



Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ



**“Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος – Παρουσίαση μετρήσεων από
την ευρύτερη περιοχή των Χανίων”**



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Κατσανικάκη Αμάντα

ΧΑΝΙΑ 2008



Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ



“Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος – Παρουσίαση μετρήσεων από
την ευρύτερη περιοχή των Χανίων”

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κατσανικάκη Αμάντα

Επιβλέπων : *Δρ. Βασίλης Σάλτας*
Επίκουρος Καθηγητής

Επιτροπή Αξιολόγησης : *Δρ. Βασίλης Σάλτας*
Δρ. Ελένη Κόκκινου
Δρ. Δέσποινα Χατζηαυγουστή

Ημερομηνία Παρουσίασης :

Αύξων Αριθμός Πτυχιακής Εργασίας :

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται μετρήσεις του ρυθμού της ολικής γ δόσης (σε nSv/h) από δύο σταθμούς που η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) έχει εγκατεστημένους στην ευρύτερη περιοχή των Χανίων. Τα δεδομένα αυτά διατέθηκαν για το χρονικό διάστημα Ιανουαρίου - Δεκεμβρίου 2006, προκειμένου να συσχετιστούν μεταξύ τους αλλά και να συγκριθούν με τις αντίστοιχες τιμές που μετρώνται σε άλλες πόλεις της Ελλάδας. Στα αρχικά κεφάλαια, παρέχονται οι βασικές πληροφορίες για την ραδιενέργεια και την προέλευσή της, όπως και μία σύντομη ιστορική αναδρομή γύρω από αυτήν. Οι τιμές που έχουν καταγραφεί στους εν λόγω σταθμούς, βρίσκονται μέσα στο εύρος των τιμών που καταγράφονται στον ελλαδικό χώρο από τους υπόλοιπους σταθμούς της ΕΕΑΕ.

Environmental radioactivity: presentation of results from Chania city

ABSTRACT

In the present work we present measurements of radioactivity (total gamma dose rates) that have been taken from two stations, installed in the broad region of Chania city, from the Greek Atomic Energy Commission (EEAE). These data cover the time interval from January to December, 2006 and have been offered from EEAE, in order to analyze and correlate them with measurements from other stations in Greece. In the introduction chapter, we introduce the basics on Radioactivity and its origin, as well as a short flashback around this topic. We conclude that the measured values are similar as compared to those measured at other Greek cities, from EEAE.

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο *Εργαστήριο Γεωφυσικής και Σεισμολογίας* του Τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, κατά το χρονικό διάστημα Ιούνιος 2007 – Δεκέμβριος 2008, υπό την επίβλεψη του Επικ. Καθηγητή Βασίλη Σάλτα, τον οποίο και ευχαριστούμε θερμά για την καθοδήγηση και τη βοήθεια του.

Οι ευχαριστίες μου επεκτείνονται στην Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) για τη διάθεση των μετρήσεων ραδιενέργειας (ολικής γ) από τους δύο σταθμούς της που είναι εγκαταστημένοι στην ευρύτερη περιοχή των Χανίων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής αξιολόγησης, την Επικ. Καθηγήτρια Ελένη Κόκκινου και την Δρ. Χατζηαυγουστή Δέσποινα για το χρόνο που αφιέρωσαν και τις υποδείξεις τους που συνέβαλαν στην τελική μορφή της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1. Τι είναι ραδιενέργεια.....	1
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	1
1.2 Δομή του πυρήνα.....	2
1.3 Ραδιενεργές διασπάσεις.....	4
1.4 Ρυθμοί ραδιενεργών διασπάσεων.....	5
1.5 Μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας.....	8
1.6 Βιολογικές επιπτώσεις ραδιενέργειας.....	9
1.7 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας α, β και γ με την ύλη	15
1.8. Φυσική και τεχνητή ραδιενέργεια.....	19
1.9 Ανίχνευση και μέτρηση ραδιενέργειας.....	21
Κεφάλαιο 2. Φυσικές πηγές ραδιενέργειας	
2.1 Εισαγωγικά.....	22
2.2 Ραδιενέργεια στην ατμόσφαιρα.....	25
2.2.1 Κοσμική ακτινοβολία.....	25
2.2.2 Ακτινοβολία από τη γη.....	26
2.2.3 Άλλες πηγές ραδιενέργειας.....	26
2.4 Εσωτερική ραδιενέργεια.....	27
2.5 Το πρόβλημα του ραδονίου.....	27
2.6 Το ραδόνιο αναλυτικά.....	30
2.7 Κίνδυνοι για την υγεία εξαιτίας του ραδονίου	32
2.8 Πώς εισέρχεται στην κατοικία το ραδόνιο.....	32
2.9 Πώς μετριέται το ραδόνιο.....	33
2.10 Ραδόνιο και χώροι εργασίας.....	35
2.11 Μετρήσεις ραδονίου από την ΕΕΑΕ.....	36
2.12 Εφαρμογή της ραδιενέργειας στη ραδιοχρονολόγηση	38
2.12.1 Υπολογισμός ηλικίας της γης.....	38
2.12.2 Σειρές διασπάσεως.....	39
2.13 Ραδιοχρονολόγηση με τη χρήση του ^{14}C	42

