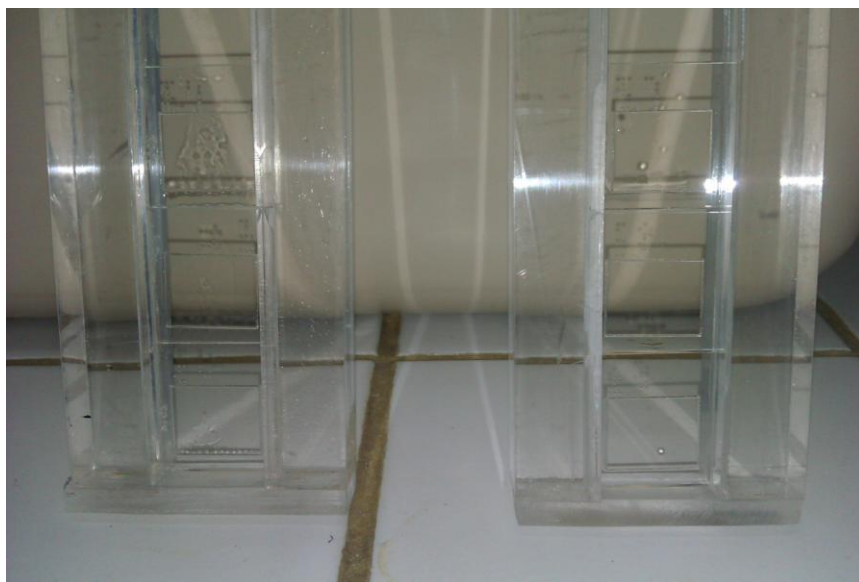
3. Όταν η θερμοκρασία του νερού στο θερμοστατικό λουτρό σταθεροποιηθεί στους 95°C, τοποθετούμε στο λουτρό το ειδικό πλαστικό κυλινδρικό δοχείο χωρητικότητας 1L και το γεμίζουμε με το καυστικό διάλυμα επεξεργασίας. Χρησιμοποιήθηκε δοχείο από πολυπροπυλένιο, το οποίο είναι ανθεκτικό σε καυστικά διαλύματα υπό υψηλή θερμοκρασία (**Σχήμα 4.8**).



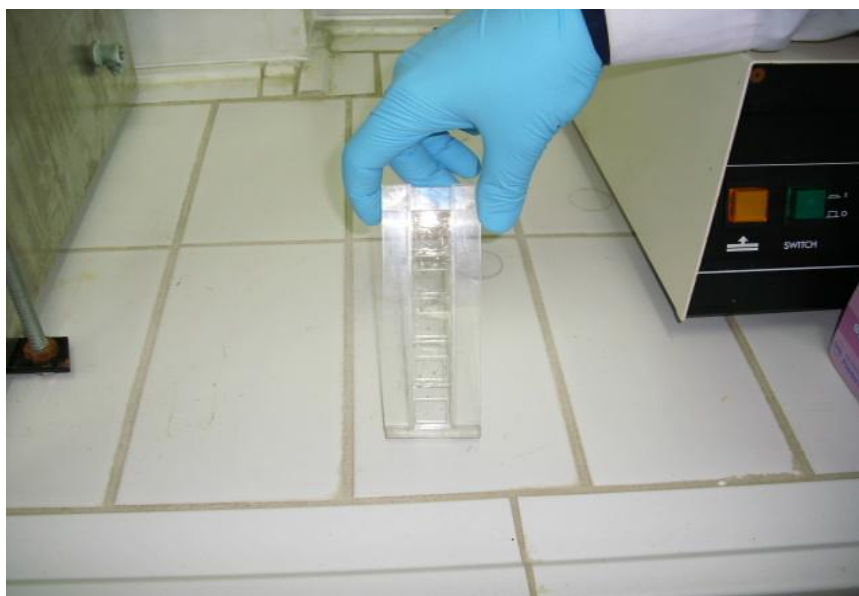
Σχήμα 4.8: Ειδικό πλαστικό δοχείο από προπυλένιο

4. Συλλέγουμε τα εκτεθειμένα δοσίμετρα, αφαιρούμε τους ανιχνευτές από τα πλαστικά κύπελλα και τους ξεπλένουμε ελαφρά με οινόπνευμα.

5. Τοποθετούμε τους ανιχνευτές σε ειδική θήκη από Plexiglass, η οποία κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της παρούσης ΔΕ στο μηχανουργείο του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Χρησιμοποιώντας τη θήκη αυτή είναι δυνατή η ταυτόχρονη χημική χάραξη έως και 5 ανιχνευτών (Σχήμα 4.9α και Σχήμα 4.9β).



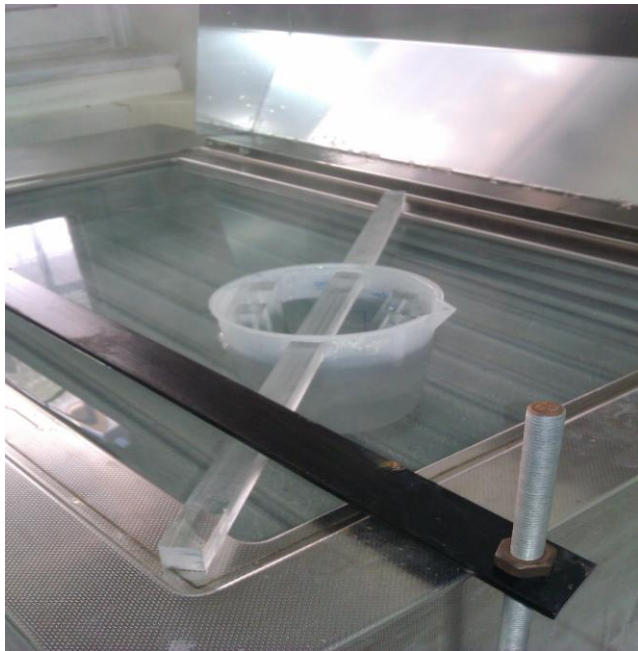
Σχήμα 4.9α: Ειδική θήκη ανιχνευτών από Plexiglas



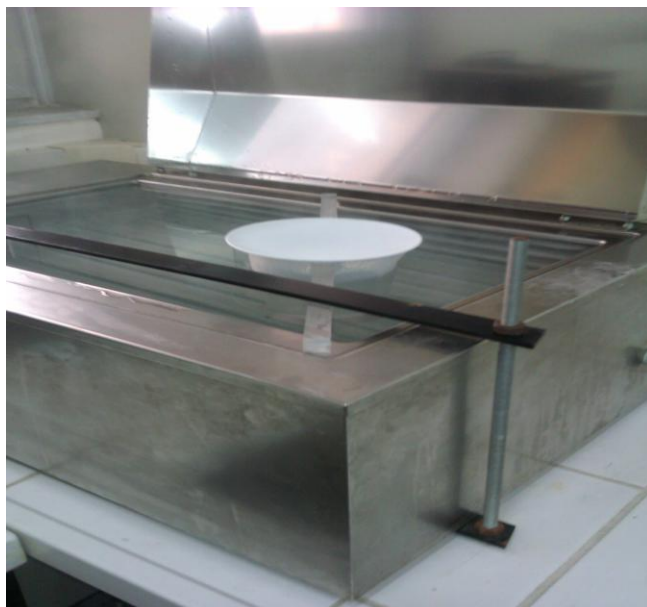
Σχήμα 4.9β: Ειδική θήκη ανιχνευτών από Plexiglas

6. Τοποθετούμε τη θήκη με τους ανιχνευτές μέσα στο δοχείο με το καυστικό διάλυμα και το σκεπάζουμε με κατάλληλο καπάκι από Teflon ώστε να εμποδίζεται η είσοδος και η έξοδος υδρατμών. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε

να μη μεταβάλλεται η συγκέντρωση του διαλύματος και κατ' επέκταση και η δραστηότητά του (Σχήμα 4.10α και Σχήμα 4.10β).



Σχήμα 4.10α: Το δοχείο με το καυστικό διάλυμα πριν τοποθετηθεί το ειδικό καπάκι από Teflon



Σχήμα 4.10β: Το δοχείο με το καυστικό διάλυμα αφότου τοποθετηθεί το ειδικό καπάκι από Teflon

7. Η διαδικασία της χημικής επεξεργασίας διαρκεί 1h. Μετά το πέρας της 1h, αφαιρούμε τη θήκη με τους ανιχνευτές από το λουτρό και τους ξεπλένουμε με απιονισμένο νερό.

8. Εξουδετερώνουμε με μεγάλη προσοχή το καυστικό διάλυμα και ξεπλένουμε το δοχείο που το περιείχε.
9. Καθαρίζουμε ελαφρά τους ανιχνευτές με οινόπνευμα για να απομακρύνουμε τα τελευταία υπολείμματα του καυστικού διαλύματος και περιμένουμε ωστόσο αυτοί στεγνώσουν.

Μετά την ολοκλήρωση της χημικής επεξεργασίας και στη φάση αυτή οι ανιχνευτές είναι έτοιμοι να αποθηκευτούν μέχρις ότου μετρηθούν. Σημειώνεται ότι κάθε ανιχνευτής αφού εκτεθεί σε Ραδόνιο και υποστεί χημική χάραξη δε μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί. Τα καταγεγραμμένα ίχνη ωστόσο δεν καταστρέφονται αλλά παραμένουν αναλλοίωτα για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα και οι ανιχνευτές αρχειοθετούνται και αποθηκεύονται ώστε να μπορούν να καταμετρηθούν μελλοντικά.

4.2.4 Προστασία και αποθήκευση του CR-39

Μία σημαντική παράμετρος για το σωστό υπολογισμό της συγκέντρωσης του Ραδονίου είναι η προσεκτική φύλαξη των ανιχνευτών ώστε αυτοί να προστατεύονται από την ύπαρξη λανθανόντων ιχνών του υποβάθρου. Τα λανθάνοντα αυτά ίχνη προέρχονται κυρίως από την αλληλεπίδραση του ανιχνευτή, με το Ραδόνιο που υπάρχει στο περιβάλλον. Ενδέχεται όμως να προέρχονται και από την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με τα σωματίδια του αέρα και τα σωματίδια του ανιχνευτή. Τα λανθάνοντα ίχνη του υποβάθρου καταγράφονται στην επιφάνειά του ανιχνευτή από τη στιγμή που κατασκευάζεται μέχρις ότου αυτός εκτεθεί σκόπιμα σε πηγή Ραδονίου (Durrani, 1997). Έτσι υπάρχει κίνδυνος να οδηγηθούμε σε διαστρέβλωση των αποτελεσμάτων μας, αφού με τη διαδικασία της χημικής επεξεργασίας τα λανθάνοντα ίχνη του υποβάθρου μεγεθύνονται και προσμετρούνται στα υπόλοιπα ίχνη της μέτρησης.

Για να μην υπάρξει αλληλεπίδραση των ανιχνευτών με την κοσμική ακτινοβολία, αλλά και για να αποφευχθεί ο κίνδυνος διάχυσης Ραδονίου από το περιβάλλον, οι ανιχνευτές πρέπει να σφραγίζονται επιμελώς και να φυλάσσονται προσεκτικά σε κατάλληλα μέρη. Τα φύλλα ανιχνευτών που χρησιμοποιήσαμε στη δική μας έρευνα ήταν όλα σφραγισμένα μέσα σε μεταλλικές σακούλες από τον κατασκευαστή. Ακολουθώντας τις οδηγίες φύλαξης της εταιρείας TASL, εσωκλείσαμε τις μεταλλικές αυτές σακούλες που περιείχαν τα φύλλα των ανιχνευτών σε μία πλαστική σακούλα, τη σφραγίσαμε και την τοποθετήσαμε στην κατάψυξη του ψυγείου του Εργαστηρίου μας.

Ενεργώντας έτσι πετύχαμε ακόμη μεγαλύτερη προστασία και ελαχιστοποιήσαμε, όσο αυτό είναι δυνατόν, την πιθανή διάχυση του Ραδονίου που υπάρχει στο περιβάλλον πάνω στην επιφάνεια του ανιχνευτή. Γνωρίζοντας όμως ότι δεν μπορούσαμε να αποφύγουμε εντελώς την καταγραφή ιχνών υποβάθρου, ελέγξαμε και καταγράψαμε με το πείραμα που περιγράφουμε παρακάτω στην παράγραφο 4.3.5 πόσα ήταν τα ίχνη του υποβάθρου σε μη εκτεθειμένους ανιχνευτές. Στη συνέχεια αφαιρέσαμε την τιμή που βρήκαμε από τις υπόλοιπες μετρήσεις μας. Με τον τρόπο αυτό αυξήσαμε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας.

4.3 Καταμέτρηση των ιχνών

4.3.1 Πειραματικός Εξοπλισμός

Ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήσαμε για να καταγράψουμε τα ίχνη των εκτεθειμένων ανιχνευτών περιλαμβάνει ένα σύστημα μικροσκοπίου και ηλεκτρονικής κάμερας. Το μικροσκόπιο είναι τύπου μετάδοσης Bresser Researcher Trino (**Πίνακας 4.2**), το οποίο διαθέτει τέσσερις αχρωματικούς αντικειμενικούς φακούς 4x, 10x, 40x, 100x και ένα μεταβλητό ζευγάρι προσοφθάλμιων.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά μικροσκοπίου Bresser Researcher Trino	
Μεγέθυνση (x)	40x-1000x
Προσοφθάλμιοι	DIN WF 10x
Αντικειμενικοί φακοί (")	4x, 10x, 40x, 100x (αχρωματικοί)
Βάρος (kg)	3,8
Φωτισμός	6V/20W

Πίνακας 4.2: Μικροσκόπιο Bresser Researcher Trino

(Πηγή: Εγχειρίδιο χρήσης μικροσκοπίου Bresser)

Υπάρχει ένας εστιαστής με λεπτή κίνηση για πολύ καθαρές εικόνες και ένα μηχανικό άγκιστρο για την ακριβή τοποθέτηση του αντικειμενοφόρου. Η κεφαλή του μικροσκοπίου περιστρέφεται κατά 360° και ο παρατηρητής μπορεί να κάνει διοφθαλμικές παρατηρήσεις και συγχρόνως να παίρνει φωτογραφίες ή να χρησιμοποιεί ένα προσοφθάλμιο H/Y.

Η ηλεκτρονική κάμερα που χρησιμοποιήσαμε είναι η MikroCam 3MP της εταιρείας Bresser και συνδέεται με οθόνη υπολογιστή, για τη διευκόλυνση της

διαδικασίας καταμέτρησης. Παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας ακολουθιών βίντεο και απλών εικόνων και η σύνδεση της με τον υπολογιστή γίνεται μέσω μίας θύρας USB 2.0. Με την εγκατάσταση του λογισμικού MicrOcular 3.0 MP μπορούμε να επεξεργαστούμε και να αποθηκεύσουμε τις εικόνες που προβάλλονται στην οθόνη μας, μέσω της κάμερας. Το λογισμικό αυτό παρέχει διάφορες λειτουργίες και φίλτρα για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής εικόνας. Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάμερας (**Πίνακας 4.3**).

