



*όλα όσα πρέπει να γνωρίζετε*

# 1. Βασικές έννοιες

Η ύλη αποτελείται από στοιχεία, όπως το υδρογόνο, το οξυγόνο, ο άνθρακας, ο σίδηρος και ο μόλυβδος. Τα στοιχεία αποτελούνται από τα **άτομα**, τα οποία περιέχουν ένα μικροσκοπικό **πυρήνα** και **ηλεκτρόνια**. Ο πυρήνας περιέχει **πρωτόνια**, που έχουν θετικό ηλεκτρικό φορτίο και **νετρόνια**, που δεν έχουν καθόλου φορτίο. Τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο και μπορούμε να τα φανταστούμε ότι περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα. Ο περισσότερος χώρος ενός ατόμου είναι άδειος.

Ένα άτομο περιέχει ίσους αριθμούς πρωτονίων και ηλεκτρονίων και είναι ουδέτερο ηλεκτρικά. Ο αριθμός των πρωτονίων ονομάζεται **ατομικός αριθμός** και χαρακτηρίζει ένα στοιχείο. Για παράδειγμα, ο ατομικός αριθμός του άνθρακα είναι 6 και του οξυγόνου είναι 8. Τα άτομα συνδυάζονται μεταξύ τους και σχηματίζουν τα μόρια: έτσι, 2 άτομα υδρογόνου μαζί με ένα άτομο οξυγόνου σχηματίζουν το νερό.

Η **μάζα** των ατόμων είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα. Τη **μάζα** του πυρήνα

περιγράφει ο **μαζικός αριθμός**, που είναι το άθροισμα του αριθμού των νετρονίων και των πρωτονίων. Οι πυρήνες διαφόρων ατόμων χαρακτηρίζονται από τους δύο αριθμούς, τον ατομικό αριθμό και το μαζικό αριθμό ή, πιο απλά, από το όνομα του στοιχείου και το μαζικό αριθμό. Έτσι, ο άνθρακας-12 είναι ένας πυρήνας με 6 πρωτόνια και 6 νετρόνια, ενώ ο μόλυβδος-208 είναι ένας πυρήνας με 82 πρωτόνια και 126 νετρόνια.

Οι πυρήνες ενός στοιχείου που έχουν διαφορετικό αριθμό νετρονίων ονομάζονται **ισότοπα** του στοιχείου. Το υδρογόνο π.χ. έχει τρία ισότοπα, το υδρογόνο-1, το υδρογόνο-2 που ονομάζεται δευτέριο και το υδρογόνο-3 που ονομάζεται τρίτιο. Ο σίδηρος έχει δέκα ισότοπα, από το σίδηρο-52 ως το σίδηρο-61.

## ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

Άλλοι πυρήνες είναι σταθεροί και άλλοι δεν είναι. Η σταθερότητα ενός πυρήνα εξαρτάται από τον αριθμό των πρωτονίων και των νετρονίων, τη διάταξή τους και τις δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ τους. Ένας ασταθής πυρήνας ξαφνικά μετατρέπεται σε πυρήνα άλλου στοιχείου και την ίδια στιγμή εκπέμπει ακτινοβολία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ραδιενέργεια** και ο πυρήνας **ραδιοϊσότοπο**. Για παράδειγμα, αναφέρουμε τον άνθρακα-14 που μετατρέπεται (μεταστοιχειώνεται) στο σταθερό ισότοπο άζωτο-14. Το στρόντιο-90 είναι ένα ραδιοϊσότοπο που μετατρέπεται στο ραδιοϊσότοπο ύτριο-90, το οποίο με τη σειρά του καταλήγει στο σταθερό ισότοπο ζιρκόνιο-90.

Οι ακτινοβολίες που συνήθως εκπέμπουν τα ραδιοϊσότοπα είναι τα **σωματίδια-α**, τα **σωματίδια β** και οι **ακτίνες γ**. Το σωματίδιο α αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Πρόκειται για ένα βαρύ σωματίδιο που είναι διπλά φορτισμένο. Το σωματίδιο β είναι ηλεκτρόνιο, που δημιουργείται όταν ένα

νετρόνιο μετατρέπεται σε πρωτόνιο μέσα στον πυρήνα κάποιου ραδιοϊσοτόπου. Η ακτίνα γ είναι μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας που μεταδίδεται σαν κύμα.

Στη φύση υπάρχουν αρκετά ραδιενεργά στοιχεία, από τα οποία τα πιο γνωστά είναι το ουράνιο και το θόριο. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν παραχθεί μερικές εκατοντάδες τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων, τα οποία περιλαμβάνουν τα γνωστά κέσιο-137, στρόντιο-90 και ιώδιο-131.

Η ραδιενέργεια μιας ποσότητας ραδιοϊσοτόπου εκφράζεται από τον αριθμό των μεταστοιχειώσεων που συμβαίνουν σε 1 δευτερόλεπτο. Μονάδα της ραδιενέργειας είναι το **μπεκερέλ**, που συμβολίζεται με τα γράμματα Bq. Το μπεκερέλ πήρε το όνομά του από τον γάλλο επιστήμονα Ανρί Μπεκερέλ, ο οποίος ανακάλυψε το φαινόμενο της ραδιενέργειας το 1896.

Ο χρόνος που χρειάζεται για να χάσει ένα ραδιοϊσότοπο την μισή ραδιενέργεια ονομάζεται **χρόνος ημιζωής**. Κάθε ραδιοϊσότοπο έχει ένα μοναδικό χρόνο

ημιζωής. Έτσι, το βάριο-140 έχει χρόνο ημιζωής 12,8 ημέρες, ο άνθρακας-14 5730 χρόνια και το ουράνιο-238 4,47 δισεκατομμύρια χρόνια.