Κεφάλαιο 3 Τεχνητές πηγές ραδιενέργειας.....	44
3.1. Γενικά.....	44
3.2.1 Κύκλος πυρηνικού καυσίμου.....	46
3.2.2 Κίνδυνοι από ραδιενέργεια στον κύκλο του πυρηνικού καυσίμου.....	50
3.2.3 Αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων.....	51
3.3 Το απεμπλουτισμένο Ουράνιο.....	52
3.3.1 Προέλευση.....	54
3.3.2 Επιδράσεις του DU στην ανθρώπινη υγεία.....	54
3.3.3 Ραδιολογική τοξικότητα και εκθέσεις.....	55
3.3.4 Το απεμπλουτισμένο ουράνιο στο περιβάλλον.....	56
Κεφάλαιο 4. Μετρήσεις ραδιενέργειας στην ευρύτερη περιοχή των Χανίων... 57	57
4.1 Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ)	57
4.2. Δίκτυο Σταθμών Μέτρησης Ραδιενέργειας της ΕΕΑΕ.....	58
4.2.1 Περιγραφή του Δικτύου.....	58
4.2.2 Σταθμοί μέτρησης ραδιενέργειας υδάτων ποταμών και αεροζόλ της ατμόσφαιρας.....	60
4.2.3 Ανιχνευτές ρυθμού ολικής-γ δόσης στον αέρα.....	60
4.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων	62
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Τι είναι ραδιενέργεια

1.1 Ιστορική αναδρομή

Ραδιενέργεια είναι η χαρακτηριστική ιδιότητα ορισμένων στοιχείων να παρουσιάζουν αυτόματη διάσπαση των πυρήνων τους ή διάσπαση των πυρήνων τους μετά από βομβαρδισμό με σωματίδια που έχουν επιταχυνθεί, με αποτέλεσμα την εκπομπή σωματιδίων και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η περίπτωση της αυτόματης διάσπασης αναφέρεται ως φυσική ραδιενέργεια, ενώ η διάσπαση μετά από βομβαρδισμό αναφέρεται ως τεχνητή ραδιενέργεια, η οποία προέρχεται από τεχνητά παρασκευασμένα ραδιοϊσότοπα.

Πρώτος ο Γάλλος φυσικός Ανρί Μπεκερέλ το 1896, επηρεασμένος από την ανακάλυψη των ακτίνων X από τον Ρέντγκεν, θέλησε να ερευνήσει το γεγονός του φθορισμού ενώσεων του ουρανίου όταν φωτιστούν.

Η ένωση με την οποία εργαζόταν ο Μπεκερέλ ήταν το θειικό ουρανύλιο του καλίου και μια μέρα που δεν είχε ήλιο ακούμπησε την ένωση αυτή πάνω σε μια φωτογραφική πλάκα, μέσα σε ένα συρτάρι. Η εμφάνιση του φιλμ με την αποτύπωση μιας σκοτεινής κηλίδας πάνω του, που έμοιαζε με το περίγραμμα του κομματιού της ένωσης, έφερε στο προσκήνιο μια νέα ακτινοβολία, που φαινόταν ότι προέρχεται από το εσωτερικό της ύλης και που έμελλε να σφραγίσει το μέλλον της ανθρωπότητας.