Τεχνικά Χαρακτηριστικά κάμερας Bresser MikroCam 3MP	
Τύπος αισθητήρα	CMOS
Ανάλυση	2048 x 1536 pixel
Μέγεθος pixel	3,2x3,2μm
Ενεργή περιοχή	6,6x4,9mm
Ρυθμός πλαισίου	11fps (2048x1536) / 30fps (640x480)
Έλεγχος έκθεσης	αυτόματος/χειροκίνητος
Εξισορρόπηση λευκού	αυτόματη/χειροκίνητη
Ευαισθησία	1,0V/Lux-sec (550nm)

Πίνακας 4.3: Κάμερα Bresser MikroCam 3MP

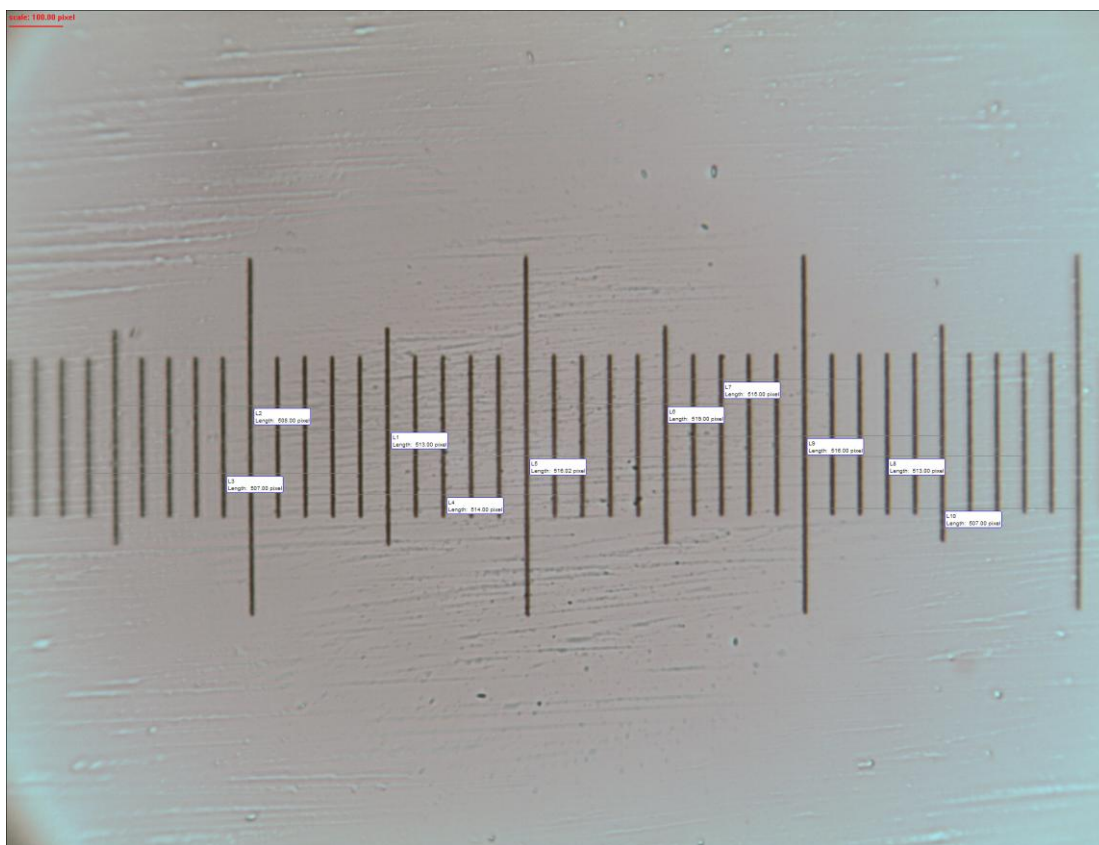
(Πηγή:<http://www.optical-systems.co.uk/bresser-mikrocam-microscope-camera-p-12868.html>)

4.3.2 Βαθμονόμηση Μικροσκοπίου

Κατά τη διαδικασία της καταμέτρησης των ιχνών είναι πολύ σημαντικό να βαθμονομηθεί το οπτικό πεδίο της εικόνας που βλέπουμε στην οθόνη του υπολογιστή, ώστε να είναι δυνατή η αντιστοίχιση των στοιχείων εικόνας (pixel) στις πραγματικές διαστάσεις του αντικειμένου. Το οπτικό πεδίο αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο εμβαδό της επιφάνειας του ανιχνευτή. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι ιδιαίτερα σημαντική επειδή μέσω αυτής υπολογίζεται η επιφανειακή συγκέντρωση των ιχνών των ανιχνευτών, την οποία χρειαζόμαστε για να εκτιμήσουμε τη συγκέντρωση του Ραδονίου στο προς μέτρηση περιβάλλον.

Για να πραγματοποιήσουμε τη βαθμονόμηση των οπτικών πεδίων, χρησιμοποιήσαμε ειδικό πλακίδιο βαθμονόμησης, το οποίο φέρει χαραγμένη κλίμακα ανά 0,01mm. Τοποθετήσαμε το πλακίδιο στο μικροσκόπιο, επιλέξαμε τον

αντικειμενικό φακό μεγέθυνσης x40 και ρυθμίσαμε κατάλληλα την εστίαση. Καταγράψαμε μια φωτογραφία σε ανάλυση 2048x1536px και με τη βοήθεια του λογισμικού MicrOcular 3.0 MP, επισημάναμε 10 αποστάσεις των 100μm όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα (**Σχήμα 4.11**). Οι τιμές των αποστάσεων σε pixel φαίνονται στον **Πίνακα 4.4** και η μέση τιμή της μέτρησης των αποστάσεων αυτών είναι ίση με $512,8 \pm 4,2$ px. Επομένως, ο συντελεστής βαθμονόμησης για μεγέθυνση 40x και ανάλυση 2048x1536px που προέκυψε από τους υπολογισμούς μας ήταν $0,1950 \pm 0,016$ μm/pixel. Με βάση το συντελεστή αυτόν, προκύπτει ότι οι διαστάσεις της εικόνας που καταγράφεται από την κάμερα είναι $W=1536 \times 0,195 = 399 \pm 3$ μm και $H=2048 \times 0,195=305 \pm 3$ μm, και επομένως κάθε εικόνα καλύπτει επιφάνεια $S=122000 \pm 1500$ μm².



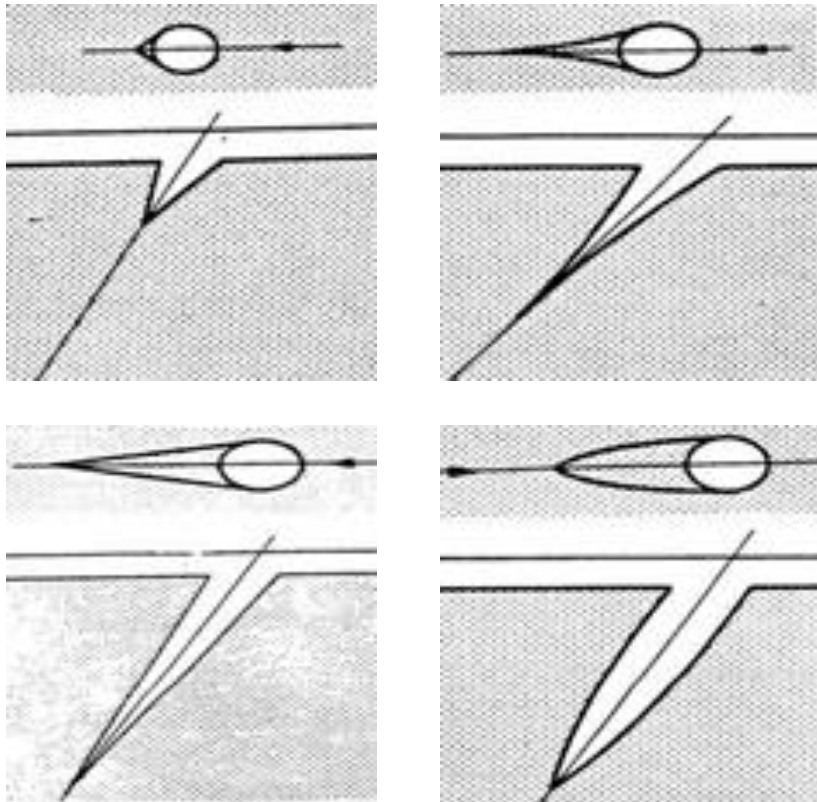
Σχήμα 4.11: Πλακίδιο βαθμονόμησης 0,01 mm

Τιμές των αποστάσεων (pixel)	
513	519
508	515
507	516
514	513
516	507

Πίνακας 4.4: Αποστάσεις σε pixel όπως μετρήθηκαν με τη βοήθεια πλακιδίου βαθμονόμησης

4.3.3 Τυποποίηση μεθόδου αναγνώρισης των ίχνων

Στη συνέχεια έπρεπε να τυποποιήσουμε τη μέθοδο αναγνώρισης των ίχνων του Ραδονίου από άλλα ίχνη, τα οποία παρατηρούσαμε στην επιφάνεια του ανιχνευτή και τα οποία οφείλονται σε καταστροφές του υλικού και όχι σε α-ακτινοβολία. Τα ίχνη αυτά ορισμένες φορές μοιάζουν με αχνά και μικρά ίχνη Ραδονίου, ενώ άλλες φορές είναι πιο μεγάλα και ονομάζονται κρατήρες. Για σταθερές συνθήκες χημικής χάραξης οι διαστάσεις, το σχήμα και η φωτεινότητα των ίχνων εξαρτώνται από την ενέργεια πρόσπτωσης των σωματιδίων στο υλικό. Η φωτεινότητα επηρεάζεται επιπλέον από τις ρυθμίσεις και την εστίαση του μικροσκοπίου. Η διάμετρος ενός ίχνους που προέρχεται από α-σωματίδια μετά από χημική χάραξη κυμαίνεται από $\approx 0,3\mu\text{m}$ έως μερικά μm . Ένα γνήσιο ίχνος από διασπάσεις Ραδονίου θα πρέπει να έχει καλά καθορισμένο σχήμα και πιο συγκεκριμένα να ανήκει σε ένα από τα παρακάτω: α) κυκλικό, β) σχετικώς ελλειψοειδές, γ) αιχμηρούς μορφής και δ) σχήματος πεπλατυσμένου κώνου (**Σχήμα 4.12**) (Durrani, 1997; Νικολόπουλος, 2000). Προκειμένου να εξοικειωθούμε με την εικόνα που παρουσίαζαν τα ίχνη στην επιφάνεια των ανιχνευτών, πραγματοποιήσαμε ένα πείραμα ελέγχου που περιγράφουμε στη συνέχεια.



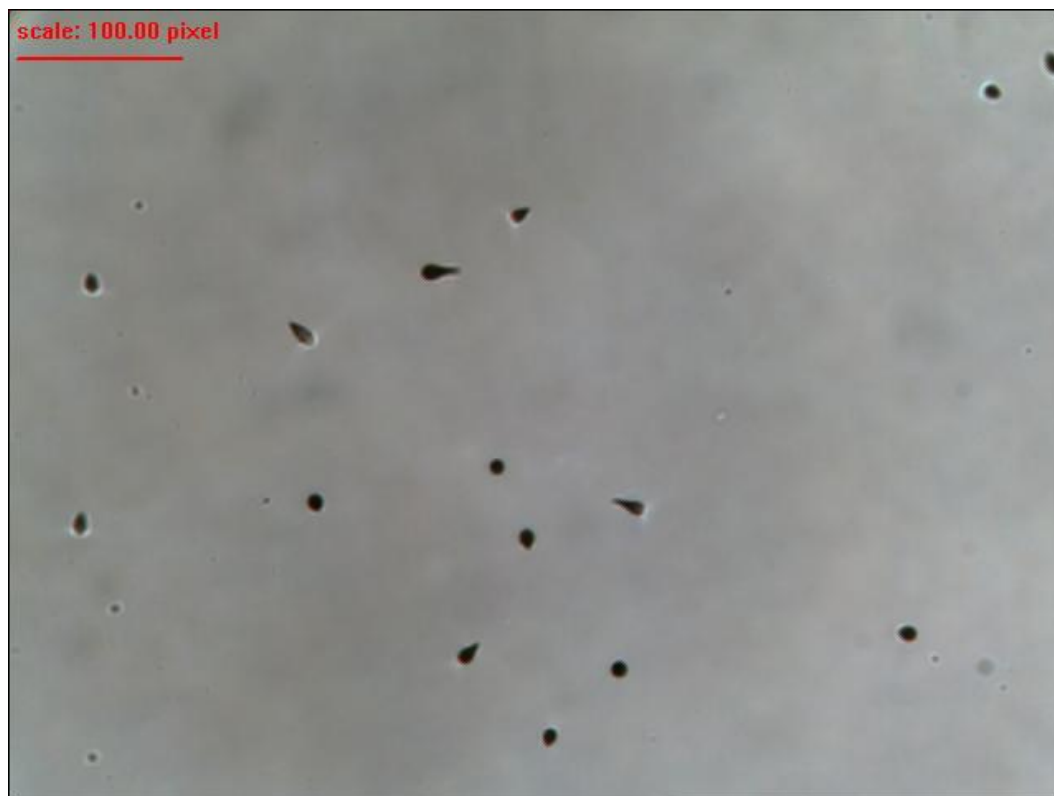
Σχήμα 4.12: Τύποι ιχνών διασπάσεων Ραδονίου σε CR-39 σε σχηματική αναπαράσταση: α) κυκλικό, β) σχετικώς ελλειψοειδές, γ) αιχμηρούς μορφής και δ) σχήματος πεπλατυσμένου κώνου

4.3.4 Πείραμα έκθεσης CR-39 σε πηγή σωματιδίων α

Πριν ξεκινήσουμε την κανονική έκθεση στο θάλαμο Ραδονίου και για να εξοικειωθούμε με το σχήμα των ιχνών που θα βλέπαμε στην επιφάνεια των ανιχνευτών μέσα από το μικροσκόπιο, θεωρήσαμε σκόπιμο να πραγματοποιήσουμε ένα πείραμα ελέγχου. Αποφασίσαμε να εκθέσουμε έναν ανιχνευτή, με κωδικό αριθμό 2446, σε ανοιχτή πηγή ^{241}Am - ^{239}Pu - ^{244}Cm τοποθετώντας τον σχεδόν σε επαφή με την πηγή για 5s. Στη συνέχεια ακολουθώντας όλα τα βήματα που έχουμε αναφέρει στην παράγραφο 4.2.3 για τη χημική χάραξη, αφήσαμε τον ανιχνευτή μέσα στο καυστικό διάλυμα για μία ώρα. Αμέσως μετά τον καθαρίσαμε με απιονισμένο νερό και οινόπνευμα και περιμέναμε έως ότου στεγνώσει για να τον μετρήσουμε.

Η διαδικασία της καταμέτρησης ήταν πραγματικά εντυπωσιακή καθώς ο ανιχνευτής σε μόλις 5s που ήταν σε επαφή με την πηγή είχε καταγράψει πολύ μεγάλο αριθμό ιχνών, όπως παρατηρούμε από την παρακάτω φωτογραφία (**Σχήμα 4.13**). Με τη βοήθεια του πλακιδίου βαθμονόμησης διαπιστώσαμε ότι τα ίχνη που καταγράφηκαν έχουν διαστάσεις από 1 έως 2μm. Το συγκεκριμένο πείραμα που κάναμε ήταν πολύ χρήσιμο επειδή μας βοήθησε να διακρίνουμε τα ίχνη που

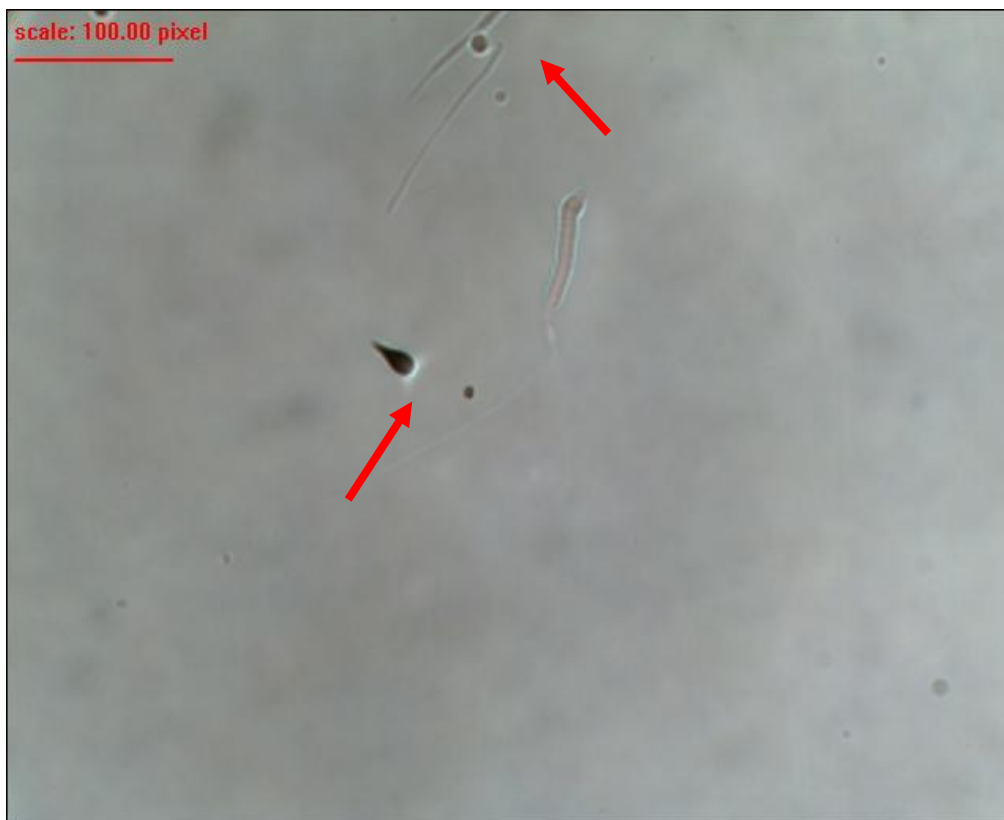
προέρχονταν από ακτινοβολία σε σχέση με εκείνα που είχαν προκύψει από φθορές και βλάβες της επιφάνειας του ανιχνευτή (**Σχήμα 4.14**). Τα σχήματα και το μέγεθος των ιχνών που παρατηρήσαμε στο μικροσκόπιό μας συνέπεσαν με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας (**Σχήματα 4.15**). Έχει παρατηρηθεί γενικά ότι η καταμέτρηση των ιχνών από έμπειρο μικροσκοπιστή είναι η πιο ακριβής τεχνική, ωστόσο είναι αργή και κουραστική. Αυτός θα πρέπει να είναι σταθερός όταν αποφασίζει αν αυτό που παρατηρεί αποτελεί ή όχι ίχνος και η καταμέτρηση θα πρέπει να γίνεται σε σταθερές συνθήκες (ίδιο μικροσκόπιο, μεγέθυνση και φωτισμό) για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο. Διαφορετικοί μικροσκοπιστές μπορεί να έχουν διαφορετικά κριτήρια και να βγάζουν άλλα αποτελέσματα για τον ίδιο ανιχνευτή (Miles, 1997).