## Η ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΖΩΝΤΑΝΟΙ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ

Όταν η ακτινοβολία διαπερνά την ύλη, χάνει ενέργεια. Τα σωματίδια α και β, επειδή έχουν ηλεκτρικό φορτίο, χάνουν ενέργεια μέσω ηλεκτρικών αλληλεπιδράσεων με τα ηλεκτρόνια των ατόμων. Οι ακτίνες γ χάνουν την ενέργεια τους με διάφορους τρόπους, που ο καθένας ελευθερώνει ηλεκτρόνια από τα άτομα. Όταν ένα ηλεκτρικά ουδέτερο άτομο ή μόριο χάνει ένα ηλεκτρόνιο, αποκτά θετικό φορτίο και ονομάζεται *ión*, ενώ το σχετικό φαινόμενο ονομάζεται *ιονισμός*.

Τα φορτισμένα μόρια του νερού μετατρέπονται σε σχηματισμούς που ονομάζονται *ελεύθερες ρίζες*, που είναι εξαιρετικά χημικά ενεργοί και μπορούν να αντιδράσουν με σημαντικά μόρια των ιστών των ζωντανών οργανισμών.

Οι ιστοί σχηματίζονται από βασικές μονάδες που ονομάζονται *κύτταρα*. Κάθε κύτταρο έχει ένα *πυρήνα*, που είναι το κέντρο ελέγχου του κυττάρου. Στον πυρήνα του κυττάρου βρίσκονται τα μόρια του DNA, που ελέγχουν την λειτουργία του κυττάρου και σχηματίζουν αντίγραφα τους. Αν και οι τρόποι με τους οποίους η ακτινοβολία προκαλεί βλάβες στα κύτταρα δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητοί, πολλοί καταλήγουν σε αλλαγές στο DNA. Έτσι, το ίδιο το DNA μπορεί να ιονιστεί και να αλλάξει μορφή ή εναλλακτικά το DNA αλλάζει έμμεσα, αφού επιδράσει πάνω του μια ελεύθερη ρίζα. Ό,τι και να συμβαίνει, οι χημικές μεταβολές στο DNA καταλήγουν σε βλάβες που εκδηλώνονται είτε με θάνατο του κυττάρου, είτε με γενετικές αλλαγές (μεταλλάξεις) είτε με την ανάπτυξη καρκίνου.

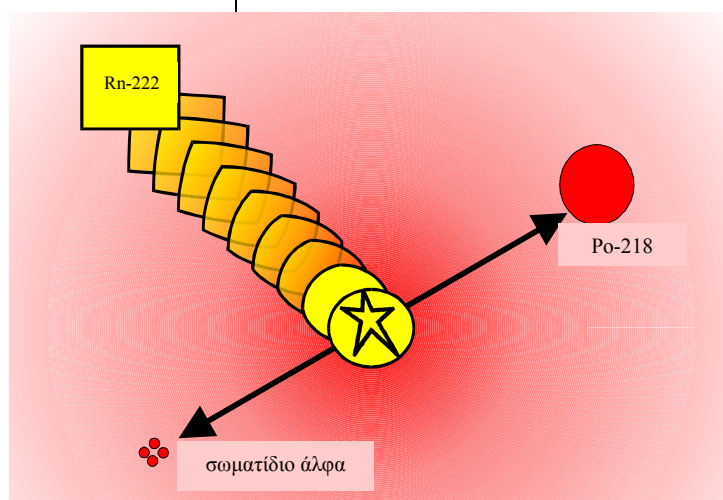
# 2. Το ραδόνιο

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί είναι εκτεθειμένοι στη ραδιενέργεια που προέρχεται από τα ραδιενεργά στοιχεία του γήινου φλοιού καθώς και την ακτινοβολία που έρχεται από το διάστημα, την **κοσμική ακτινοβολία**. Ο άνθρωπος δέχεται ακτινοβολία είτε βρίσκεται στο ύπαιθρο, είτε στο εσωτερικό των κατοικιών.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της έκθεσης σε φυσική ακτινοβολία οφείλεται στην εισπνοή των ραδιο-στοιχείων που παράγονται από το ραδιενεργό αέριο **ραδόνιο**. Μετρήσεις των συγκεντρώσεων του ραδονίου σε σπίτια και σε διάφορες χώρες έχουν καταλήξει σε μια μέση τιμή περίπου 40-60 μπεκερέλ στο

κυβικό μέτρο. Η συγκέντρωση αυτή υπολογίστηκε ότι αντιστοιχεί σε με μια μέση πιθανότητα καρκίνου των πνευμόνων περίπου 0.7%, αρκετή για να προκαλέσει περίπου 700 νέες περιπτώσεις καρκίνου των πνευμόνων σε ένα χρόνο σε ένα πληθυσμό



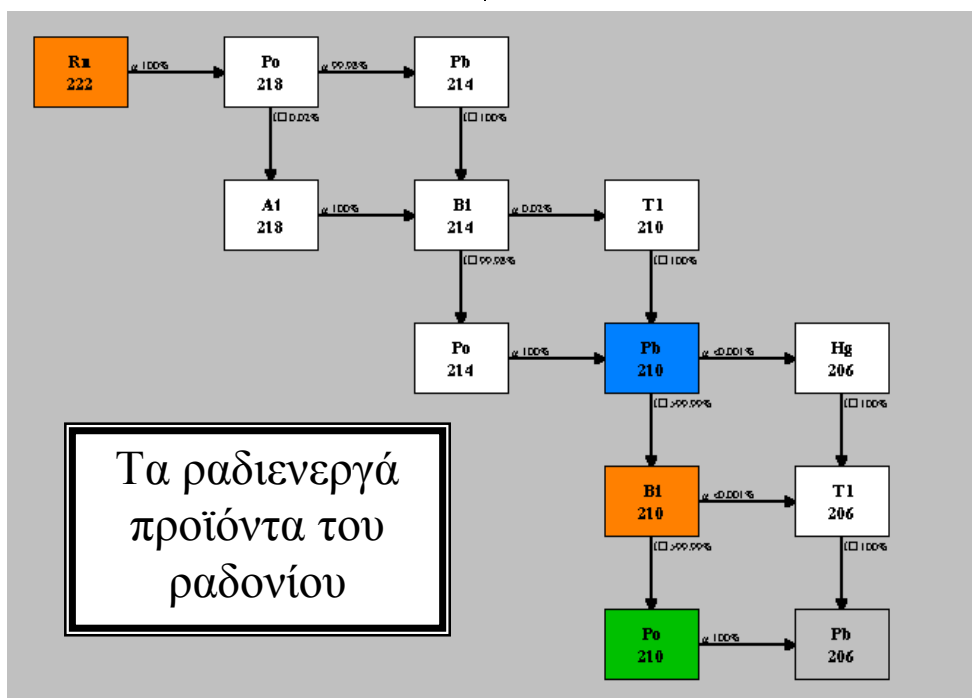
Από ένα ραδιενεργό πυρήνα ραδίου παράγεται ένας πυρήνας ραδονίου και εκπέμπεται ένα σωματίδιο α.