Σχήμα 4.13: *Ιχνη διαφόρων σχημάτων στον ανιχνευτή CR-39 από την έκθεση σε πηγή σωματιδίων α*



Σχήμα 4.14: Ίχνη που έχουν προκύψει από φθορές και βλάβες της επιφάνειας του ανιχνευτή



Σχήμα 4.15: Ίχνος σχετικώς ελλειψοειδές που έχει προκύψει από α-σωματίδια και ίχνος από βλάβη της επιφάνειας του ανιχνευτή

4.3.5 Επιλογή ρυθμίσεων και διαδικασία καταμέτρησης

Την καταμέτρηση των ιχνών την κάναμε χειροκίνητα, χρησιμοποιώντας το φακό x40 επειδή ήταν πιο εύχρηστος και αποτελεσματικός. Επιλέξαμε να εργαστούμε σε ανάλυση 640x480 pixel γιατί το σύστημα μικροσκοπίου-κάμερας ανταποκρινόταν καλύτερα στην ανάλυση αυτή. Μετακινούσαμε κάθε φορά τη βαθμονομημένη τράπεζα του μικροσκοπίου που διαθέτει ενσωματωμένη κλίμακα vernier κάθετα και οριζόντια, με ακρίβεια χιλιοστού, ώστε να σαρώνουμε την επιφάνεια του ανιχνευτή. Πιο αναλυτικά, τοποθετούσαμε τον προς μέτρηση ανιχνευτή στο μικροσκόπιο με την αριθμημένη όψη προς τα πάνω, ανάβαμε το φωτισμό από το διακόπτη στην πίσω πλευρά του μικροσκοπίου και ρυθμίζαμε την ένταση από το ποτενσιόμετρο στη δεξιά πλευρά του (Σχήμα 4.16).



Σχήμα 4.16: Φωτισμός και οριζόντια κλίμακα vernier του μικροσκοπίου τύπου μετάδοσης Bresser Researcher Trino

Στη συνέχεια σαρώναμε την επιφάνεια του ανιχνευτή από το ένα του άκρο μέχρι το άλλο, πάνω στην ίδια διεύθυνση και με βήμα ενός οπτικού πεδίου. Με τον όρο οπτικό πεδίο, εννοούμε κάθε εικόνα της επιφάνειας του ανιχνευτή που βλέπουμε στην οθόνη του υπολογιστή. Αφού σαρώναμε την πρώτη σειρά οπτικών πεδίων, η διαδικασία επαναλαμβανόταν για τη δεύτερη σειρά που απείχε από την πρώτη γραμμή ένα χιλιοστό σε κάθετη διεύθυνση. Η πρώτη σειρά ξεκινούσε από το σημείο 2 στην κάθετη κλίμακα vernier του μικροσκοπίου και μόλις τελείωνε η οριζόντια αυτή σάρωση, μετακινούσαμε κάθετα προς τα κάτω την τράπεζα του μικροσκοπίου

ώστε η ένδειξη αυτή να γίνει 3. Κάναμε πάλι οριζόντια σάρωση από τη μία άκρη του ανιχνευτή στην άλλη και ούτω καθεξής μέχρι που σταματούσαμε όταν η ένδειξη γινόταν 11. Έτσι, σαρώναμε με συστηματικό τρόπο την επιφάνεια του κάθε ανιχνευτή μετακινώντας την τράπεζα του μικροσκοπίου από το 2 έως το 11 στην κάθετη κλίμακα vernier, με βήμα 1. Υπήρχε επαναληψιμότητα στη διαδικασία καταγραφής, δηλαδή συμφωνία μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων που κάναμε. Με τον τρόπο αυτό, μετά από 10 οριζόντιες σαρώσεις από το σημείο 2 έως το 11, είχαμε καλύψει επιφάνεια $\approx 0,5185\text{cm}^2$ της συνολικής επιφάνειας του ανιχνευτή. Έχοντας αυτό ως δεδομένο, μπορούσαμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα ιχνών, δηλαδή τον αριθμό των μετρούμενων α-σωματιδίων ανά επιφάνεια ($\text{tracks}\cdot\text{cm}^{-2}$).

4.4 Πρωτόκολλο πειράματος μέτρησης υποβάθρου

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η φύλαξη των ανιχνευτών είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία επειδή αυτοί δεν πρέπει να εκτίθενται στο Ραδόνιο που υπάρχει στο γύρω περιβάλλον. Τα ίχνη που καταγράφονται στους ανιχνευτές πριν αυτοί εκτεθούν στο θάλαμο Ραδονίου του εργαστηρίου ονομάζονται λανθάνοντα ίχνη υποβάθρου. Προκειμένου να μετρήσουμε τα ίχνη αυτά, σχεδιάσαμε ένα πείραμα κατά το οποίο χωρίς να εκθέσουμε τους ανιχνευτές σε Ραδόνιο περάσαμε κατευθείαν στη διαδικασία της χημικής τους χάραξης. Πιο συγκεκριμένα, μετά την προετοιμασία των ανιχνευτών 2436 έως 2440 (παράγραφος 4.2.2), παραλείποντας όμως να τους τοποθετήσουμε σε κύπελλα, τους εκθέσαμε σε καυστικό διάλυμα κατά τη διαδικασία της χημικής χάραξης που περιγράψαμε αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.3.

Αναφέρουμε συνοπτικά ότι τοποθετήσαμε τους 5 μη εκτεθειμένους ανιχνευτές στην ειδική θήκη από Plexiglas που είχαμε κατασκευάσει και στη συνέχεια τους βάλαμε σε καυστικό διάλυμα NaOH 6,25N το οποίο βρισκόταν σε ειδικό δοχείο μέσα στο θερμοστατικό λουτρό σε θερμοκρασία 95°C. Η χημική χάραξη διήρκησε 1h και αφού καθαρίσαμε για άλλη μία φορά τους ανιχνευτές με απιονισμένο νερό και οινόπνευμα, περιμέναμε μέχρις ότου στεγνώσουν για να περάσουμε στην επόμενη φάση, αυτή της καταμέτρησης των ιχνών του υποβάθρου. Την καταμέτρηση την πραγματοποιήσαμε σαρώνοντας την επιφάνεια των ανιχνευτών με τη βοήθεια του μικροσκοπίου μας, τύπου μετάδοσης Bresser Researcher Trino (παράγραφος 4.3.5). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία καταμέτρησης των ιχνών ήταν

μέσα στα αναμενόμενα όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία όρια, δηλαδή η πυκνότητα ιχνών κυμαινόταν από 10-40 tracks·cm⁻² (**Πίνακας 4.5**) (Durrani, 1997).

Πιο αναλυτικά, η ευρεθείσα μέση τιμή της πυκνότητας των ιχνών του υποβάθρου 32±10 καταδεικνύει ότι: α) έχει γίνει ο απαραίτητος έλεγχος του υποβάθρου από τον κατασκευαστή και β) οι ανιχνευτές φυλάσσονται σε ασφαλές μέρος μακριά από πηγές Ραδονίου. Σημειώνεται ότι η μέση τιμή του υποβάθρου αφαιρείται από κάθε επόμενη μέτρηση, ώστε να υπολογίζεται η καθαρή πυκνότητα των ιχνών στην επιφάνεια των ανιχνευτών, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την αξιοπιστία των πειραμάτων μας.

Κωδικός Αριθμός Ανιχνευτή	Πλήθος Ιχνών (tracks)	Πυκνότητα Ιχνών (tracks cm ⁻²)
2436	17	32,8
2437	16	30,9
2438	25	48,2
2439	12	23,1
2440	13	25,1
Μέση τιμή	16,6	32,02
Τυπική απόκλιση	5,1	9,89

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα μέτρησης υποβάθρου

4.5 Πείραμα έκθεσης σε Ραδόνιο

Αφού ολοκληρώσαμε την καταμέτρηση του υποβάθρου, πραγματοποιήσαμε ένα ποιοτικό πείραμα έκθεσης σε Ραδόνιο για να εξοικειωθούμε με την έκθεση των ανιχνευτών σε συγκεκριμένες συγκεντρώσεις Ραδονίου. Το πείραμα υλοποιήθηκε στο θάλαμο Ραδονίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ με την ακόλουθη σειρά. Προετοιμάσαμε τα δοσίμετρα 2431 έως 2435 (παράγραφος 4.2.2) και τα τοποθετήσαμε στο θάλαμο έκθεσης. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία του ποιοτικού πειράματος (**Πίνακας 4.6**).

Στοιχεία Πειράματος	
Ημερομηνία έναρξης έκθεσης	01-12-10
Ημερομηνία λήξης έκθεσης	07-12-10
Μέση συγκέντρωση θαλάμου ($Bq\cdot m^{-3}$)	2994
Συνολική μετρηθείσα έκθεση ($kBq\cdot h\cdot m^{-3}$)	429
Θερμοκρασία θαλάμου ($^{\circ}C$)	18
Υγρασία θαλάμου (%)	55
A/A Δοσίμετρου CR-39	2431, 2432, 2433, 2434, 2435
Αρχείο Οργάνου	101207A1

Πίνακας 4.6: Ποιοτικό πείραμα έκθεσης σε Ραδόνιο

Σημειώνεται ότι τα επίπεδα Ραδονίου μέσα στο θάλαμο ήταν συγκρίσιμα με αυτά που απαιτούνται ώστε να μπορεί να διεξαχθεί με επιτυχία ένα πείραμα βαθμονόμησης.

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία της έκθεσης, συλλέξαμε τα δοσίμετρα και συνεχίσαμε με τη χημική χάραξη των ανιχνευτών (παράγραφος 4.2.3). Μετά την καταμέτρηση των ιχνών με το μικροσκόπιό μας (παράγραφος 4.3.5) υπολογίσαμε την πυκνότητά τους στην επιφάνεια των ανιχνευτών (**Πίνακας 4.7**) και διαπιστώσαμε ότι υπήρχε ένα ικανοποιητικό πλήθος ιχνών σε σχέση με το υπόβαθρο το οποίο είχε μετρηθεί στο προηγούμενο πείραμα. Αυτό σημαίνει ότι πραγματοποιήθηκαν σωστά η διαδικασία της έκθεσης, της χημικής χάραξης και της καταμέτρησης των ιχνών. Έτσι καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το ποιοτικό πείραμα ελέγχου διεξήχθη με επιτυχία.

Κωδικός Αριθμός Ανιχνευτή	Πλήθος Ιχνών (tracks)	Πυκνότητα Ιχνών (tracks cm^{-2})
2431	259	499,5
2432	233	449,4
2433	253	487,9
2434	177	341,4
2435	276	532,3
Μέση Τιμή	239,6	462,1
Τυπική Απόκλιση	38,2	73,7

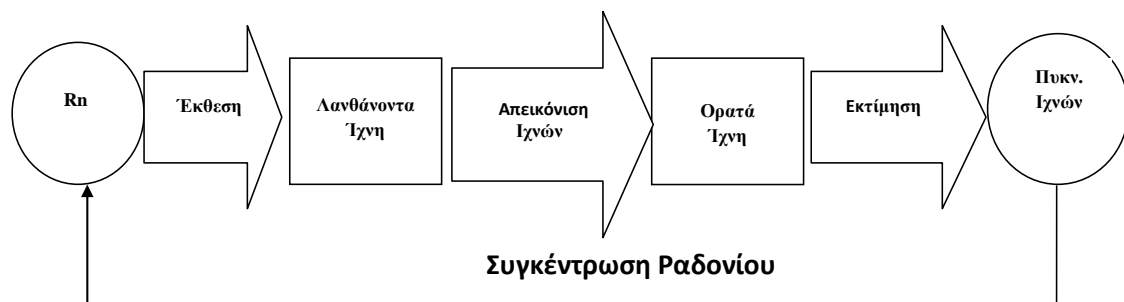
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα καταμέτρησης ιχνών πρώτου πειράματος

Με την ολοκλήρωση των διαδικασιών που περιγράφηκαν παραπάνω, ήμασταν πλέον σε θέση να προχωρήσουμε στα πειράματα βαθμονόμησης του ανιχνευτή CR-39, τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο θάλαμο Ραδονίου του Εργαστηρίου μας και περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 5: Πειράματα βαθμονόμησης CR-39

5.1 Εισαγωγή

Με τη βαθμονόμηση των ανιχνευτών CR-39 είναι δυνατή η εκτίμηση της σχέσης μεταξύ της πυκνότητας των ιχνών στην επιφάνεια των ανιχνευτών ($\text{tracks} \cdot \text{cm}^{-2}$) και της συνολικής έκθεσης σε Ραδόνιο στο χώρο ($\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$). Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρουμε την πειραματική διαδικασία που ακολουθήσαμε και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήσαμε για να κάνουμε τα πειράματα βαθμονόμησης. Επίσης περιγράφουμε τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων που εφαρμόσαμε για να φέρουμε δύο καμπύλες βαθμονόμησης, μία για την πηγή μας και μία για το φορητό μετρητή AlphaGUARD. Από τις καμπύλες αυτές προκύπτει και ο συντελεστής βαθμονόμησης μέσω του οποίου είναι δυνατή η αντιστοίχιση πυκνότητας ιχνών και συγκέντρωσης Ραδονίου σε συγκεκριμένο πεδίο. Στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 5.1**) παρουσιάζονται εποπτικά οι κύριες διεργασίες που εμπλέκονται στην ανίχνευση και την εκτίμηση του Ραδονίου από ένα δοσίμετρο ανίχνευσης ιχνών.



Σχήμα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση των κύριων διεργασιών που εμπλέκονται στην ανίχνευση και εκτίμηση του Ραδονίου μέσω δοσίμετρου ανίχνευσης ιχνών

5.2 Θάλαμος Ραδονίου

Τα πειράματα βαθμονόμησης που παρουσιάζονται στην παρούσα ΔΕ πραγματοποιήθηκαν στο μεγαλύτερο από τους δύο θαλάμους Ραδονίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ, όγκου 8,5m³. Σύμφωνα με τους Alter and Fleischer (1981), η βαθμονόμηση οποιασδήποτε ολοκληρωτικής συσκευής μέτρησης του Ραδονίου ή των θυγατρικών του θα πρέπει να πραγματοποιείται σε εργαστηριακό περιβάλλον που θα πληροί τα εξής:

1. Καλά καθορισμένα επίπεδα Ραδονίου
2. Καλά καθορισμένο περιβάλλον σε σχέση με την ισορροπία των θυγατρικών, το μέγεθος των αερολυμάτων, τη συγκέντρωση και την υγρασία
3. Κατάλληλη οργανολογία για τη συνεχή καταμέτρηση του Ραδονίου
4. Ομοιομορφία του Ραδονίου που διαχέεται στο θάλαμο βαθμονόμησης και επάρκεια χώρου ώστε να επιτρέπεται η ταυτόχρονη έκθεση πολλών ανιχνευτικών διατάξεων

Στο συγκεκριμένο θάλαμο βαθμονόμησης του ΕΠΤ-ΕΜΠ, τα επίπεδα Ραδονίου είναι καλά καθορισμένα, υπάρχει ομοιόμορφη συγκέντρωση Ραδονίου, επάρκεια χώρου και κατάλληλη οργανολογία για τη συνεχή καταμέτρηση του αερίου. Επιπλέον οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας κυμαίνονται σε φυσιολογικά επίπεδα εσωτερικού χώρου και δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές. Όσον αφορά το καλά καθορισμένο περιβάλλον σε σχέση με την ισορροπία των θυγατρικών και το μέγεθος των αερολυμάτων, χρησιμοποιήσαμε ανιχνευτές που τοποθετούνται μέσα σε κύπελλα, στο εσωτερικό των οποίων μπορεί να εισέρθει μόνο το αέριο Ραδόνιο. Με τον τρόπο αυτό αποτρέπεται η είσοδος των θυγατρικών του Ραδονίου και των διαφόρων σωματιδίων, τα οποία μπορεί να αλλοιώσουν το αποτέλεσμα της βαθμονόμησης. Ο θάλαμος Β του ΕΠΤ-ΕΜΠ τον οποίον χρησιμοποιήσαμε είναι επομένως κατάλληλος για την πραγματοποίηση ελεγχόμενων εκθέσεων με ασφαλή τρόπο, παρόμοιων με εκείνων που εμφανίζονται στους εσωτερικούς χώρους. Είναι κατασκευασμένος από φύλλα ανοξείδωτου χάλυβα πάχους 2 και 3 mm, κλείνει αεροστεγώς και οι διαστάσεις του είναι: 1,95m x 1,75m x 2,50m (**Σχήμα 5.2**).



Σχήμα 5.2: Θάλαμος Ραδονίου Β

Στην πίσω πλευρά του θαλάμου υπάρχει ένα παράθυρο από Plexiglas που επιτρέπει την παρακολούθηση του εσωτερικού του κατά τη διάρκεια των εκθέσεων και υπάρχουν επίσης διάφορες οπές στα τοιχώματά του θαλάμου μέσω των οποίων συνδέονται ηλεκτρονικές διατάξεις παρακολούθησης και καλωδιώσεις (Μαρινάκης, 2007). Υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου και συνεχούς καταμέτρησης της συγκέντρωσης του Ραδονίου αλλά και των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν μέσα στο θάλαμο, δηλαδή της σχετικής υγρασίας, της πίεσης και της θερμοκρασίας.

5.2.1 Πηγή Ραδονίου

Το Ραδόνιο που εισέρχεται στο θάλαμο Β προέρχεται από κατάλληλη πηγή Ραδίου (^{226}Ra), τύπου RF200, του Czech Metrology Institute (**Σχήμα 5.3**). Η ονομαστική ραδιενέργεια της πηγής αυτής είναι 274.3 kBq και έχει την ιδιότητα να απελευθερώνει προς την ελεύθερη ατμόσφαιρα πρακτικά το 100% του Ραδονίου που

παράγεται από το κρυσταλλικό στερεό της. Προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε την πηγή Ραδίου για την παραγωγή βαθμονομημένων ποσοτήτων Ραδονίου, πρέπει να προηγηθεί η διαδικασία του μηδενισμού, δηλαδή η πλήρης απομάκρυνση όποιας ποσότητας Ραδονίου υπάρχει στο κυλινδρικό δοχείο που περιβάλλει την πηγή. Ο μηδενισμός γίνεται με πλήρη εξαερισμό (degassing) του δοχείου αυτού μέσω της παροχής ρεύματος καθαρού ατμοσφαιρικού αέρα. Η χρονική στιγμή που ολοκληρώνεται ο μηδενισμός, θεωρείται η χρονική στιγμή 0 και αρχίζει η παραγωγή Ραδονίου.

Η ραδιενέργεια του Ραδονίου που παράγεται υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$A(t) = A_0(1 - e^{-\lambda T})$$

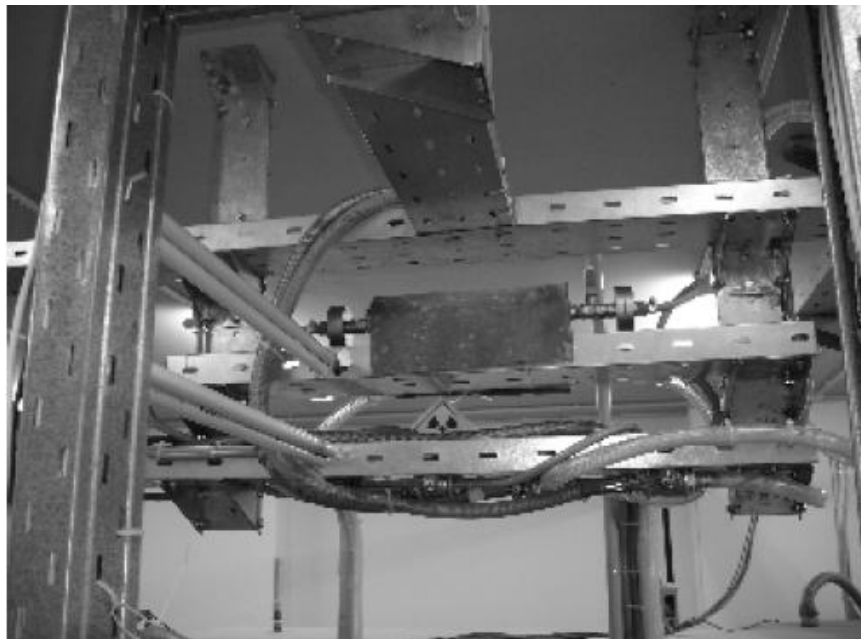
όπου:

A η ραδιενέργεια του παραγόμενου ραδονίου σε Bq,

A₀ η ραδιενέργεια του περιεχόμενου Ραδίου-226 της πηγής,

λ η σταθερά διάσπασης του Ραδονίου σε min⁻¹ (λ=1,26·10⁻⁴ min⁻¹)

T είναι η διάρκεια παραγωγής Ραδονίου σε min



Σχήμα 5.3: Πηγή Ραδίου (²²⁶Ra) του Czech Metrological Institute, τύπου RF200

5.2.2 Μετάγγιση Ραδονίου στο Θάλαμο

Η μετάγγιση του Ραδονίου που έχει σχηματιστεί στο δοχείο της πηγής από τη χρονική στιγμή 0 έως τη χρονική στιγμή T γίνεται με τη βοήθεια σωληνώσεων και αντλιών αερίου. Αν η μετάγγιση αυτή είναι πλήρης, δημιουργείται συγκέντρωση Ραδονίου μέσα στο θάλαμο ίση με:

$$Rn_0 = A(t)/V$$

Σε περίπτωση που ορίσουμε μία νέα αρχή των χρόνων που να ταυτίζεται με τη χρονική στιγμή λήξης της μετάγγισης του Ραδονίου από το δοχείο της πηγής σε θάλαμο Ραδονίου, τότε η συγκέντρωση του Ραδονίου στο θάλαμο Rn' μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου t με βάση τον απλό εκθετικό νόμο ραδιενεργού απομείωσης:

$$Rn' = Rn_0 e^{-\lambda t}$$

Έστω τώρα ότι ο συνολικός χρόνος που παρήλθε από τη λήξη της μετάγγισης έως το άνοιγμα του θαλάμου στο ελεύθερο περιβάλλον ή την με άλλο τρόπο αλλοίωση της συγκέντρωσης Ραδονίου σε αυτόν (π.χ. με βίαιο εξαερισμό) είναι T_s (min). Τότε η μέση συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο το χρονικό διάστημα T_s υπολογίζεται από την εξίσωση (Πασχαλίδης, 2008):

$$Rn = \frac{\int_0^{T_s} Rn_0 e^{-\lambda t} dt}{T_s} = \frac{Rn_0}{T_s} \left[-\frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} \right]_0^{T_s}$$

5.3 Ανιχνευτής AlphaGUARD

Ο ανιχνευτής AlphaGUARD τοποθετείται μέσα στο θάλαμο Ραδονίου τη στιγμή που γίνεται η έκθεση και καταγράφει συνεχώς, με ενεργητικές τεχνικές τα επίπεδα Ραδονίου και τις συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας που επικρατούν μέσα σε αυτόν. Ο φορητός ανιχνευτής είναι τύπου AlphaGUARD PQ2000Pro της εταιρίας

Genitron GmbH (Σχήμα 5.4) και αποτελεί στην ουσία ένα θάλαμο ιονισμού μικρών διαστάσεων, όγκου 0,56 L, στον οποίον εισέρχεται μόνο Ραδόνιο, μέσω της παθητικής διάχυσης του περιβάλλοντος αέρα.



Σχήμα 5.4: AlphaGUARD PQ2000Pro

Αυτό συμβαίνει διότι ο αέρας διέρχεται από φίλτρο με ίνες ύαλου (fiberglass), που κατακρατεί τα θυγατρικά του Ραδονίου καθώς και τα σωματίδια σκόνης. Στη συνέχεια με τη βοήθεια υψηλής τάσης δημιουργείται ιονισμός στο χώρο του θαλάμου από τις διασπάσεις του Ραδονίου. Αμέσως μετά ενισχύεται το σήμα σε μία μονάδα προενίσχυσης και μετατρέπεται από αναλογικό σε ψηφιακό. Τέλος αναλύεται από μονάδα ηλεκτρονικών (Digital Signal Processing, DSP) και γίνεται καταγραφή των αποτελεσμάτων. Το AlphaGUARD PQ2000Pro μπορεί να λειτουργεί με μπαταρία και με ρεύμα. Με την μπαταρία έχει αυτονομία 10 ημερών και η μνήμη του μπορεί να συγκρατεί μετρήσεις περίπου 21 ημερών με χρήση κύκλου 10 λεπτών ή 4 μηνών, αν ο κύκλος μέτρησης είναι 60 λεπτά. Το εύρος των τιμών που μπορεί να καταγράψει η συσκευή, κυμαίνεται από 2 Bq m^{-3} έως $2.000.000 \text{ Bq m}^{-3}$ και η ανάλυση τιμών στην οθόνη είναι 1 Bq m^{-3} . Διαθέτει επίσης ενσωματωμένους αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας (Genitron, 1998).

5.4 Σχεδιασμός των πειραμάτων βαθμονόμησης

Μελετώντας τη σχετική βιβλιογραφία για τα επιτρεπτά όρια συγκέντρωσης Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, κατοικίες και εργασιακούς χώρους, αποφασίσαμε να εκθέσουμε τους ανιχνευτές, έτσι ώστε οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις πεδίου να κυμαίνονται μεταξύ των ορίων $10\text{-}3000 \text{ Bq m}^{-3}$ (Πίνακας 5.1). Για διάρκεια έκθεσης

του δοσιμέτρου ίση με ένα μήνα, οι συγκεντρώσεις αυτές αντιστοιχούν σε εκθέσεις από 7,2 έως 2160 kBq·h·m⁻³. Επιλέξαμε επομένως να πραγματοποιήσουμε πειράματα βαθμονόμησης που να καλύπτουν κατά το δυνατόν την περιοχή αυτή.

Συγκέντρωση στο πεδίο (Bq·m ⁻³)	Μηνιαία Έκθεση (kBq·h·m ⁻³)	Παρατηρήσεις
10	7,2	Κάτω όριο πιθανής συγκέντρωσης στο πεδίο
50	36	Τυπικός εσωτερικός χώρος
200	144	Όριο νέων κατοικιών (ΕΕ)
400	288	Όριο υφιστάμενων κατοικιών (ΕΕ)
1000	720	Όριο εργασιακών χώρων (ΕΕ)
3000	2160	Ανώτατο όριο εργασιακών χώρων (ΕΕ)

Πίνακας 5.1: Επιλογή ορίων έκθεσης

Πραγματοποιήσαμε συνολικά τέσσερα πειράματα βαθμονόμησης με σκοπό τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ της πυκνότητας των ιχνών στην επιφάνεια των ανιχνευτών (tracks·cm⁻²) και της συνολικής έκθεσης σε Ραδόνιο στο θάλαμο (Bq·h·m⁻³) και την εκτίμηση του συντελεστή βαθμονόμησης. Ύστερα από κάθε προγραμματισμένη έκθεση ακολουθούσε η διαδικασία της χημικής χάραξης και της καταμέτρησης των ιχνών όπως έχουν παρουσιαστεί στις παραγράφους 4.2.3 και 4.3 αντίστοιχα. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση περιλαμβάνει το θάλαμο έκθεσης Ραδονίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ, ένα φορητό μετρητή AlphaGUARD, την απαραίτητη οργάνολογία για τη διαδικασία της χημικής χάραξης και το μικροσκόπιο Bresser Researcher Trino.

5.4.1 Μεθοδολογία πειράματος βαθμονόμησης

5.4.1.1 Δοσίμετρα

Όπως αναφέρθηκε στο 4^ο κεφάλαιο, χρησιμοποιήσαμε τους ανιχνευτές ως δοσίμετρα συγκεντρώσεων Ραδονίου. Υπενθυμίζουμε ότι κάθε δοσίμετρο περιλαμβάνει έναν ανιχνευτή και ένα κύπελλο που αποτελείται από μία βάση και ένα κάλυμμα. Για να αποφύγουμε την πιθανή διάχυση του Ραδονίου από το περιβάλλον στα δοσίμετρα, φροντίζαμε να πραγματοποιούμε τη διαδικασία της προετοιμασίας τους όπως αναφέρεται στην παράγραφο 4.2.2, πριν ακριβώς από κάθε προγραμματισμένη έκθεση. Επίσης ο χειρισμός των ανιχνευτών γινόταν με πλαστικά γάντια και με μεγάλη προσοχή ώστε να μη φθείρεται ή λερώνεται η επιφάνειά τους. Σε κάθε πείραμα επιλέγαμε 5 ανιχνευτές με αύξοντα κωδικό αριθμό και αφού ετοιμάζαμε τα δοσίμετρα τα τοποθετούσαμε σε συγκεκριμένες θέσεις μέσα στο θάλαμο Ραδονίου, τα τέσσερα κοντά στις γωνίες του θαλάμου και το πέμπτο στη μέση αυτού.

5.4.1.2 Διαδικασία έκθεσης

Η διαδικασία της έκθεσης των δοσιμέτρων σε κάθε πείραμα βαθμονόμησης περιλαμβάνει τις παρακάτω φάσεις. Οι λεπτομέρειες χειρισμού περιγράφονται σε προηγούμενη ΔΕ (Μαρινάκης, 2007):

1. Μηδενισμός Πηγής: Όπως έχουμε αναφέρει και στην παράγραφο 5.2.1, προκειμένου να αφαιρεθεί από το δοχείο της πηγής όσο τυχόν Ραδόνιο υπάρχει, ακολουθείται η διαδικασία μηδενισμού της πηγής, δηλαδή ο καθαρισμός της, που γίνεται με τον πλήρη εξαερισμό του δοχείου αυτού. Ο εξαερισμός επιτυγχάνεται με τη διοχέτευση ρεύματος καθαρού ατμοσφαιρικού αέρα μέσω μιας ακτινικής αεραντλίας μεγάλης παροχής (**Σχήμα 5.5**) και είναι απαραίτητος πριν ξεκινήσει η έκθεση των ανιχνευτών ώστε η ποσότητα του Ραδονίου που παράγεται να είναι βαθμονομημένη. Ο χρόνος λήξης καθαρισμού της πηγής σημειώνεται στο ημερολόγιο του θαλάμου και της πηγής.



Σχήμα 5.5: Ακτινική αεραντλία

2. Εξαερισμός του θαλάμου: Επειδή ο θάλαμος βρίσκεται σε επικοινωνία με την πηγή, περιέχει τουλάχιστον ένα μέρος από το Ραδόνιο που υπήρχε στο εσωτερικό της. Το υπόλοιπο Ραδόνιο έχει διοχετευθεί στην ατμόσφαιρα εκτός του εργαστηρίου. Για να οδηγηθεί εκτός θαλάμου η συγκέντρωση αυτή που έχει απομείνει, η λειτουργία της αεραντλίας συνεχίζεται για 60min επιπλέον του καθαρισμού της πηγής. Μετά από τα 60min ο θάλαμος θεωρείται καθαρός και ο χρόνος λήξης του εξαερισμού σημειώνεται στο ημερολόγιο του θαλάμου B.
3. Παραγωγή Ραδονίου από την πηγή: Αμέσως μετά το μηδενισμό, η πηγή βρίσκεται στη χρονική στιγμή 0. Από τη στιγμή αυτή και μετά αρχίζει η παραγωγή του Ραδονίου στο δοχείο της. Η ραδιενέργεια του παραγόμενου Ραδονίου είναι σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 5.2.1.
4. Τοποθέτηση δοσιμέτρων και AlphaGUARD στο θάλαμο: Τοποθετούμε στο θάλαμο B το φορητό μετρητή AlphaGUARD και τα δοσίμετρα που είναι προγραμματισμένο να εκτεθούν σε συγκέντρωση Ραδονίου. Σε κάθε πείραμα έκθεσης βάζουμε 5 δοσίμετρα σε συγκεκριμένες θέσεις μέσα στο θάλαμο (Σχήμα 5.6). Ο μετρητής AlphaGUARD χρησιμοποιείται για τη συνεχή καταγραφή της συγκέντρωσης του Ραδονίου, της θερμοκρασίας και της

υγρασίας που επικρατούν μέσα στο θάλαμο. Αυτός τοποθετείται κοντά στο παράθυρο του θαλάμου κατά τη διάρκεια της έκθεσης ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση των παραπάνω μεγεθών από την οθόνη του.



Σχήμα 5.6: Θέσεις δοσίμετρων και AlphaGUARD μέσα στο θάλαμο

5. Κλείσιμο θαλάμου: Αφού έχουν μπει τα δοσίμετρα και το AlphaGUARD στη θέση τους, σφραγίζουμε τη θύρα του θαλάμου η οποία κλείνει αεροστεγώς, χάριν στο ελαστικό παρέμβυσμα στεγάνωσης που διαθέτει (**Σχήμα 5.7**). Με τη διαδικασία αυτή, ο θάλαμος απομονώνεται από το υπόλοιπο περιβάλλον και είμαστε έτοιμοι να περάσουμε στη φάση της μετάγγισης του Ραδονίου σε αυτόν.



Σχήμα 5.7: Ελαστικό παρέμβυσμα στεγάνωσης θύρας θαλάμου B

6. Μετάγχιση Ραδονίου από την πηγή στο θάλαμο B: Όπως έχουμε αναφέρει και στην παράγραφο 5.2.2 όσο Ραδόνιο έχει σχηματισθεί στο δοχείο της πηγής, από τη χρονική στιγμή 0 έως τη χρονική στιγμή T, μεταγγίζεται από την πηγή στο θάλαμο. Με τον τρόπο αυτό ξεκινά η διαδικασία έκθεσης των ανιχνευτών σε συγκέντρωση Ραδονίου. Η συγκέντρωση αυτή είναι ελεγχόμενη και το Ραδόνιο διαχέεται στο θάλαμο στον οποίο βρίσκονται τοποθετημένα τα δοσίμετρά μας.
7. Έκθεση σε συγκέντρωση Ραδονίου: Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 5.2.2 αν οριστεί μία νέα αρχή των χρόνων που να ταυτίζεται με τη χρονική στιγμή λήξης της μετάγχισης του Ραδονίου από το δοχείο της πηγής στο θάλαμο, τότε η συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο Rn' μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου t με βάση τον απλό εκθετικό νόμο της ραδιενεργού απομείωσης. Οι ανιχνευτές CR-39 παραμένουν στο θάλαμο για μερικές ημέρες ανάλογα με την προγραμματισμένη έκθεση.

8. Αφού ολοκληρωθεί η έκθεση, εξαερίζουμε το θάλαμο όπως ακριβώς αναφέραμε στο βήμα 2.
9. Ανοίγουμε τη θύρα του θαλάμου, αφαιρούμε τα δοσίμετρα από μέσα και διαβάζουμε στη συνέχεια τα δεδομένα που έχει καταγράψει το AlphaGUARD κατά τη διάρκεια της έκθεσης.