σαν τον ελληνικό. Η πιθανότητα προσβολής από καρκίνο των πνευμόνων είναι μεγαλύτερη από την πιθανότητα καρκινογένεσης εξαιτίας όλων των άλλων πηγών φυσικής ακτινοβολίας ή εξαιτίας της έκθεσης σε ακτινοβολία για ιατρικούς

λόγους. Επιπλέον η έκθεση στα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου υπερβαίνει 10 ως 100 φορές την έκθεση που οφείλεται στην πυρηνική ενέργεια ή τις δοκιμές πυρηνικών όπλων.

Το κύριο χαρακτηριστικό του ραδονίου, που το καθιστά σημαντικό ως προς τις επιπτώσεις του στην υγεία, είναι το ό,τι

σε ένα υλικό που περιέχει το στοιχείο **ράδιο**, το άτομο του ραδονίου κινείται σχετικά ελεύθερα διαμέσου των πόρων του υλικού. Έτσι, έχει την δυνατότητα να φτάσει στον αέρα ή στο νερό του άμεσου προς τον άνθρωπο περιβάλλοντος. Αυτό συμβαίνει εφ'όσον ο χρόνος που χρειάζεται για τη μετακίνησή του είναι μικρότερος από το



πρόκειται για ένα άχρωμο και άοσμο ευγενές αέριο. Αμέσως μετά το σχηματισμό του μέσα

χρόνο που απαιτείται για να διασπαστεί σε

άλλα ραδιενεργά μεν, αλλά δυσκίνητα θυγατρικά προϊόντα.

Το σημαντικότερο ισότοπο του ραδονίου είναι το ραδόνιο-222, το οποίο έχει το μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής, 3.8 ημέρες. Σχηματίζεται κατά τη διάσπαση του ραδίου-226 και ανήκει στην αλυσίδα των φυσικών ραδιενεργών στοιχείων της σειράς του ουρανίου-238. Υπάρχει και δεύτερο ισότοπο του ραδονίου, το ραδόνιο-220 ή θορόνιο, το οποίο ανήκει στην αλυσίδα των ραδιενεργών στοιχείων της σειράς του θορίου-232. Ο χρόνος ημιζωής του ραδονίου-220 είναι 56 δευτερόλεπτα, πράγμα που το καθιστά λιγότερο σημαντικό, εφόσον πολύ μικρότερες ποσότητες φτάνουν στο περιβάλλον του ανθρώπου.

Τα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου είναι βραχύβια και χημικά ενεργά. Τα τέσσερα ραδιοϊσότοπα που παράγονται μετά τη διάσπαση του ραδονίου-222 έχουν χρόνους ζωής μικρότερους από 30 λεπτά. Αν μεν φτάσουν στους πνεύμονες με την αναπνοή, διασπώνται με σχηματισμό μολύβδου-210, ο οποίος έχει χρόνο ημιζωής 30 χρόνια. Η

ακτινοβολία που απελευθερώνεται κατά τη διάσπαση των ραδιοϊσοτόπων αυτών συνεισφέρει κατά το μεγαλύτερο μέρος στη ραδιενεργό δόση στην οποία αποδίδεται ο καρκίνος των πνευμόνων.

## **ΠΗΓΕΣ ΤΟΥ ΡΑΔΟΝΙΟΥ**

Στις 2 Δεκεμβρίου 1984, ο Στάνλεϊ Γουάτρας, έκανε το συναγερμό ραδιενέργειας του πυρηνικού εργοστασίου όπου εργαζόταν να ηχήσει. Για δεκαπέντε μέρες έμαχθαν στο πυρηνικό εργοστάσιο του Λίμερικ στη Φιλαντέλφια των ΗΠΑ να βρουν γιατί κάθε πρωί ο κ. Γουάτρας ενεργοποιούσε το συναγερμό με την είσοδό του στο εργοστάσιο. Η πηγή της ραδιενέργειας, που έκανε τον κ. Γουάτρας τόσο ραδιενεργό, ήταν τελικά το ίδιο του το σπίτι. Η ανακάλυψη αυτή έδωσε σημαντική ώθηση στις έρευνες για τον έλεγχο της ραδιενέργειας των κατοικιών. Μετά από έρευνες σε όλο τον κόσμο, το σπίτι του Γουάτρας, που έτυχε να κτιστεί πάνω σε μια φλέβα ουρανίου, πλάτους 10 μέτρων, παραμένει το πιο

ραδιενεργό στον κόσμο, με συγκέντρωση ραδιενέργειας 100000 μπεκερέλ στο κυβικό μέτρο ραδονίου του αέρα!

Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, αρκετές μελέτες έγιναν για την μέτρηση του ραδονίου στο εσωτερικό των κατοικιών. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα των εργασιών αυτών είναι ότι η μέση συγκέντρωση του ραδονίου στο εσωτερικό των κατοικιών κυμαίνεται γύρω στα 55-65 μπεκερέλ στο κυβικό μέτρο, ενώ ποσοστό ως και 25% υπερβαίνει τα 150 μπεκερέλ, τα οποία έχουν οριστεί ως το όριο συναγερμού από την Αμερικανική Υπηρεσία Περιβάλλοντος (EPA).

Ποια είναι η προέλευση του ραδονίου των κατοικιών; Την απάντηση στο ερώτημα αυτό έδωσαν πολυετείς έρευνες, οι οποίες έχουν δείξει ότι το ραδόνιο *αναδύεται* από το έδαφος, *διαχέεται* δια μέσου των πατωμάτων και *συγκεντρώνεται* στο αέρα των κατοικιών. Επίσης, το ραδόνιο παράγεται από τα οικοδομικά υλικά και αναβλύζει από το νερό.

Το έδαφος είναι η κυριότερη πηγή του ραδονίου. Παράγοντες από τους οποίους

εξαρτάται η εκπομπή του ραδονίου από το έδαφος είναι οι πόροι του εδάφους και η υγρασία. Αφού το έδαφος εκπέμπει το περισσότερο ραδόνιο, οι συγκεντρώσεις του ραδονίου που μετρήθηκαν σε πολυκατοικίες με πολλούς ορόφους, είναι μικρότερες στους πάνω ορόφους από τις συγκεντρώσεις στους κάτω. Φυσικά, τα υψηλότερα ποσοστά παρατηρήθηκαν σε ισόγειες μονοκατοικίες και μάλιστα σε εκείνες που είχαν κτισθεί σε εδάφη με υψηλή ραδιενέργεια.

Χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις ραδιενεργών στην κυριολεξία σπιτιών που κτίστηκαν σε χώματα προερχόμενα από ορυχεία ουρανίου (ΗΠΑ), πάνω σε απόβλητα βιομηχανίας ραδίου (Αυστραλία), αργλικού σχιστόλιθου (Σουηδία) και φωσφορίτη (ΗΠΑ).

Τα κοινά οικοδομικά υλικά όπως το ξύλο, τα τούβλα και το τσιμέντο εκλύουν σχετικά μικρές ποσότητες ραδονίου. Το πιο ραδιενεργό υλικό είναι ο γρανίτης και ορισμένα είδη πέτρας. Οι αργλικοί σχιστόλιθοι, που επί πολλές δεκαετίες αποτελούσαν την πρώτη ύλη για τσιμέντο



στη Σουηδία, με το οποίο χτίστηκαν 350000-700000 κατοικίες αποδείχτηκαν εξαιρετικά ραδιενεργοί. Το ίδιο συνέβη, όταν χρησιμοποιήθηκαν ύλες προερχόμενες από τη μεταλλοβιομηχανία (σε ΗΠΑ και Καναδά). Ο γύψος επίσης που προέρχεται από τη κατεργασία των ορυκτών του φωσφορίτη είναι πολύ περισσότερο ραδιενεργός από το φυσικό γύψο.

Μια άλλη πηγή ραδονίου, λιγότερο σημαντική, είναι το νερό της βρύσης. Συνήθως η συγκέντρωση του ραδονίου στο νερό είναι μικρή, αλλά το νερό ορισμένων πηγαδιών είναι εξαιρετικά ραδιενεργό. Το πιο ραδιενεργό νερό πηγαδιού που μετρήθηκε μέχρι σήμερα είναι σε πηγάδι σπιτιού του Κολοράντο των ΗΠΑ, όπου μετρήθηκαν 93,000 Μπεκερέλ στο λίτρο. Στην Ελλάδα έχει μετρηθεί το νερό των ιαματικών πηγών, με πιο ραδιενεργό το νερό της Ικαρίας το οποίο υπερβαίνει τα 1333 μπεκερέλ στο λίτρο. Η συνεισφορά του νερού στο ραδόνιο των κατοικιών κάνει τον αέρα του μπάνιου και της κουζίνας μέχρι και 25% περισσότερο ραδιενεργό από ό,τι στα άλλα δωμάτια.

Σε μια ορισμένη τοποθεσία, η συγκέντρωση του ραδονίου εξαρτάται από τους μετεωρολογικούς παράγοντες, που επηρεάζουν το ρυθμό εκπομπής των αερίων από το χώμα και το ρυθμό διάλυσής τους στην ατμόσφαιρα. Έτσι, ο ρυθμός εκπομπής του ραδονίου από το έδαφος αυξάνεται στη διάρκεια περιόδων χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσης και μειώνεται όταν η υγρασία του εδάφους είναι υψηλή. Στο εσωτερικό των κατοικιών, επίσης, παρατηρήθηκε ισχυρή εξάρτηση των συγκεντρώσεων από τον καιρό. Το χειμώνα παρατηρούνται συγκεντρώσεις πάνω από τον μέσο όρο, ενώ το καλοκαίρι σημειώνονται μικρότερες συγκεντρώσεις.

Η ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων του ραδονίου σχετίζεται με τις μεταβολές στην ατμοσφαιρική πίεση. Οι πρωινές ατμοσφαιρικές θερμοκρασιακές αναστροφές έχουν ως επακόλουθο σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες, που δεν ευνοούν την ανάμιξη των αερίων μαζών, με συνέπεια την αύξηση των συγκεντρώσεων του ραδονίου κοντά στο έδαφος. Μετά την

ανατολή του ήλιου, η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει το έδαφος, το οποίο στη συνέχεια θερμαίνει τα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα με επακόλουθο την καταστροφή της αναστροφής και την αύξηση των συγκεντρώσεων του ραδονίου. Οι συγκεντρώσεις παραμένουν χαμηλές ως το τέλος του απογεύματος, οπότε η ψύξη του εδάφους προκαλεί αύξηση της σταθερότητας της ατμόσφαιρας και συνεπώς αύξηση της συγκέντρωσης του ραδονίου.

## **ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ.**

Η αυξημένη συχνότητα καρκίνου των πνευμόνων στους μεταλλωρύχους της κεντρικής Ευρώπης, από νωρίς αποδόθηκε στην υψηλή συγκέντρωση του ραδονίου στον αέρα των ορυχείων. Τα ορυχεία λειτουργούσαν για εκατοντάδες χρόνια και γενιές μεταλλωρύχων υπέφεραν από μια ασθένεια των πνευμόνων, που μόνο κατά τα τέλη του 19ου αιώνα διαγνώστηκε ότι ήταν

καρκίνος. Στη δεκαετία του 1950, χάρη στην έρευνα του Χάρλεϊ, έγινε αντιληπτό ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της δόσης που δέχονται οι πνεύμονες μετά την εισπνοή ραδονίου δεν οφείλεται στο ίδιο το αέριο, αλλά στη συγκέντρωση στους πνεύμονες των βραχύβιων προϊόντων της ραδιενεργού διάσπασης του ραδονίου που προσκολλώνται στη σκόνη των ορυχείων. Στη δεκαετία του '60 και του '70, αρκετές μελέτες έδειξαν αυξημένη θνησιμότητα των εργαζομένων σε ορυχεία ουρανίου και άλλα ορυχεία, η οποία φαίνεται να συσχετίζεται με την έκθεση στο ραδόνιο. Μια από τις πλέον σοβαρές περιπτώσεις συχνής εμφάνισης καρκίνου των πνευμόνων είναι αυτή των μεταλλωρύχων κασσιτέρου στην επαρχία Γιουνάν της Κίνας, όπου εκδηλώθηκαν περισσότερα από 1500 περιστατικά. Παράλληλα με τις επιδημιολογικές μελέτες στους μεταλλωρύχους, έγιναν και πειραματικές μελέτες, οι οποίες έδειξαν ότι η εισπνοή του ραδονίου προκαλεί αλλοιώσεις και καρκίνο στους πνεύμονες των ζώων. Επίσης, έχει μελετηθεί η πρόκληση γενετικών ανωμαλιών

και η επίδραση στο ανοσοποιητικό σύστημα των μεταλλωρύχων.

Ο υπολογισμός της πιθανότητας καρκινογένεσης στους πνεύμονες είναι μια σύνθετη εργασία, στην οποία δυνατόν να συνεισφέρουν πολλοί παράγοντες. Σημαντικό ρόλο παίζει ο τρόπος λειτουργίας του αναπνευστικού συστήματος, το οποίο στέλνει τον αέρα βαθιά μέσα στους πνεύμονες, στις κυψελίδες, όπου ανταλλάσσεται το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα μεταξύ αίματος και αέρα. Τα περισσότερα σωματίδια της σκόνης που αιωρείται στον αέρα κάθονται στον ανώτερο αναπνευστικό σωλήνα. Γενικά, τα μεγαλύτερα σωματίδια τείνουν να προσκολληθούν μεταξύ της μύτης και των κατωτέρων βρόγχων, ενώ η πιθανότητα τα μικρά σωματίδια να φτάσουν στις κυψελίδες είναι μεγαλύτερη.

Ο αναπνευστικός σωλήνας επικαλύπτεται από ιστό, ο οποίος έχει την ικανότητα να απομακρύνει τη σκόνη προς τα πάνω και έξω από τον αναπνευστικό σωλήνα σε λίγες ώρες. Αντίθετα, η σκόνη που φτάνει στις κυψελίδες μπορεί να παραμείνει στους πνεύμονες επί

μήνες ή χρόνια. Τα διαλυτά σωματίδια σκόνης απομακρύνονται γρήγορα από τον αναπνευστικό σωλήνα με το αίμα. Η αδιάλυτη σκόνη που κάθεται στα κυψελιδικά τοιχώματα απομακρύνεται από τα φαγοκύτταρα, κύτταρα τα οποία αφού εγκλωβίσουν τα σωματίδια της σκόνης κατευθύνονται προς το στόμα με τη δράση των ιστών ή περνούν από τα λεμφαγγεία προς τους λεμφαδένες.

Η έκθεση του πνεύμονα στη ραδιενέργεια από την εισπνεόμενη ραδιενεργό σκόνη, εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ραδιοϊσοτόπων στον αέρα, το ρυθμό αναπνοής, τις φυσικές ιδιότητες των ραδιοϊσοτόπων, την περιοχή του πνεύμονα όπου εναποτίθεται η σκόνη και το ρυθμό απομάκρυνσής της. Αφού γίνει ο υπολογισμός της ενέργειας που απορροφούν τα πνευμονικά κύτταρα και της δόσης που δέχονται, ακολουθεί ο υπολογισμός της πιθανότητας καρκινογένεσης. Για τους ποσοτικούς υπολογισμούς χρησιμοποιούνται ορισμένοι συντελεστές μετατροπής, οι οποίοι αποδίδουν, για ορισμένη έκθεση σε ραδόνιο, τις αντίστοιχες επιπτώσεις. Π.χ. για συγκέντρωση

ραδονίου στο εσωτερικό μιας κατοικίας 55 μπεκερέλ στο κυβικό μέτρο, όσο δηλαδή έχει μετρηθεί κατά μέσο όρο σε κατοικίες, έχει υπολογισθεί επίπτωση εκφρασμένη ως πιθανότητα πρόωμου θανάτου ίση με 0.7%. Σε μερικές κατοικίες όμως σημειώνονται χαμηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου, οι οποίες συνεπάγονται πιθανότητες της τάξεως του 1:10000. Σε σημαντικό αριθμό κατοικιών μετρήθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις, που αντιστοιχούν σε πιθανότητες θανάτου της τάξεως του 1% ή και ακόμη 10%. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κατά καιρούς εκτιμήσεις για την πιθανότητα πρόκλησης καρκίνου πνευμόνων από εισπνοή ραδονίου, διαφέρουν μεταξύ τους σημαντικά.