Εάν πρόκειται να περάσει σημαντικό χρονικό διάστημα από το άνοιγμα του θαλάμου μέχρι τη χημική χάραξη των ανιχνευτών, η φύλαξή τους πρέπει να γίνεται μακριά από πηγές Ραδονίου όπως αναφέρεται στην παράγραφο 4.2.4.

5.5 Πραγματοποίηση πειραμάτων βαθμονόμησης

Πραγματοποιήσαμε συνολικά τέσσερα πειράματα βαθμονόμησης των ανιχνευτών CR-39 στο θάλαμο Β του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Για κάθε πείραμα ως χρόνος παραγωγής Ραδονίου λήφθηκε η διάρκεια από τη χρονική στιγμή $t_1=0$ λήξης καθαρισμού της πηγής έως τη χρονική στιγμή t_2 λήξης κυκλοφορίας μεταξύ πηγής και θαλάμου. Η αρχική συγκέντρωση C_1 του Ραδονίου επομένως δίνεται από τον τύπο:

$$C_1 = \frac{R_0}{V(1 - e^{-\lambda t_2})}$$

Όπου $R_0=274.3$ kBq η συνολική ραδιενέργεια της πηγής και $V=8.5\text{m}^3$ ο όγκος του θαλάμου. Ως διάστημα έκθεσης των ανιχνευτών λαμβάνεται η χρονική διάρκεια από τη στιγμή t_2 έως τη στιγμή t_3 ανοίγματος του θαλάμου. Η μέση συγκέντρωση στη διάρκεια αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$\langle C \rangle = \frac{1 - e^{-\lambda(t_3-t_2)}}{\lambda(t_3 - t_2)} \cdot C_1$$

Επομένως η συνολική έκθεση του ανιχνευτή με βάση τη ραδιενέργεια της πηγής είναι:

$$E = \frac{R_0}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda(t_3-t_2)}) (1 - e^{-\lambda t_2})$$

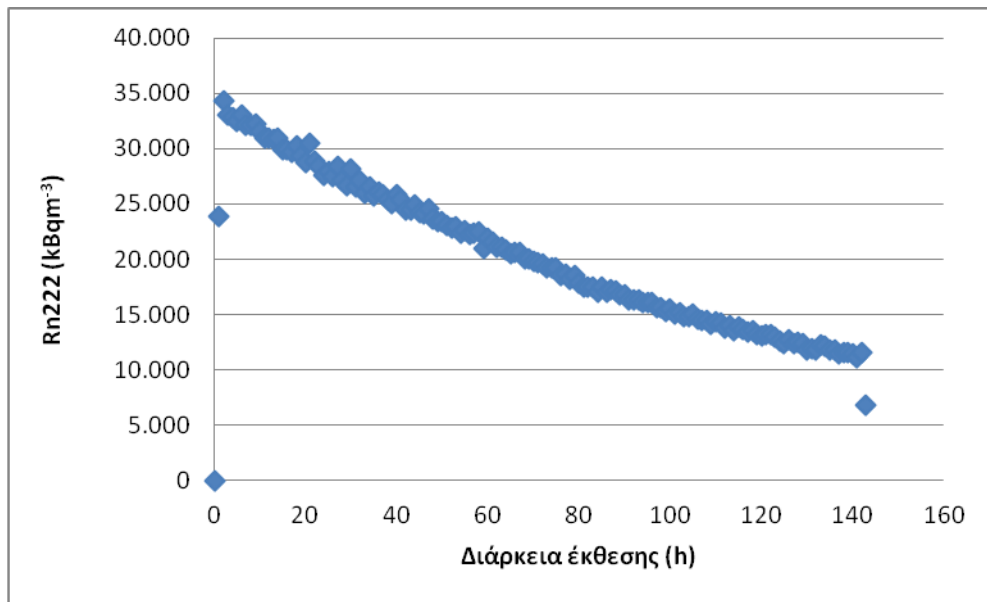
Τα προαναφερθέντα μεγέθη υπολογίστηκαν για κάθε πειράματα βαθμονόμησης που πραγματοποιήσαμε και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 5.2**).

Πείραμα	Χρόνος ανάπτυξης Ραδονίου (h)	Αρχική συγκέντρωση (kBq·m ⁻³)	Χρόνος Έκθεσης (h)	Μέση συγκέντρωση (kBq·m ⁻³)	Συνολική Έκθεση (kBq·h·m ⁻³)
1	90,27	15,962	71,4	12,335	880,7
2	1,1	0,267	118,9	0,176	38
3	503,75	31,555	144,75	19,182	2776,5
4	20,08	4,546	146,92	2,745	403,3

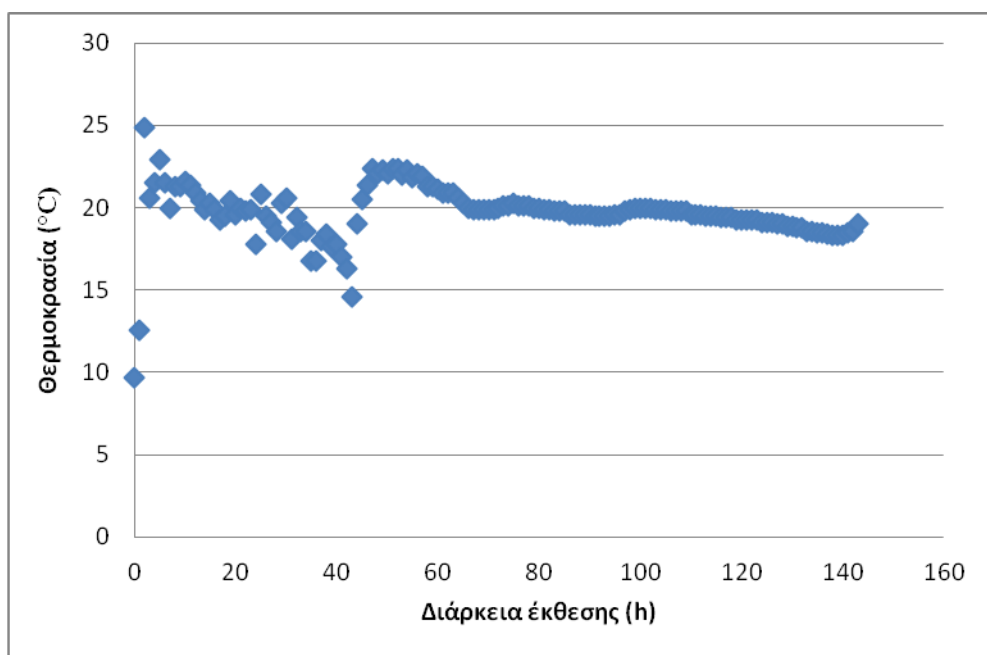
Πίνακας 5.2: Δεδομένα των πειραμάτων βαθμονόμησης

Μετά την ολοκλήρωση κάθε πειράματος, συλλέγαμε τα δεδομένα της συγκέντρωσης Ραδονίου και τις τιμές της θερμοκρασίας και της υγρασίας που είχε καταγράψει ο ανιχνευτής AlphaGUARD. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται ενδεικτικά τα δεδομένα του τέταρτου πειράματος και πιο συγκεκριμένα η συγκέντρωση Ραδονίου (**Σχήμα 5.8**), η θερμοκρασία (**Σχήμα 5.9**) και η υγρασία (**Σχήμα 5.10**) που επικρατούσε μέσα στο θάλαμο.

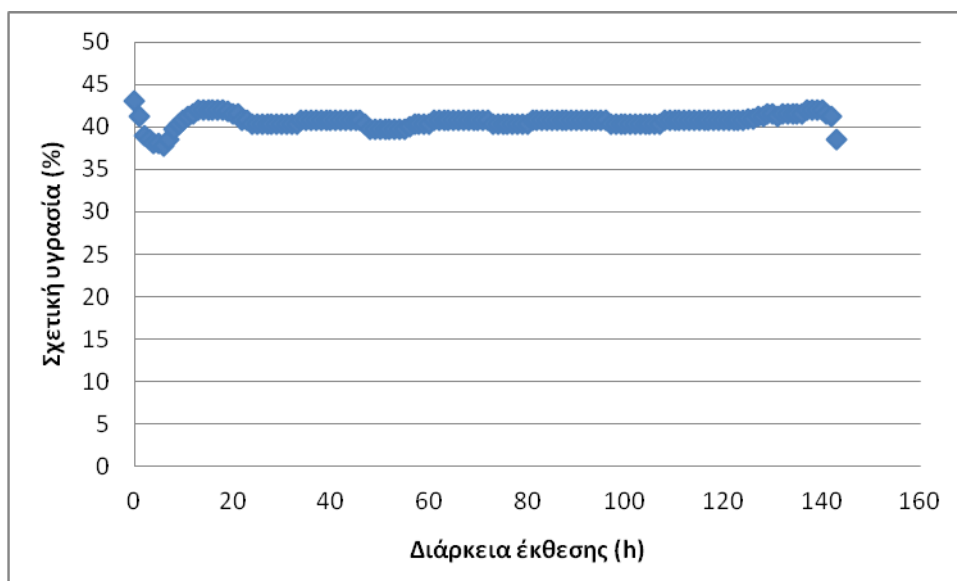
Διαπιστώσαμε ότι τα μεγέθη της θερμοκρασίας και της υγρασίας διατηρούνται σχετικά σταθερά κατά τη διάρκεια της έκθεσης μέσα στο θάλαμο Ραδονίου. Μελετώντας με τον ίδιο τρόπο τις συνθήκες του θαλάμου σε όλα τα πειράματα βαθμονόμησης που πραγματοποιήσαμε, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η θερμοκρασία και η υγρασία κινήθηκαν σε φυσιολογικά για εσωτερικό χώρο επίπεδα, γι' αυτό και θεωρήσαμε ότι στα πλαίσια της εργασίας δεν επηρεάστηκε η απόδοση των ανιχνευτών από τις παραμέτρους αυτές.



Σχήμα 5.8: Συγκέντρωση Ραδονίου ^{4^ο} πειράματος όπως μετρήθηκε από το A/G



Σχήμα 5.9: Θερμοκρασία θαλάμου ^{4^ο} πειράματος όπως μετρήθηκε από το A/G



Σχήμα 5.10: Σχετική υγρασία θαλάμου 4^{ου} πειράματος όπως μετρήθηκε από το A/G

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα που συλλέξαμε, με τη βοήθεια του φορητού μετρητή AlphaGUARD, μετά από κάθε προγραμματισμένη έκθεση των ανιχνευτών μας (**Πίνακες 5.3-5.6**).

Στοιχεία 1^{ου} Πειράματος βαθμονόμησης	
Ημερομηνία έναρξης έκθεσης	31-01-11
Ημερομηνία λήξης έκθεσης	03-02-11
Μέση συγκέντρωση θαλάμου (Bqm ⁻³)	13080
Συνολική μετρηθείσα έκθεση (kBq·h m ⁻³)	934
Θερμοκρασία θαλάμου (°C)	20,4
Υγρασία θαλάμου (%)	36,5
A/A Δοσίμετρου CR-39	2441, 2442, 2443, 2444, 2445
Αρχείο Οργάνου	110203A1

Πίνακας 5.3: Στοιχεία 1^{ου} Πειράματος βαθμονόμησης

Στο πρώτο πείραμα βαθμονόμησης εκτέθηκαν σε Ραδόνιο τα δοσίμετρα 2441, 2442, 2443, 2444 και 2445. Η μέση θερμοκρασία κυμάνθηκε σε φυσιολογικά επίπεδα (20,4°C) και η υγρασία του θαλάμου μετρήθηκε ίση με 36%. Η μέση συγκέντρωση που καταγράφηκε στο θάλαμο ήταν ίση με 13080 Bqm⁻³ και η συνολική έκθεση ανήλθε στα 934 kBq·h m⁻³. Η τιμή αυτή είναι συγκρίσιμη με τα επιτρεπτά όρια Ραδονίου σε εργασιακούς χώρους σύμφωνα με την ΕΕ για τα οποία η μηνιαία έκθεση είναι 720 kBq·h m⁻³.

Στοιχεία 2 ^ο Πειράματος	
Ημερομηνία έναρξης έκθεσης	09-02-11
Ημερομηνία λήξης έκθεσης	14-02-11
Μέση συγκέντρωση θαλάμου (Bqm ⁻³)	576
Συνολική μετρηθείσα έκθεση (kBq·h m ⁻³)	68
Θερμοκρασία θαλάμου (°C)	21,3
Υγρασία θαλάμου (%)	35,5
A/A Δοσίμετρου CR-39	2457, 2458, 2459, 2460, 2461
Αρχείο Οργάνου	110214A1

Πίνακας 5.4: Στοιχεία 2^ο Πειράματος βαθμονόμησης

Στο δεύτερο πείραμα βαθμονόμησης εκτέθηκαν σε Ραδόνιο τα δοσίμετρα 2457, 2458, 2459, 2460 και 2461. Η μέση θερμοκρασία κυμάνθηκε σε φυσιολογικά επίπεδα (21,3°C) και η υγρασία του θαλάμου μετρήθηκε ίση με 35,5%. Η μέση συγκέντρωση που καταγράφηκε στο θάλαμο ήταν ίση με 576 Bqm⁻³ και η συνολική μετρηθείσα έκθεση ανήλθε στα 68 kBq·h m⁻³. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε φυσιολογικά για εσωτερικούς χώρους επίπεδα Ραδονίου. Σημειώνουμε ότι η μετρηθείσα έκθεση παρουσιάζει σημαντική απόκλιση σε σχέση με τη θεωρητικά αναμενόμενη βάση του χρόνου ανάπτυξης και έκθεσης. Η απόκλιση αυτή πιθανώς οφείλεται σε σφάλμα χειρισμού κατά την ανάπτυξη Ραδονίου δεδομένης και της πολύ μικρής διάρκειας έκθεσης.

Στοιχεία 3 ^ο Πειράματος	
Ημερομηνία έναρξης έκθεσης	02-03-11
Ημερομηνία λήξης έκθεσης	08-03-11
Μέση συγκέντρωση θαλάμου (Bqm ⁻³)	20212
Συνολική μετρηθείσα έκθεση (kBq·h m ⁻³)	2926
Θερμοκρασία θαλάμου (°C)	19,7
Υγρασία θαλάμου (%)	40,6
A/A Δοσίμετρου CR-39	2462, 2463, 2464, 2465, 2466
Αρχείο Οργάνου	110308A1

Πίνακας 5.5: Στοιχεία 3^ο Πειράματος βαθμονόμησης

Στο τρίτο πείραμα βαθμονόμησης εκτέθηκαν σε Ραδόνιο τα δοσίμετρα 2462, 2463, 2464, 2465 και 2466. Η μέση θερμοκρασία κυμάνθηκε σε φυσιολογικά επίπεδα

(19,7°C) και η υγρασία του θαλάμου μετρήθηκε ίση με 40,6%. Η μέση συγκέντρωση που καταγράφηκε στο θάλαμο ήταν ίση με 20212 Bqm⁻³ και η συνολική έκθεση ανήλθε στα 2926 kBq·h m⁻³. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στα μέγιστα επιτρεπτά όρια Ραδονίου σε εργασιακούς χώρους σύμφωνα με την ΕΕ.

Στοιχεία 4^ο Πειράματος	
Ημερομηνία έναρξης έκθεσης	24-03-11
Ημερομηνία λήξης έκθεσης	30-03-11
Μέση συγκέντρωση θαλάμου (Bqm ⁻³)	3218
Συνολική μετρηθείσα έκθεση (kBq·h m ⁻³)	473
Θερμοκρασία θαλάμου (°C)	21,4
Υγρασία θαλάμου (%)	34,9
A/A Δοσίμετρου CR-39	2467, 2468, 2469, 2470, 2471
Αρχείο Οργάνου	110404A1

Πίνακας 5.6: Στοιχεία 4^ο Πειράματος βαθμονόμησης

Στο τέταρτο και τελευταίο πείραμα βαθμονόμησης εκτέθηκαν σε Ραδόνιο τα δοσίμετρα 2467, 2468, 2469, 2470 και 2471. Η μέση θερμοκρασία κυμάνθηκε σε φυσιολογικά επίπεδα (21,4°C) και η υγρασία του θαλάμου μετρήθηκε ίση με 34,9%. Η μέση συγκέντρωση που καταγράφηκε στο θάλαμο ήταν ίση με 3218 Bqm⁻³ και η συνολική έκθεση ανήλθε στα 473 kBq·h m⁻³. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στα ανώτερα επιτρεπτά όρια Ραδονίου σε παλιές κατοικίες σύμφωνα με την ΕΕ.

Μελετώντας τους παραπάνω πίνακες βλέπουμε ότι εμφανίζεται απόκλιση μεταξύ της συνολικής έκθεσης όπως αυτή υπολογίστηκε θεωρητικά και της συνολικής έκθεσης που μετρήθηκε από το AlphaGUARD. Το σημείο που αντιστοιχεί στο 2ο πείραμα έχει ήδη σχολιαστεί. Για τα υπόλοιπα σημεία παρατηρούμε ότι εμφανίζεται απόκλιση της τάξης του 10%. Η απόκλιση αυτή μεταξύ του οργάνου και του πιστοποιητικού βαθμονόμησης της πηγής είναι γνωστή από προηγούμενες έρευνες (Καράγγελος, 2008).

5.6 Ανάγνωση των ιχνών

Μετά από κάθε προγραμματισμένη έκθεση συλλέγαμε τους ανιχνευτές για να τους υποβάλουμε στη διαδικασία της χημικής χάραξης. Στη συνέχεια μετρούσαμε τα καταγεγραμμένα ίχνη ακολουθώντας τη μεθοδολογία καταμέτρησης των ιχνών, όπως

αυτή παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.3, με τη βοήθεια του μικροσκοπίου. Παρακάτω παραθέτουμε τα αποτελέσματα της καταμέτρησης των ιχνών των ανιχνευτών που εκτέθηκαν στις διάφορες συγκεντρώσεις Ραδονίου (Πίνακες 5.7-5.10).

Κωδικός Αριθμός Ανιχνευτή	Πλήθος Ιχνών (tracks)	Πυκνότητα Ιχνών (tracks cm ⁻²)
2441	820	1581,5
2442	875	1687,6
2443	909	1753,1
2444	839	1618,1
2445	774	1492,8
Μέση Τιμή	843,4	1626,6
Τυπική Απόκλιση	51,7	99,7

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα καταμέτρησης ιχνών 1^{οο} πειράματος

Στο πρώτο πείραμα βαθμονόμησης που η καταγεγραμμένη μέση συγκέντρωση ήταν 13080 Bq·m⁻³ η μέση τιμή της πυκνότητας των ιχνών υπολογίστηκε ίση με 1626,6±99,7. Παρατηρούμε ότι η πυκνότητα των ιχνών που μετρήθηκε είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πυκνότητα ιχνών του υποβάθρου που είναι ίση με 32±10.

Κωδικός Αριθμός Ανιχνευτή	Πλήθος Ιχνών (tracks)	Πυκνότητα Ιχνών (tracks cm ⁻²)
2457	62	119,6
2458	73	140,8
2459	98	189,0
2460	70	135,0
2461	72	138,9
Μέση Τιμή	75	144,7
Τυπική Απόκλιση	14	26,2

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα καταμέτρησης ιχνών 2^{οο} πειράματος

Στο δεύτερο πείραμα βαθμονόμησης που η καταγεγραμμένη μέση συγκέντρωση ήταν 576 Bq·m⁻³ η μέση τιμή της πυκνότητας των ιχνών υπολογίστηκε ίση με 144,7±26,2.

Παρόλο που η συγκέντρωση Ραδονίου στο πείραμα αυτό ήταν χαμηλή, παρατηρούμε ότι η πυκνότητα των ιχνών που μετρήθηκε είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πυκνότητα ιχνών του υποβάθρου που είναι ίση με 32 ± 10 .

Κωδικός Αριθμός Ανιχνευτή	Πλήθος Ιχνών (tracks)	Πυκνότητα Ιχνών (tracks cm ⁻²)
2462	2703	5213,1
2463	2501	4823,5
2464	2810	5419,5
2465	2705	5217,0
2466	2892	5577,6
Μέση Τιμή	2722,2	5250,1
Τυπική Απόκλιση	146,7	283,0

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα καταμέτρησης ιχνών ³⁰⁰ πειράματος

Στο τρίτο πείραμα βαθμονόμησης που η καταγεγραμμένη μέση συγκέντρωση ήταν $20212 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ η μέση τιμή της πυκνότητας των ιχνών υπολογίστηκε ίση με $5250,1 \pm 283,0$. Παρατηρούμε ότι η πυκνότητα των ιχνών που μετρήθηκε είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πυκνότητα ιχνών του υποβάθρου που είναι ίση με 32 ± 10 .

Κωδικός Αριθμός Ανιχνευτή	Πλήθος Ιχνών (tracks)	Πυκνότητα Ιχνών (tracks cm ⁻²)
2467	563	1085,8
2468	524	1010,6
2469	504	972,0
2470	541	1043,4
2471	465	896,8
Μέση Τιμή	519,4	1001,7
Τυπική Απόκλιση	37,4	72,1

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα καταμέτρησης ιχνών ⁴⁰⁰ πειράματος

Στο τέταρτο και τελευταίο πείραμα βαθμονόμησης που η καταγεγραμμένη μέση συγκέντρωση ήταν $3218 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ η μέση τιμή της πυκνότητας των ιχνών υπολογίστηκε ίση με $1001,7 \pm 72,1$. Παρατηρούμε ότι η πυκνότητα των ιχνών που

μετρήθηκε είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πυκνότητα ιχνών του υποβάθρου που είναι ίση με 32 ± 10 .

5.7 Καμπύλη βαθμονόμησης

Όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, η καμπύλη βαθμονόμησης συσχετίζει την πυκνότητα ιχνών που καταγράφονται στην επιφάνειά των ανιχνευτών με τη συνολική έκθεσή τους στο Ραδόνιο του θαλάμου. Στην παράγραφο 5.7.1 περιγράφουμε τη διαδικασία που ακολουθήσαμε προκειμένου να κατασκευάσουμε την καμπύλη αυτή. Αποφασίσαμε ωστόσο να φτιάξουμε δύο καμπύλες βαθμονόμησης, λόγω των διαφορών που παρατηρήθηκαν με βάση τους θεωρητικούς υπολογισμούς της συγκέντρωσης της πηγής και με βάση τις πειραματικές συγκεντρώσεις του Ραδονίου, έτσι όπως αυτές καταγράφηκαν από το φορητό μετρητή AlphaGUARD.

5.7.1 Κατασκευή καμπύλης βαθμονόμησης

Από τη συσχέτιση της συνολικής έκθεσης των ανιχνευτών στο Ραδόνιο με την πυκνότητα ιχνών που καταγράφονται στην επιφάνειά τους προκύπτει ο συντελεστής βαθμονόμησης f . Πιο συγκεκριμένα ισχύει ότι:

$$D = f \cdot E$$

όπου:

D η πυκνότητα των ιχνών (tracks cm^{-2})

f ο συντελεστής βαθμονόμησης

E η συνολική έκθεση των ανιχνευτών ($\text{kBq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)

Στον πίνακα που ακολουθεί (**Πίνακας 5.11**) παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα με βάση τις μετρήσεις της έκθεσης του AlphaGUARD και με βάση την έκθεση της πηγής. Επίσης παρουσιάζεται η καθαρή πυκνότητα ιχνών D_i που έχουν καταγραφεί από τους ανιχνευτές, δηλαδή η πυκνότητα από την οποία έχει αφαιρεθεί το υπόβαθρο που ισούται με 32 ± 10 (παράγραφος 4.4).

A/A i	Έκθεση A/G $E_{A/Gi}$ (kBq·h·m ⁻³)	Έκθεση πηγής $E_{\pi i}$ (kBq·h·m ⁻³)	Καθαρή Πυκνότητα D_i (tracks·cm ⁻²)
1	934	881	1549,49
2	934	881	1655,56
3	934	881	1721,13
4	934	881	1586,13
5	934	881	1460,77
6	68	38	87,58
7	68	38	108,79
8	68	38	157,01
9	68	38	103,00
10	68	38	106,86
11	2926	2745	5181,11
12	2926	2745	4791,53
13	2926	2745	5387,48
14	2926	2745	5184,97
15	2926	2745	5545,63
16	473	403	1053,82
17	473	403	978,61
18	473	403	940,03
19	473	403	1011,39
20	473	403	864,82
M.T	1100,250	1012,500	1973,79
T.A	1126,240223	1072,798971	2001,20

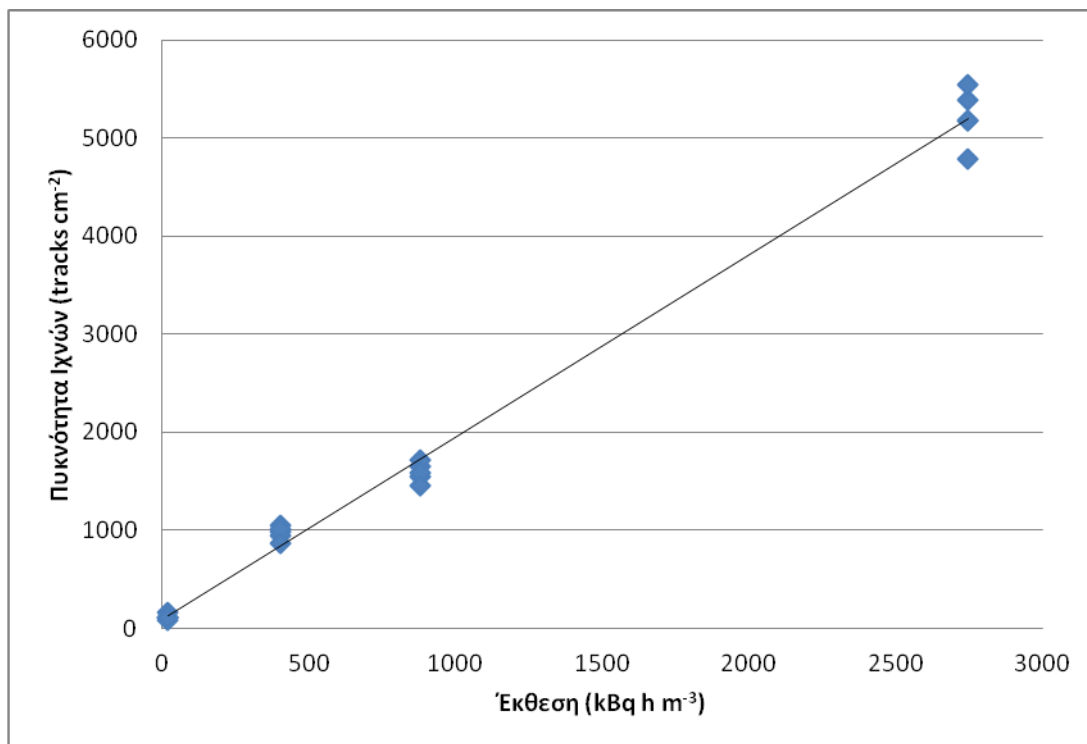
Πίνακας 5.11: Πειραματικά δεδομένα των πειραμάτων βαθμονόμησης

Εφαρμόσαμε τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων στα παραπάνω πειραματικά μας δεδομένα για να προσδιορίσουμε τους συντελεστές στην εξίσωση:

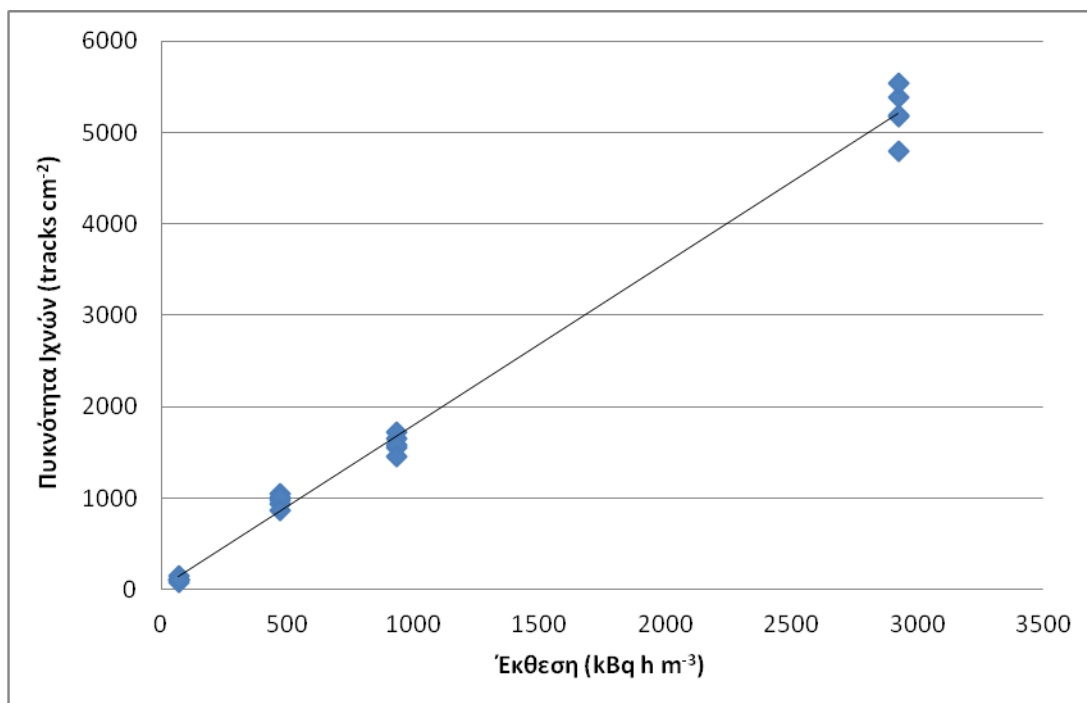
$$D = f \cdot E + D_0$$

Μετά από τους υπολογισμούς που κάναμε προέκυψαν οι συντελεστές βαθμονόμησης του μετρητή AlphaGUARD: $f_{A/G}=1,77\pm 0,03$ και της πηγής: $f_{\pi}=1,86\pm 0,04$. Επίσης προσδιορίστηκαν οι όροι $D_{0A/G}=25\pm 52$ και $D_{0\pi}=92\pm 55$. Με τα δεδομένα αυτά κατασκευάσαμε τις δύο καμπύλες βαθμονόμησης, η μία βάσει των θεωρητικών

συγκεντρώσεων (Σχήμα 5.11) και η άλλη βάση των πειραματικά προσδιορισμένων συγκεντρώσεων (Σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.11: Καμπύλη βαθμονόμησης βάσει των θεωρητικών συγκεντρώσεων της πηγής



Σχήμα 5.12: Καμπύλη βαθμονόμησης βάσει των πειραματικά προσδιορισμένων συγκεντρώσεων του A/G

Υπολογίσαμε για τις δύο ευθείες το συντελεστή πολλαπλού προσδιορισμού σύμφωνα με τον τύπο:

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$$

που παίρνει τιμές στο διάστημα 0-1 και είναι ένας δείκτης που προσδιορίζει πόσο καλά κείνται τα πειραματικά σημεία πάνω στη ευθεία αναδρομής. Μετά από κατάλληλους υπολογισμούς βρήκαμε ότι ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού είναι της πηγής είναι $R^2=0.9926$ και του AlphaGUARD είναι $R^2=0.9937$. Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού είναι σχεδόν ίσος με τη μονάδα που σημαίνει ότι τα σημεία μας βρίσκονται πολύ κοντά στην ευθεία, δηλαδή η προσαρμογή είναι καλή.

Άλλος ένας δείκτης που δείχνει ποσοτικά πόσο καλά προσαρμόζεται η ευθεία αναδρομής στα πειραματικά σημεία είναι η μέση τετραγωνική απόκλιση της αναδρομής που ορίζεται ως:

$$RMS = 100 \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i^2}}$$

Η τιμή RMS κυμαίνεται μεταξύ 0-100% και τείνει προς την τιμή 0% όσο πιο καλή είναι η προσαρμογή. Στην περίπτωση της πηγής το $RMS_{\pi}=16\%$ και στην περίπτωση του AlphaGUARD το $RMS_{AG}=17\%$. Βλέπουμε ότι η τιμή της μέσης τετραγωνικής απόκλισης είναι χαμηλή και στις δύο περιπτώσεις που σημαίνει ότι οι καμπύλες βαθμονόμησης προσαρμόζονται καλά στα πειραματικά μας σημεία.

Για να ελέγξουμε κατά πόσο ο σταθερός όρος D_0 στις δύο καμπύλες βαθμονόμησης είναι σημαντικός, πραγματοποιήσαμε κατάλληλο στατιστικό τεστ. Διατυπώσαμε τις υποθέσεις:

$$H_0: D_0=0$$

$$H_1: D_0 \neq 0$$

Το εκτιμώμενο τυπικό σφάλμα της τεταγμένης επί την αρχή D_0 , της ευθείας αναδρομής δίνεται από τη σχέση:

$$se(D_0) = s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{E^2}{\sum(E_i - \bar{E})^2}}$$

και βρήκαμε ότι για την πηγή $se(D_0)=55,0$ και για το AlphaGUARD $se(D_0)=51,8$.

Η τιμή συγκρίσεως δίνεται από τον τύπο:

$$t_0 = \frac{D_0}{se(D_0)}$$

και προκύπτει για τις δύο περιπτώσεις $t_{0A/G}=0.482$ και $t_{0π}=1.67$. Από πίνακες βρίσκουμε ότι η κρίσιμη τιμή της στοχαστικής μεταβλητής t , για $n-2=18$ βαθμούς ελευθερίας και δίπλευρο έλεγχο σε επίπεδο σημαντικότητας 95% είναι ίση με $t_{cr}=2.101$. Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις ισχύει $t_c > t_0$ και επομένως η υπόθεση H_0 γίνεται αποδεκτή.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, μπορούμε να υπολογίσουμε νέο συντελεστή βαθμονόμησης από τον τύπο:

$$f = \frac{\{D\}}{\{E\}}$$

Ο συντελεστής βαθμονόμησης σύμφωνα με τις μετρήσεις της πηγής υπολογίστηκε ίσος με $1,949 \pm 0,038 \text{ tracks} \cdot \text{cm}^{-2} / \text{kBqhm}^{-3}$ και του AlphaGUARD αντίστοιχα ίσος με $1,794 \pm 0,033 \text{ tracks} \cdot \text{cm}^{-2} / \text{kBqhm}^{-3}$. Παρατηρούμε ότι η απόκλιση μεταξύ των δύο συντελεστών είναι σημαντική σε σχέση με τις αβεβαιότητες που τους συνοδεύουν. Με τα δεδομένα που έχουμε στα χέρια μας δε μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ των δύο συντελεστών της πηγής και του AlphaGUARD γιατί δε μπορούμε να είμαστε σίγουροι ποιος από τους δύο είναι πιο αξιόπιστος. Θεωρούμε ότι η ασφαλής επιλογή είναι να κρατήσουμε τον πιο μικρό από αυτούς, δηλαδή του AlphaGUARD. Επιλέγοντας το συγκεκριμένο συντελεστή, το πιθανό λάθος που θα μπορούσε να προκύψει θα ήταν η υπερεκτίμηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου. Αυτό από άποψη δοσιμετρίας και εκτίμησης κινδύνου θεωρείται ότι βρίσκεται από την ασφαλή πλευρά.