# 3. Η έρευνα στα Ιωάννινα

## ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

Τα τελευταία χρόνια έχει οργανωθεί το τμήμα μετρήσεων ραδονίου στο Εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής του Πανεπιστημίου

Ιωαννίνων. Για τις μετρήσεις ραδονίου επελέγη, λόγω του χαμηλού κόστους και των σχετικών ευκολιών στη χρήση, ο πλαστικός ανιχνευτής CR-39. Ο ανιχνευτής αυτός είναι ένα πλαστικό, στο οποίο τα σωματίδια α από την ραδιενεργό αποδιέγερση

του ραδονίου και των θυγατρικών του πυρήνων προκαλούν μικροσκοπικές ανωμαλίες. Μετά από χημική επεξεργασία, οι ανωμαλίες μεγαλώνουν και σχηματίζονται ίχνη, τα οποία φαίνονται με οπτικό μικροσκόπιο.

Για την καταγραφή και την καταμέτρηση των ιχνών χρησιμοποιείται διάταξη που αποτελείται από ένα οπτικό μικροσκόπιο, στο οποίο προσαρμόζεται μηχανή τηλεοπτικής λήψης. Το οπτικό σήμα (video) από τη μηχανή λήψης οδηγείται σε ειδική κάρτα μετατροπής του σε ψηφιακή εικόνα. Η εικόνα



αποθηκεύεται στο σκληρό δίσκο του ηλεκτρονικού υπολογιστή, στον οποίο έχει εγκατασταθεί η κάρτα μετατροπής. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η επεξεργασία της ψηφιακής εικόνας και η καταμέτρηση των ιχνών με την βοήθεια ειδικού προγράμματος

και σε άλλους υπολογιστές, εκτός της γραμμής λήψης των δεδομένων.

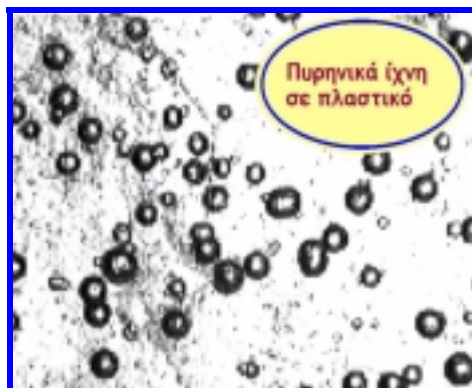
Για την καταμέτρηση των ιχνών στην ψηφιακή εικόνα έχει γραφεί ειδικό λογισμικό. Ειδικότερα, έχει γραφεί το πρόγραμμα TRACKA (TRACK Analysis) για το περιβάλλον Windows. Το πρόγραμμα παρουσιάζει σε διάφορες μεγεθύνσεις την εικόνα στην οθόνη του υπολογιστή. Τα ίχνη της πυρηνικής ακτινοβολίας μπορούν να καταμετρηθούν είτε με το χέρι, με τη βοήθεια δείκτη, είτε αυτόματα.

## **ΟΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ**

Η έρευνα του ραδονίου στο εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής ακολούθησε τις εξής κατευθύνσεις:

**Συγκεντρώσεις ραδονίου στο εσωτερικό κατοικιών στην Ήπειρο.**

Από τις αρχές του 1996, τοποθετήθηκαν ανιχνευτές ραδονίου CR-39 μέσα σε πλαστικά δοχεία σε διαμερίσματα πολυορόφων κτιρίων, μονοκατοικίες και υπόγειους χώρους κτιρίων της περιοχής των Ιωαννίνων καθώς και σε κατοικίες του Μετσόβου. Οι ανιχνευτές και το σύστημα



καταμέτρησης βαθμονομήθηκαν στο Εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής και στα Εργαστήρια NRPB, στο Didcot της Αγγλίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τιμές συγκεντρώσεων ραδονίου κυμαίνονται στα διαμερίσματα από 55-90 μπεκερέλ στο κυβικό μέτρο και στις μονοκατοικίες από 60-190 μπεκερέλ. Υψηλότερες συγκεντρώσεις

παρατηρήθηκαν στα υπόγεια κατοικιών και δημοσίων κτιρίων.

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η συγκέντρωση ραδονίου στο εσωτερικό διαμερισμάτων σε πολυρόφες οικοδομές της περιοχής των Ιωαννίνων, δεν παρουσιάζει πρόβλημα

για τη δημόσια υγεία. Αυξημένες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν στον αέρα μονοκατοικιών, σε ορισμένες από τις οποίες τα επίπεδα συγκεντρώσεων κρίνονται υψηλά.

#### **Μετρήσεις συγκεντρώσεων ραδονίου στο υπαίθρο.**

Για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου στον αέρα του υπαίθρου αναπτύχθηκε τεχνική, κατά την οποία μεγάλες ποσότητες αέρα αναγκάζονται να περάσουν από φίλτρο επί 30-50 λεπτά. Στη συνέχεια η εξέλιξη της ραδιενέργειας πάνω

στο φίλτρο, που οφείλεται στους θυγατρικούς πυρήνες από την αποδιέγερση του ραδονίου,

παρακολουθείται με μετρήσεις ακτίνων γ. Τελικά, η συγκέντρωση του ραδονίου εκτιμάται με υπολογισμούς στα δεδομένα των μετρήσεων.



Έχουν μετρηθεί συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 0,1-7 μπεκερέλ στο κυβικό μέτρο.