Με τη βοήθεια του συντελεστή βαθμονόμησης f μπορούμε όπως είδαμε προηγούμενα να συσχετίσουμε την πυκνότητα των ιχνών με την συνολική έκθεση των ανιχνευτών. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό διότι έτσι μας δίνεται η δυνατότητα να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση σε ένα συγκεκριμένο πεδίο, εκθέτοντας τους ανιχνευτές για όσο χρονικό διάστημα επιλέξουμε. Γνωρίζοντας τη σχέση:

$$D = f \cdot E = f \cdot C \cdot \Delta T$$

όπου:

ΔT το χρονικό διάστημα έκθεσης στο πεδίο.

Μπορούμε να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση:

$$C = \frac{D}{f \cdot \Delta T}$$

Ολοκληρώνοντας τη διαδικασία βαθμονόμησης των ανιχνευτών CR-39 θεωρούμε ότι οι καμπύλες βαθμονόμησης που προέκυψαν από την πηγή και από το AlphaGUARD ήταν επιτυχείς. Πιο συγκεκριμένα μέσω των δεικτών R^2 και RMS φαίνεται ότι οι ευθείες έχουν καλή προσαρμογή. Σημειώνεται ότι οι συγκεντρώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στα παρόντα πειράματα βαθμονόμησης είναι κατά τι υψηλότερες από τις αναμενόμενες σε εσωτερικούς χώρους. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης δείχνουν ότι η συμπεριφορά των ανιχνευτών είναι γραμμική και ως εκ τούτου η καμπύλη βαθμονόμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Ακόμη, μετά από το στατιστικό τεστ που κάναμε, ο σταθερός όρος D_0 βρέθηκε στατιστικά μη σημαντικός, όπως ήταν αναμενόμενο άλλωστε. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι μέσω της βαθμονόμησης προέκυψε ένας αρκετά αξιόπιστος παράγοντας μετατροπής μεταξύ της πυκνότητας ιχνών και της συνολικής έκθεσης των ανιχνευτών, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περαιτέρω έρευνες.

Κεφάλαιο 6: Επίλογος

6.1 Συμπεράσματα

Μετά από επισταμένη βιβλιογραφική έρευνα για το ραδιενεργό αέριο Ραδόνιο και τους τρόπους που μπορούμε να το ανιχνεύσουμε στο περιβάλλον, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στους παθητικούς ανιχνευτές. Από το σύνολο των παθητικών ανιχνευτών, επιλέχθηκαν τελικά οι CR-39 οι οποίοι εμφανίζουν αυξημένη ευαισθησία στην καταγραφή σωματιδίων-α, είναι εύχρηστοι και φτηνοί. Προκειμένου να πραγματοποιήσουμε τη βαθμονόμηση των ανιχνευτών, που ήταν και ο κύριος σκοπός της εργασίας μας έπρεπε να διεξαχθούν με επιτυχία οι διαδικασίες της έκθεσης, της χημικής χάραξης και της καταμέτρησης των ιχνών. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων μας χρησιμοποιήσαμε το θάλαμο Ραδονίου του Ε.Π.Τ.-Ε.Μ.Π. και τον κατάλληλο πειραματικό εξοπλισμό που διαθέτει το εργαστήριο. Κατά τη διαδικασία της χημικής χάραξης ακολουθήσαμε τις οδηγίες του κατασκευαστή, δηλαδή βυθίζαμε τους ανιχνευτές σε διάλυμα 6.25N NaOH για μία ώρα. Για να το παρασκευάσουμε διαλύαμε 250g NaOH, τα οποία ζυγίζαμε σε αναλογικό ζυγό τύπου Mettler P-1200, σε 1L H₂O.

Για την καταμέτρηση των ιχνών χρησιμοποιήσαμε το μικροσκόπιο Bresser Researcher Trino και την ηλεκτρονική κάμερα MikroCam 3MP της εταιρείας Bresser που συνδέεται με οθόνη υπολογιστή. Με το λογισμικού MicroOcular 3.0 MP επεξεργαστήκαμε και αποθηκεύσαμε τις εικόνες που προβάλλονταν στην οθόνη του Η/Υ. Πραγματοποιήσαμε βαθμονόμηση του μικροσκοπίου, χρησιμοποιώντας ειδικό πλακίδιο βαθμονόμησης, το οποίο φέρει χαραγμένη κλίμακα ανά 0,01mm. Ο συντελεστής βαθμονόμησης για μεγέθυνση 40x και ανάλυση 2048x1536px που προέκυψε από τους υπολογισμούς μας ήταν $0,1950 \pm 0,016 \mu\text{m}/\text{pixel}$. Την καταμέτρηση των ιχνών την κάναμε χειροκίνητα, με το φακό x40 σε ανάλυση 640x480 pixel. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας των ιχνών κάναμε 10 οριζόντιες σαρώσεις καλύπτοντας επιφάνεια $\approx 0,5185\text{cm}^2$ της συνολικής επιφάνειας του ανιχνευτή, κάθε φορά.

Για την τυποποίηση μεθόδου αναγνώρισης των ιχνών εκθέσαμε σε ανοιχτή πηγή ²⁴¹Am-²³⁹Pu-²⁴⁴Cm έναν ανιχνευτή CR-39 για λίγα δευτερόλεπτα. Για τη μέτρηση του υπόβαθρου των ανιχνευτών πραγματοποιήσαμε πείραμα ελέγχου στο

οποίο προέκυψε ότι η τιμή του υποβάθρου ήταν 32 ± 10 (tracks·cm⁻²), δηλαδή μέσα στα αναμενόμενα όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία όρια. Ακόμη για να βεβαιωθούμε ότι η μέθοδός μας, όσον αφορά τα πειράματα βαθμονόμησης λειτουργεί σωστά, κάναμε ένα πείραμα έκθεσης σε Ραδόνιο με μέση συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο ίση με $2994 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$.

Αφού ολοκληρώσαμε τα πειράματα ελέγχου πραγματοποιήσαμε 4 πειράματα βαθμονόμησης των ανιχνευτών CR-39 και βγάλαμε δύο καμπύλες βαθμονόμησης μία για την πηγή και μία για το AlphaGUARD, μέσω των οποίων υπολογίσαμε τους αντίστοιχους συντελεστές. Ο συντελεστής βαθμονόμησης βάσει της πηγής υπολογίστηκε ίσος με $1,949 \pm 0,038 \text{ tracks} \cdot \text{cm}^{-2} / \text{kBqhm}^{-3}$ και βάσει του AlphaGUARD ίσος με $1,794 \pm 0,033 \text{ tracks} \cdot \text{cm}^{-2} / \text{kBqhm}^{-3}$. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης έδειξαν ότι η συμπεριφορά των ανιχνευτών είναι γραμμική στην περιοχή που εξετάσαμε και επομένως ο συντελεστής βαθμονόμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την έκθεση ανιχνευτών CR-39 σε εσωτερικούς χώρους.

6.2 Μελλοντικές Προοπτικές

Με την ολοκλήρωση της παρούσης ΔΕ, το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει μια βαθμονομημένη μέθοδο μέτρησης της συγκέντρωσης του Ραδονίου με χρήση παθητικών ανιχνευτών. Η μέθοδος αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί σε μελλοντικές έρευνες όπου η χρήση τέτοιων ανιχνευτών ενδείκνυται, όπως για παράδειγμα σε επισκοπήσεις ευρείας κλίμακας, όπου η χρήση ενεργητικών μεθόδων δεν είναι πρακτική.

Επιπλέον, στα πλαίσια της δικής μας εργασίας δεν ήταν δυνατόν να εξαντλήσουμε όλες τις πιθανές δυνατότητες για τις διαδικασίες της έκθεσης, της χημικής χάραξης, της αναγνώρισης και της καταμέτρησης των ιχνών. Για παράδειγμα, σε μια μελλοντική ΔΕ θα μπορούσε να διερευνηθούν διαφορετικές συνθήκες χημικής χάραξης με εναλλακτικές παραμέτρους και όχι αυτές του κατασκευαστή, δίνοντας διαφοροποιημένα αποτελέσματα. Επίσης η ανάπτυξη ημιαυτόματης ή αυτόματης μεθόδου καταμέτρησης των ιχνών, θα ήταν μια διαδικασία πιο ξεκούραστη για τον ερευνητή. Ενδιαφέρον θα ήταν ακόμη να εξεταστεί πώς επηρεάζεται ο συντελεστής βαθμονόμησης από τις μεταβολές της υγρασίας και της θερμοκρασίας του θαλάμου καθώς εμείς στην έρευνα μας θεωρήσαμε ότι παραμένουν σταθερές.

Προτείνεται επίσης η περαιτέρω διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των CR-39 με τα νετρόνια, τα οποία, όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία, δεν ιονίζουν κατά τη διέλευσή τους το υλικό του ανιχνευτή αλλά μέσω ενός διαφορετικού μηχανισμού παράγουν ίχνη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

- Swedish Radiation Protection Authority (2006). *Πληροφορίες ακτινοπροστασίας σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος*. Raddnings Verket. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό τόπο: http://www.lst.se/NR/rdonlyres/E37577E3-8A63-4D59-A5F2-858291A257C5/0/Grundfakta_Beredskap_EL_0710_72dpi.pdf
- Αντωνόπουλος-Ντόμης, Μ. (2004). *Ραδιενέργεια σε απλά ελληνικά*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης- Ε.ΚΕ.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ».
- Βογιάννης, Ε. (2005). *Το Ραδόνιο στα Ιαματικά Λουτρά*. Διδακτορική Διατριβή. Μυτιλήνη: Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σχολή Περιβάλλοντος.
- Δημούδη, Α.(2006). *Οικολογικά δομικά υλικά*. Ξάνθη: Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Περιβαλλοντικού και Ανθρωπογενούς Σχεδιασμού. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό τόπο: <http://repository.edulll.gr/edulll/retrieve/4367/1262.pdf>
- Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας – Τμήμα Τεκμηρίωσης. (2009). *Κοσμική Ακτινοβολία- Ακτινοβολία εδάφους*. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό τόπο: http://www.eeae.gr/gr/index.php?fvar=html/president/_info_natural_outside
- Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας – Τμήμα Τεκμηρίωσης. (2009). *Μετρήσεις Ραδονίου*. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό τόπο: http://www.eeae.gr/gr/index.php?fvar=html/president/_info_radon
- Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΚΠΣ 2000-2006). *Έλεγχος Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος*. Υπουργείο Ανάπτυξης- Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργεια. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό τόπο: <http://www.eeae.gr/gr/docs/president/RADIENERGIA%20final.pdf>
- Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας. (2005). *Ραδόνιο*. Αθήνα: Υπουργείο Ανάπτυξης.
- Ηλιάδης, Χ. (2003). *Μελέτη εγκεφαλικής αιμάτωσης με 99m TC-ECD της υπαραχνοειδούς αιμορραγίας με spect*. Διδακτορική Διατριβή. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πάτρας, Σχολή Επιστημών Υγείας, Ιατρικό Τμήμα.
- Ιωαννίδης,Κ. (1992). *Οι επιπτώσεις του ραδονίου στη δημόσια υγεία*. *Ελληνική Ιατρική*, 58, 4: 213-226.

- Καράγγελος, Δ. (2006). *Ραδιοπεριβαλλοντική και συνακόλουθες εφαρμογές*. Διδακτορική Διατριβή. Ε.Μ.Π. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Λουΐζη, Α. & Νικολόπουλος, Δ. (1998). Κίνδυνοι υγείας από το Ραδόνιο. *ΙΑΤΡΙΚΗ*, 73(4), 341-345, *Επίκαιρο θέμα*.
- Μαρινάκης, Γ. (2007). *Βαθμονόμηση δοχείων με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους*. Διπλωματική εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μητρόπουλος, Π., Notsu, K., Δελήμπασης, Ν. & Κακαβάς, Ν., (2001). *Μεταβολές της συγκέντρωσης Ραδονίου σε υπόγεια νερά πριν από όλες τις σεισμικές δονήσεις ($M \geq 2.5$), από τον Σεπτέμβριο 1998 έως τον Ιανουάριο 1999, στην περιοχή του ρήγματος της Αταλάντης*. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 34/4, 1433-1439.
- Μητρόπουλος, Π., Notsu, K., Δελήμπασης, Ν., Κακαβάς, Ν. & Βουδούρης, Π. (2004). Πρόγνωση σεισμικών δονήσεων στην περιοχή της Βόρειας Εύβοιας με βάση τις μεταβολές της περιεκτικότητας του Ραδονίου στα υπόγεια νερά. Στο *Πρακτικά 10^{ov} Διεθνούς Συνεδρίου*-Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας. Θεσσαλονίκη: Πανεπιστήμιο Αθηνών, University of Tokyo.
- Νικολόπουλος Δ., Πετρόπουλος Ν., Ποτηριάδης Κ. (1997). *Μελέτη σκοπιμότητας διενέργειας εθνικής επισκόπησης ραδονίου στην Ελλάδα*. Αθήνα: ΕΕΑΕ.
- Νικολόπουλος, Δ. (2000). *Μελέτη της Έκθεσης του Ελληνικού Πληθυσμού στο Ραδόνιο-222*. Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Οικονομόπουλος Ε. (2008). *Μελέτη των περιβαλλοντικών συνθηκών έκλυσης του χημικού στοιχείου ^{222}Rn και η πιθανή συσχέτισή της με τη σεισμικότητα της περιοχής Μεγάρων*. Διδακτορική Διατριβή. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών-Τμήμα Θετικών Επιστημών.
- Οικονόμου, Α. (1989). «Θνητοί» πυρήνες και ραδιενέργεια. Στο *Εμείς και η Ραδιενέργεια* (επ. Α. Βεργανελάκης). Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.σ.σ. 49-73.
- Παπαδόπουλος, Α. (2011). *Φυσική ραδιενέργεια σε σχέση με την ορυκτολογία, γεωχημεία Ουρανίου και Θορίου μαγματικών πετρωμάτων από τον Ελλαδικό χώρο: συμβολή στη χρήση φυσικών δομικών υλικών*. Διδακτορική Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ., Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας.

- Παπάζογλου, Ι. (1989). Πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος: Λειτουργία-Ασφάλεια & Ατυχήματα. Στο *Εμείς και η Ραδιενέργεια* (επ. Α. Βεργανελάκης). Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης. σ.σ. 177-233.
- Παπαστεφάνου, Κ. (2010). *Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
- Πασχαλίδης, Ι. (2008). *Βαθμονόμηση δοχείων με προσροφητικά υλικά για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου στην ατμόσφαιρα σε διάφορα επίπεδα σχετικής υγρασίας*. Διπλωματική Εργασία. Ε.Μ.Π. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.
- Πατήρης, Δ. (2009). *Μελέτη της συμπεριφοράς των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα*. Διδακτορική Διατριβή. Ιωάννινα: Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων- Τμήμα Φυσικής.
- Σιδέρης, Λ. (1989). Ιονίζουσες ακτινοβολίες και υγεία. Στο *Εμείς και η Ραδιενέργεια* (επ. Α. Βεργανελάκης). Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης σ.σ.119-150.
- Σιμόπουλος, Σ. Ε. (2006). Τεχνικά Χρονικά. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό τόπο: http://library.tee.gr/digital/techr/2006/techr_2006_5_emp.pdf
- Σιμόπουλος, Θ.(1989). Φυσικές και Τεχνητές Πηγές Ραδιενέργειας. Στο *Εμείς και η Ραδιενέργεια* (επ. Α. Βεργανελάκης). Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης. σ.σ. 151-175.
- Σιμόπουλος, Σ.Ε. (1989). *Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών*. (Β΄Έκδοση). Αθήνα: Αυτοέκδοση.
- Στούλος, Σ. (1998). *Το Ραδόνιο στις κατοικίες σαν συνάρτηση της ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών και άλλων φυσικών παραμέτρων*. Διδακτορική Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ.-Σχολή Θετικών Επιστημών- Τμήμα Φυσικής.
- Τσέρτος, Χ. (χχ). *Ανίχνευση και προσδιορισμός ενεργότητας ραδιοϊσοτόπων περιβάλλοντος*. Πανεπιστήμιο Κύπρου- Τμήμα Φυσικής. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό τόπο: http://www-np.ucy.ac.cy/nuclear/lectures/phy811/Phy811_07.pdf
- Υπουργείο Εργασίας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων. (2009). *Η ακτινοβολία στη ζωή μας*. Λευκωσία: ΥΕΚΑ-Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Alter. H. W. & Fleischer, R. L. (1981). Passive Integrating Radon Monitor for Environmental Monitoring. In *Health Physics* Vol. 40 (May). pp. 693-702. U.S.A.
- Amgarou Khalil (2002). *Long-Term Measurements of Indoor Radon and its Progeny in the Presence of Thoron Using Nuclear Track Detectors: A Novel Approach*. PhD Thesis, Universitat Autònoma de Barcelona Grup de Física de les Radiacions.
- Anagnostakis, M.J., Petropoulos, N.P., Hinis, E.P. & Simopoulos, S.E. (1996). "Radiological Impact of the Long-lived Chernobyl Fallout Isotopes in Greece". *Yugoslav Nuclear Society Conference (YUNSC '96)*. Belgrade, 7 – 9 October, 1996.
- Bonetti R., Capra L., Chiesa C., Guglielmetti A., Migliorino C. (1991). Energy response of LR-115 cellulose nitrate to alpha-particle beams. *Nuclear Tracks Radiation Measurements*, 18, pp. 321-324.
- Brogna A., Delfa S., Monaca V., Nigro S., Morelli D., Patane G., Tringali G. (2007). Measurements of indoor radon concentration on the south-eastern flank of Mount Etna volcano (Southern Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165, pp. 71–75.
- Durrani S.A. (2008). Nuclear tracks today: Strengths, weaknesses, challenges. *Radiation Measurements*, 43, pp. 27-33.
- Durrani, S.A. (1997). Alpha-Particle Etched Track Detectors. Στο S.A. Durrani & R. Ilic. *Radon Measurements by Etched track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*, pp. 77-101. Singapore: World Scientific.
- Enge W. (1995). On the question of nuclear track formation in plastic material. *Radiation Measurements*, 25, pp. 11-26.
- EPA.(1992). *Indoor radon and radon decay product measurement device protocol*. U.S. Environmental Protection Agency. Office of air and Radiation (6604J); 33786; EPA 402-R-92-004.
- Fleischer R. L., Price P. B., Walker R. M. (1975). *Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications*. Berkeley: University of California Press.

- Fleischer R. L., Price P. B., Walker R. M., Hubbard E. L. (1964). Track Registration in Various Solid-State Nuclear Track Detectors, *Physical Review*, 133, pp. 1443-1449.
- Fleischer R., L.(1988). Radon in the environment - Opportunities and hazards; *Nuclear Tracks Radiation Measurements*. Vol. 14. No. 4. pp. 421-435. New York: General Electric Research and Development Center, Schenectady.
- Folke, K. (γγ). *Des Moines Radon Testing Experts Warn Iowa Residents of Danger Lurking in 7 out of 10 Homes*. AmeriServ Radon Mitigation of Iowa. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό τόπο:
http://www.emailwire.com/press_releases_by_msa/2120/Des_Moines_IA/
- Font, Ll. & Baixeras, C (2003) The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors. *The science of the total environment*; 307; 55-69.
- Genitron (1998). *User Manual Portable Radon Monitor "AlphaGUARD"*.
- Gervino G., Bonetti R., Cigolini C., Marino C., Prati P., Pruiti L. (2004) Environmental radon monitoring: comparing drawbacks and performances of charcoal canisters, alpha-track and E-PERM detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 518, pp. 452–455.
- Hadler, J. C. , Junes, P. J., Osorio, A. M. & Paulo, S. R.(1991). Relationship between track size and energy for alpha particles in CR-39. In *Nuclear Tracks Radiation Measurements*, 19, pp. 313-317.
- Hepburn C., Windle A.H. (1980). Review Solid State Nuclear Track Detectors. *Journal of Materials Science*, 15, pp. 279-301.
- Hnatowicz, V. (2003). Role of scission and cross-linking in latent track formation in polymers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 209, pp. 145–148.
- IAEA & International Labour Office (2003). *Safety Reports Series (No 33). Radiation Protection against Radon in workplaces other than mines*. Vienna: IAEA & International Labour Office. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό τόπο:
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1168_web.pdf
- Ilic, R. & Sutej, T. (1997). Radon Monitoring Devices Based on Etched Track Detectors. Στο S.A. Durrani & R. Ilic. *Radon Measurements by Etched track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*, pp. 104-128. Singapore: World Scientific.

- International Commission on Radiological Protection (ICRP). (1994). *Protection against radon ²²²Rn at home and at work*. Annals of the ICRP 65, Pergamon Press.
- Kada, W., Dwaikat, N., Sueyasu, M., Datemichi, S., Sato, I., Murata, I., Kato, Y. & Iida, T. (2011). Development of a Grab-sampling type multitubular proportional counter for measurement of Radon concentration in atmosphere. *Progress in Nuclear science and technology*, vol. 1, p.p. 396-399. Japan: Graduate school of Engineering, Osaka University.
- Kalsi P.C., Ramaswami A., Manchanda V.K. (2005). Solid State Nuclear Track Detectors and their applications. *Radiochemistry Division*. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό τόπο: <http://www.barc.ernet.in/publications/nl/2005/200506-2.pdf>
- Karangelos, D.J., Petropoulos, N. P., Anagnostakis, M.J., Hinis E.P. & S.E. Simopoulos. (2002). Data Leading to the Investigation of a Relation Between Seismic Activity and Radon Daughters Concentration Outdoors. NRE VII, International Symposium. Rhodes, 20-24 May, 2002.
- Kendall, G.M. & Smith T.J. (2002). *Doses to organs and tissues from radon and its decay products*. Journal of Radiological Protection Vol.22 no 4.
- Khalil N., Misdaq M.A., Berrazzouk S. & Mania J. (2002). *Characterization of the Oum Er Rbia (Morocco) high basin karstic water sources by using solid state nuclear track detectors and radon as a natural tracer*; Applied Radiation and Isotopes; 56; 985-990. Morocco: Laboratory of Hydrogeology, Faculty of Sciences Semlalia, University Cadi Ayyad, Marrakech.
- Khan H.A. & Durrani S.A. (1972). Efficiency calibration of Solid State Nuclear Track Detectors. *Nuclear Instruments and Methods*, 98, pp. 229-236.
- Los Alamos National Laboratory; CRC. (χχ). Periodic table of the elements – Radon. In *Handbook of Chemistry and Physics*; American Chemical Society.
- Louizi, A., Proukakis, C., Petropoulos, N.P., Anagnostakis, M.J., Simopoulos, S.E. and Angelopoulos, M.G.(1994). "Measurements of Natural Radioactivity in Greek Building Materials". *1st Mediterranean Congress on Radiation Protection*. Athens, Greece, 5 – 7 April, 1994.
- Manousakas M., Fouskas A., Papaefthymiou H., Koukouliou V., Siavalas G., Kritidis P. (2010). Indoor radon measurements in a Greek city located in the vicinity of lignite-fired power plants. *Radiation Measurements*, 45, pp. 1060-1067.

- Manousakas M., Fouskas A., Papaefthymiou H., Koukouliou V., Siavalas G., Kritidis P. (2010). Indoor radon measurements in a Greek city located in the vicinity of lignite-fired power plants. *Radiation Measurements*, 45, pp. 1060-1067.
- Miles, J.C.H. (1997). Calibration and Standardisation of Etched Track Detectors. Στο S.A. Durrani & R. Ilic. *Radon Measurements by Etched track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*, pp. 143-154. Singapore: World Scientific.
- Monnin M.M. & Seidel J.L. (1997). Radon Measurement Techniques. Στο S.A. Durrani & R. Ilic. *Radon Measurements by Etched track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment* (pp. 51-74). Singapore: World Scientific.
- Nazaroff, W.W. & Nero, A.V. (1988). *Radon and its decay products in indoor air*. New York: John Wiley & Sons.
- Nikezic, D., Yu, K.N. (2004). Formation and growth of tracks in nuclear track materials. *Materials Science and Engineering*, 46, pp. 51–123.
- Papastefanou C. (2002). An overview of instrumentantion for measuring radon in soil gas and groundwaters. *Journal of Environmental Radioactivity*, 63, pp. 271–283.
- Petropoulos, N.P., Hinis, E.P. & Simopoulos, S.E. (1996). "137Cs Chernobyl Fallout in Greece and its Associated Radiological Impact". *Environment International*, 22(S1):S369 - S373.
- Polpong, P. & Bovornkitti, S. (1998). *Indoor Radon*. J. Med. Assoc. Thai. 81(1):47-57.
- Pugliesi F., Sciani V., Stanojev Pereira M.A., Pugliesi R. (2007). Digital System to Characterize Solid State Nuclear Track Detectors. *Brazilian Journal of Physics*, 37, pp. 446-449.
- Richard, H.M., Gesell, T. F., Hess, C. T., Weiffenbach, C. V. & Nygerg, P. (2003). *Associations between grab sample and intergrated radon measyrements in dwellings in Maine and Texas*. USA: Radiological and Environmental sciences laboratory, US Department of Energy.
- Rogers, V.C., Neilson K.K. & Holt, R.B. (1995). *Radon diffusion coefficients for aged residential concretes*. Health Phys, 68 pp. 833-834.
- Segovia N., Mena, M., Seidel, S.L., Monnin, M., Tamez, E. & Pena, P. (1995) *Short and long term radon in soil monitoring for geophysical purposes; Radiation*

- Measurements*; Vol.25, No. 1-4; pp. 547-552. Great Britain: Elsevier Science Ltd.
- Segovia, N. et al.(1997) *Radon in soil variations related to volcanic activity: Radiation Measurements*. Vol.28. No. 1-6. pp.745-750.
- Sher Gul (2008). *Heavy ions interactions studies using Solid State Nuclear Track Detectors*. PhD Thesis, Department of Physics, University of the Punjab in Lahore, Pakistan.
- Singh, M., Singh, N.P., Singh, S., Virk, H.S. (1986). Calibration of Radon Detectors. *Nuclear Tracks*, 12, pp.739-742.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2000). Sources and effects of ionizing radiation. Vol. I: Sources, United Nations Publications, New York: UNSCEAR Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό τόπο: www.unscear.org/2000/vol1.htm
- UNSCEAR (1988). *Report to the general assembly, with annexes*. UN (ed.). New York: UNSCEAR. E.88.IX.7
- UNSCEAR (1993). *Sources and effects of Ionizing Radiation*, United Nations, ed. New York: UNSCEAR E. 94.IX2.
- UNSCEAR (2008). *Sources and effects of Ionizing Radiation: Report to the General Assembly with Scientific Annexes*. United Nations, ed.(2010). New York: U.N. Publications E. 10. XI.3
- Wattananikorn K., Kanaree M. & Wiboolsake S. (1998). *Soil gas as an earthquake precursor: Some considerations on data improvement; Radiation Measurements*; Vol.29, No.6; pp. 593-598. Elsevier Science Publisher.
- WHO (2009). *Handbook on indoor radon: a public health perspective*. World Health Organization
- Yu, K.N. (1993). *The effects of typical covering materials on radon exhalation rate from concrete surfaces*. Radiat. Prot. Dosim, 59 p.p. 135-140.

Διαδικτυακοί τόποι

http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo542e/ma8hmata/flash/upb_greek_3.html

<http://omega.physics.uoi.gr/radon/Greek/radon.pdf>

<http://www.healthview.gr>

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/>

<http://users.sch.gr/tsinasp/portal/uploads/To%20radonio%20sti%20zoi%20mas.pdf>

http://www.eeae.gr/gr/index.php?fvar=html/president/_info_natural_inside

<http://library.tedankara.k12.tr/chemistry/vol1/nucchem/trans90.htm>

<http://www.emailwire.com/release/61042-Des-Moines-Radon-Testing-Experts-Warn-Iowa-Residents-of-Danger-Lurking-in-7-out-of-10-Homes.html>

http://www.eeae.gr/gr/index.php?fvar=html/president/_info_radon

<http://www.physics4u.gr/nuclear/radio1.html>

http://www-np.ucy.ac.cy/nuclear/lectures/phy811/Phy811_07.pdf

<http://www.chemist.gr/2011/04/5061/>

<http://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/18196#page/32/mode/1up>

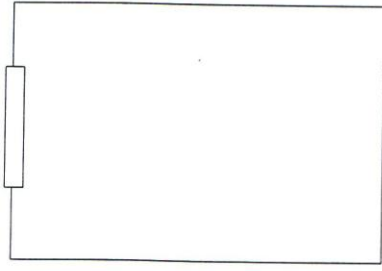
<http://users.uoa.gr/~jalexopoulos/radioactivity.pdf>

http://www.eeae.gr/gr/index.php?fvar=html/president/_info_natural_outside

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Φύλλα καταγραφής πειραμάτων έκθεσης CR-39

ΦΥΛΛΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ CR-39								
Α/Α ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ		1		ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΤΗΣ		Π. Κοντάκος		
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		01-12-10		ΗΜ/ΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		2/12/10		
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		11:14		ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		10:30		
ΘΑΛΑΜΟΣ	RC	ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (Bq/m ³)	2234	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	18	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	55	
ΟΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ			AlphaGuard		ΑΡΧΕΙΟ ΟΡΓΑΝΟΥ			101207A1
Α/Α ΔΟΣΙΜΕΤΡΟΥ CR-39	2431	2432	2433	2434	2435	2436		
ΗΜ/ΝΙΑ ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ETCHING	12:43	12:43	12:43	12:43	12:43			
ΑΡΙΘΜΟΣ a-tracks								
ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΕ Bq/m ³								
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ				ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ				
Etching eni 1h εως 95°C								

ΦΥΛΛΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ CR-39

Α/Α ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ		2		ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΤΗΣ		Α. ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΚΟΥ	
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		—		ΗΜ/ΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		—	
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		—		ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		—	
ΘΑΛΑΜΟΣ	—	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (Bq/m ³)	0	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	—	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	—
ΟΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ		—		ΑΡΧΕΙΟ ΟΡΓΑΝΟΥ		—	
Α/Α ΔΟΣΙΜΕΤΡΟΥ CR-39	2436	2437	2438	2439	2440	—	—
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ETCHING	7/1/11 13.24	7/1/11 13.24	7/1/11 13.24	7/1/11 13.24	7/1/11 13.24		
ΑΡΙΘΜΟΣ a-tracks							
ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΕ Bq/m ³							
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ				ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ			
<p>Για τέρμα Background</p>							

ΦΥΛΛΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ CR-39

Α/Α ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ		3		ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΤΗΣ		Τ. ΚΟΥΤΑΡΟΥ	
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		31/1/11		ΗΜ/ΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		03-02-11	
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		11.05		ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		02.05 11.55	
ΘΑΛΑΜΟΣ	RC	ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (Bq/m ³)	13080	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	20.4	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	36.5
ΟΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ		A/G		ΑΡΧΕΙΟ ΟΡΓΑΝΟΥ		110203A1	
Α/Α ΔΟΣΙΜΕΤΡΟΥ CR-39	2441	2442	2443	2444	2445		
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ETCHING	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00		
ΑΡΙΘΜΟΣ a-tracks							
ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΕ Bq/m ³							
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ				ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ			

ΦΥΛΛΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ CR-39

Α/Α ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ		4		ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΤΗΣ		Α. ΓΑΜΑΡΗΣ	
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		9/2/11		ΗΜ/ΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		14-02-11	
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		12:36		ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		11:30	
ΘΑΛΑΜΟΣ	RC	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (Bq/m ³)	576	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	21,3	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	35,5
ΟΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ		A/G		ΑΡΧΕΙΟ ΟΡΓΑΝΟΥ		110214A1	
Α/Α ΔΟΣΙΜΕΤΡΟΥ CR-39	2457	2458	2459	2460	2461		
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ETCHING	12:44	12:44	12:44	12:44	12:44		
ΑΡΙΘΜΟΣ a-tracks							
ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΕ Bq/m ³							
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ				ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ			
<p>Διηλεκτρώθηκε στα το πλακίτιο οπισθεν για το etching έχει κατανάλωση 2,5 μφ. υδροχλωρικού και υπήρξε έμφραση νερού στο διάλυμα της. Για το λόγο αυτό φτιάχτηκε νέο διάλυμα NaOH. απορρίφθηκε το παλιό</p>							

ΦΥΛΛΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ CR-39

Α/Α ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ		5		ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΤΗΣ		Π. Κουτάκου	
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		09-03-11		ΗΜ/ΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		09-03-11	
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		13:15		ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		12:00	
ΘΑΛΑΜΟΣ	RC	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (Bq/m ³)	20912	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	13,7	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	40,6
ΟΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ		A/G		ΑΡΧΕΙΟ ΟΡΓΑΝΟΥ		110308AL	
Α/Α ΔΟΣΙΜΕΤΡΟΥ CR-39	2462	2463	2464	2465	2466		
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ETCHING	12:05	12:05	12:05	12:05	12:05		
ΑΡΙΘΜΟΣ a-tracks							
ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΕ Bq/m ³							
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ				ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ			

ΦΥΛΛΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ CR-39							
Α/Α ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ		6		ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΤΗΣ		Κοντακού Π.	
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		24/3/11		ΗΜ/ΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		30/3/11	
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		12:29		ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ		17:30	
ΘΑΛΑΜΟΣ	RC	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (Bq/m ³)	3218	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	21,4	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	34,9
ΟΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ		A/G		ΑΡΧΕΙΟ ΟΡΓΑΝΟΥ		110404A1	
Α/Α ΔΟΣΙΜΕΤΡΟΥ CR-39	2467	2468	2469	2470	2471		
Ημερ/ν/ώρα ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ETCHING	4/4/11 12:35						
ΑΡΙΘΜΟΣ a-tracks							
ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΕ Bq/m ³							
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ				ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ			
<p>Τα δοσόμετρα από τα πέτρας της έκθεσης είναι και των έναρξη etching αρχή θανάτου είναι καλύφθηκαν μετρά για ειδικές βελτιώσεις.</p>							