#### **Η έκλυση ραδονίου από το έδαφος.**

Εγκαταστάθηκαν σταθμοί μέτρησης στο χώρο της Πανεπιστημιούπολης Δουρούτης, με σκοπό τη μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την έκλυση του ραδονίου από το έδαφος. Χρησιμοποιήθηκαν διατάξεις σωλήνων διαφόρων μηκών, οι οποίοι τοποθετήθηκαν στο έδαφος. Μέσα στους

σωλήνες τοποθετήθηκαν, σε διαφορετικές αποστάσεις, πλαστικοί ανιχνευτές CR-39. Μελετήθηκε, επίσης, η μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου με το βάθος. Σε όλες τις σειρές μετρήσεων, παρατηρήθηκε ότι η συγκέντρωση αυξάνεται με το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Το γεγονός αυτό είναι ένδειξη ότι το ραδόνιο δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στο διαθέσιμο χώρο, αλλά συγκεντρώνεται σε μικρή περιοχή κοντά στο έδαφος, από το οποίο εκλύεται. Το συμπέρασμα αυτό κρίνεται σημαντικό τόσο για την μελέτη της έκλυσης του ραδονίου από το έδαφος, όσο και για την συγκέντρωση του αερίου στον αέρα υπόγειων χώρων.

Επίσης έγιναν συσχετίσεις της έκλυσης του ραδονίου με παράγοντες, όπως η υγρασία του εδάφους, η υγρασία του αέρα και η ατμοσφαιρική πίεση. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι υπάρχει σχέση αντιστρόφως ανάλογη με την ατμοσφαιρική πίεση και την υγρασία του αέρα και του εδάφους, δηλαδή όσο αυξάνεται η πίεση και η υγρασία τόσο μειώνεται η συγκέντρωση του ραδονίου.

#### **Μετρήσεις συγκεντρώσεων ραδονίου σε αποθήκες λιπασμάτων.**

Μετρήθηκαν, σε συνεργασία με το ΕΘΙΑΓΕ Ιωαννίνων, οι συγκεντρώσεις του ραδίου-226 σε διάφορους τύπους φωσφορικών λιπασμάτων. Το ράδιο είναι το ραδιενεργό στοιχείο από το οποίο παράγεται με ραδιενεργό μεταστοιχείωση το ραδόνιο. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η μέση συγκέντρωση του ραδίου στα λιπάσματα κυμαίνεται από 0 ως 4584 μπεκερέλ στο χιλιόγραμμο και οι συγκεντρώσεις ραδονίου σε αποθήκες λιπασμάτων μετρήθηκαν από 732 ως 3320 μπεκερέλ στο κυβικό μέτρο.

#### **Γεωλογικές εφαρμογές της έρευνας ραδονίου.**

Τα τελευταία χρόνια αυξημένο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της έκλυσης του ραδονίου και ο τρόπος που αυτή μπορεί να φανεί χρήσιμη στη γεωλογία. Ο εντοπισμός υλικών όπως το ουράνιο και το πετρέλαιο, ο καθορισμός γεωθερμικών πηγών ενέργειας, η χαρτογράφηση ρηγμάτων, η πρόγνωση σεισμών, η μελέτη των ηφαιστείων είναι



αντικείμενα στα οποία η συστηματική έρευνα μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες.

Στη σεισμολογία, πιστεύεται ότι η αύξηση των τάσεων στο εσωτερικό της γης πριν από το σεισμικό γεγονός, μπορεί να προκαλέσει αύξηση της συγκέντρωση του ραδονίου σε θέσεις όπου τέτοιες προειδοποιητικές μεταβολές μπορούν να μετρηθούν.

Μακράς διάρκειας μετρήσεις του ραδονίου έδειξαν τη χρησιμότητα της μέτρησης του ραδονίου στο υπόγειο νερό ως πρόδρομο φαινόμενο σεισμών. Ανώμαλες μεταβολές του ραδονίου στο υπόγειο νερό και στα αέρια του εδάφους έχουν μετρηθεί και καταγραφεί πριν από πολλούς σεισμούς και μάλιστα από σταθμούς μέτρησης που βρίσκονταν εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από τα αντίστοιχα επίκεντρα. Αν πράγματι η αύξηση της έκλυσης του ραδονίου σχετίζεται με το σεισμικό γεγονός που έπεται και όχι σε ατμοσφαιρικές παραμέτρους (υψηλό ποσοστό έκλυσης αερίου παρατηρείται επίσης σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλής υγρασίας), τότε ο σεισμός συμβαίνει είτε λίγο

πριν είτε ακριβώς τη στιγμή της μέγιστης έκλυσης του αερίου.

Το ραδόνιο-222 είναι προϊόν διάσπασης του ουρανίου-238. Έτσι, σε περιοχές όπου η συγκέντρωση του ουρανίου είναι τέτοια που να σχηματίζει οικονομικά εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα, η συγκέντρωση στο αέριο ραδόνιο θα είναι πολλές φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτή του υποβάθρου της περιοχής.

Το ραδόνιο χρησιμοποιείται ως ιχνηθέτης στην έρευνα ουρανίου για πολλά έτη. Η ανίχνευση του ουρανίου που βασίζεται στο ραδόνιο, σαφώς υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων, όπως η μαγνητική, η ηλεκτρική ή ακόμα και εκείνων που βασίζονται σε μετρήσεις γ-ακτινοβολίας. Το πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στο ότι το αέριο ραδόνιο που μετράται, παράγεται από υπόγεια αποθέματα ουρανίου και μεταφέρεται ή με διάχυση ή με μεταφορά ατόμων ραδονίου από διάφορα υπόγεια ρευστά, που κινούνται προς την επιφάνεια λόγω κάποιας διαφοράς πίεσης.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια πηγή ενέργειας η οποία τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα πιο σημαντική και βέβαια αναγκαία, καθώς τα παγκοσμίως γνωστά αποθέματα ενέργειας διαρκώς ελαττώνονται. Η παρουσία ενός γεωθερμικού πεδίου σε μια περιοχή, μπορεί να οφείλεται είτε σε σύνθετο σύστημα θερμών πηγών, είτε στο ό,τι η περιοχή βρίσκεται τοποθετημένη στα πλευρά ενός ψυχόμενου ηφαιστειακού συστήματος. Τα υδροθερμικά συστήματα είναι συνήθως εμπλουτισμένα στο αέριο ραδόνιο. Έτσι, όταν οι υδρατμοί διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα, η περιεκτικότητά τους σε ραδόνιο είναι πολύ υψηλή. Στην περίπτωση που οι υδρατμοί δεν καταφέρνουν να βρουν διέξοδο προς την επιφάνεια, η υψηλή τους περιεκτικότητα σε ραδόνιο αποκαλύπτει και τις θέσεις στις οποίες αυτοί έχουν συσσωρευτεί. Για να ανακαλυφθεί μια ανωμαλία του εδάφους, η οποία να κρύβει ένα αξιόλογο γεωθερμικό πεδίο πρέπει να γίνουν γεωφυσικές, γεωχημικές μελέτες, μετρήσεις ροής θερμότητας από μεγάλα βάθη και γεωτρήσεις. Για την αποφυγή άσκοπων ε-

ρευνών, οι οποίες έχουν και υψηλό κόστος, το ραδόνιο είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, αφού με τη βοήθειά του είναι δυνατή με ικανοποιητική ακρίβεια η χαρτογράφηση "πιθανών" πηγών, σε θέσεις όπου παρατηρείται υψηλότερη συγκέντρωσή του. Ορισμένα αέρια, όπως το ήλιο και συχνά το άζωτο, εμφανίζονται εμπλουτισμένα σε υπόγειους χώρους που σχετίζονται με πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Κατά παρόμοιο τρόπο, το ραδόνιο συναντάται σε υψηλές περιεκτικότητες στους ίδιους χώρους. Ως ευγενές αέριο, το ραδόνιο σε κανονικές συνθήκες, δεν αντιδρά με άλλα στοιχεία και όταν διαφύγει φτάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Από έρευνες που έγιναν σε γνωστά κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, το ραδόνιο φαίνεται να εμφανίζει θετικές ανωμαλίες πάνω από τις περιοχές αυτές, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου το κοιτάσμα βρίσκεται σε βάθος 1 ή 2 χιλιομέτρων.

Έχει δειχθεί σχετικά πρόσφατα ότι υψηλά επίπεδα του ραδονίου εκλύονται κατά μήκος ενεργών ρηγμάτων του φλοιού της γης. Η έκλυση του ραδονίου είναι σημαντικά

υψηλότερη κατά μήκος των ρηγμάτων, στα υπόγεια νερά και ιδιαίτερα στις πηγές που συνδέονται άμεσα με τα ρήγματα.

Για τη μελέτη της έκλυσης του ραδονίου από ρηξιγενείς ζώνες και τη συσχέτιση της με την ενεργοποίησή τους, η ομάδα μελέτης του ραδονίου του Εργαστηρίου Πυρηνικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων σε συνεργασία με ομάδα του Γεωλογικού τμήματος του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας. Στα πλαίσια της έρευνας αυτής, είχαν επιλεγεί περιοχές στις οποίες υπάρχουν ενεργά σεισμικά ρήγματα. Αρχικά, έγινε λεπτομερής γεωλογική χαρτογράφηση των ρηγμάτων και εντοπίστηκαν τα πιο ενεργά των τμημάτων τους, όπου εγκαταστάθηκαν δίκτυα μέτρησης του ραδονίου.

Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν πλαστικοί ανιχνευτές CR-39 σε σωλήνες στο έδαφος, σε προεπιλεγμένους σταθμούς στις περιοχές ρηγμάτων και σε σειρές ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε η διασπορά τους να είναι όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτική.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ικανοποιητική αντιστοιχία της έκλυσης του ραδονίου σε σχέση με τα ρήγματα. Οι μετρήσεις στο ρήγμα Μανολιάσας Ιωαννίνων παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα, στο οποίο παρατηρείται μέγιστο συγκέντρωσης ραδονίου σε θέση, στην οποία η ύπαρξη του ρήγματος είχε προηγουμένως επιβεβαιωθεί με άλλες γεωλογικές μεθόδους.

## Βιβλιογραφία

1. Κ. Ιωαννίδης. Οι επιπτώσεις του ραδονίου στη δημόσια υγεία. Ελληνική Ιατρική 1992, 58, 4: 213-226.
2. Ioannides K.G. TRACKA, A computer code for nuclear tracks analysis. Unpublished. Nuclear Physics Laboratory, University of Ioannina. 1995.
3. Assessment of arrangements for the detection of radon emanating from soil. Papachristodoulou, K. G.

- Ioannides, T.J. Mertzimekis, D. T. Karamanis and K. C. Stamoulis. Proceedings of the Panhellenic Nuclear Physics Conference, 1995
4. Radon measurements in Ioannina. K. G. Ioannides, C. A. Papachristodoulou, K. C. Stamoulis and T.J. Mertzimekis. Proceedings of the conference on radon in dwellings in Greece. GAEC, Athens, 1996.
  5. Investigation on the relation of active geological faults and radon emanation. K. G. Ioannides, C. A. Papachristodoulou, D. T. Karamanis, K. C. Stamoulis T.J. Mertzimekis, S V.Pavrides, E. Karakala, A. Xatzipetros and N. Zouros. Proceedings of the conference on radon in dwellings in Greece. GAEC, Athens, 1996.
  6. Measurements of  $^{222}\text{Rn}$  migration in soil. K. G. Ioannides, C. Papachristodoulou, D. T. Karamanis, K. C. Stamoulis, T. J. Mertzimekis. Radioanal. Nucl. Chem. 208 (1996) 541-547.
  7. Measurements of Natural radioactivity in Phosphate fertilizers. K. G. Ioannides, T. J. Mertzimekis, C. A. Papachristodoulou, C. E. Tziialla. Sci. Tot. Environ. 196 (1997) 63-67 .
  8. K.G. Ioannides, K.C. Stamoulis, C.A. Papachristodoulou: A survey of  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in dwellings of the town of Metsovo in North-western Greece, Health Physics 79 (2000), 697-702.