Τα πειράματα και τις έρευνες του Μπεκερέλ συνέχισαν ο Πιέρ και η Μαρία Κιουρί οι οποίοι στην προσπάθειά τους να διερευνήσουν το μυστήριο της νέας ακτινοβολίας και ενώ δούλευαν με τον ορυκτό πισσουρανίτη, ανακάλυψαν ότι εκτός από ουράνιο ακόμη ένα υλικό εκπέμπει την ίδιας μορφή ακτινοβολία. Στα δύο

επόμενα χρόνια την έρευνά τους και τους κόπους τους επισφράγισε η ανακάλυψη δύο ακόμη στοιχείων με τις ίδιες ιδιότητες, του ραδίου και του πολωνίου (1896). Έτσι αποδείχτηκε ότι η νέα ακτινοβολία δεν είναι αποτέλεσμα ιδιομορφίας ενός υλικού, αλλά συνδέεται άμεσα με τους χαρακτήρες μιας ολόκληρης οικογένειας στοιχείων. Οι Κιουρί έδωσαν στη νέα ακτινοβολία το όνομα ραδιενέργεια και μαζί με τον Μπεκερέλ τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ.

Η Μαρία Κιουρί για την ανακάλυψη των ραδιενεργών στοιχείων ραδίου και πολωνίου τιμήθηκε πάλι με το βραβείο Νόμπελ και είναι η μόνη που πήρε δύο φορές τη μεγαλύτερη επιστημονική διάκριση. Η κόρη των Κιουρί Ειρήνη και ο άντρας της Φρ. Ζολιό συνέχισαν τις έρευνες στον τομέα της ραδιενέργειας και τιμήθηκαν επίσης με το βραβείο Νόμπελ.

Μια σειρά από επιστήμονες (Βιγιάρ, Ράδερφορντ, Ράμσει, Σόντι κ.α.) με τις έρευνες τους απέδειξαν ότι τα ραδιενεργά στοιχεία εκπέμπουν τρεις τύπους ακτινοβολιών, τις ακτινοβολίες α , β και γ , οι οποίες είναι ανεξάρτητες και δεν επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες ή χημικές αιτίες. Τα συμπεράσματα αυτά δείχνουν ότι η ραδιενέργεια είναι ιδιομορφία του εσωτερικού της ύλης και ειδικά της αστάθειας των πυρήνων, οι οποίοι παρουσιάζουν αυτόματη διάσπαση και εκπέμπουν τις χαρακτηριστικές ακτινοβολίες. Η ταυτόχρονη ύπαρξη μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο, όπου ένα ραδιενεργό υλικό εκπέμπει ακτινοβολίες, δημιουργεί τις προϋποθέσεις για το διαχωρισμό των ακτινοβολιών και τη διερεύνηση της φύσης τους. Έτσι η ακτινοβολία α , αποτελείται από πυρήνες του στοιχείου ηλίου, η ακτινοβολία β αποτελείται από ηλεκτρόνια των οποίων οι ταχύτητες εκτόξευσης πλησιάζουν την οριακή ταχύτητα του φωτός και η ακτινοβολία γ μοιάζει με τις ακτίνες X και αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μικρά μήκη κύματος.

1.2 Δομή του πυρήνα – πυρηνική αποδιέγερση

Ως γνωστό, οι βασικοί δομικοί λίθοι του πυρήνα είναι το πρωτόνιο (με φορτίο $+e$) και το νετρόνιο (με φορτίο μηδέν). Σε ένα ουδέτερο άτομο, ο ολικός αριθμός των πρωτονίων είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων (ατομικός αριθμός Z). Ο συνολικός αριθμός των νετρονίων N (νετρονικός αριθμός) και των πρωτονίων (Z) ονομάζεται μαζικός αριθμός A , δηλαδή:

$$A = Z + N$$

Κάθε ξεχωριστό είδος πυρήνα ονομάζεται *νουκλίδιο*. Άτομα ενός στοιχείου με τον ίδιο ατομικό αριθμό Z αλλά διαφορετικό νετρονικό αριθμό N , ονομάζονται *ισότοπα* του στοιχείου. Τα ισότοπα ενός στοιχείου δηλαδή είναι παραλλαγές του στοιχείου με διαφορετικό αριθμό νετρονίων στον πυρήνα τους (και κατά συνέπεια διαφορετική μάζα). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το Cl (χλώριο) με $Z = 17$, όπου το 75% των πυρήνων έχει $N = 18$ και το υπόλοιπο 25% έχει $N = 20$. Αν σε ένα στοιχείο αλλάξει ο ατομικός αριθμός Z , τότε αλλάζει και το ίδιο το στοιχείο (μεταστοιχείωση). Συμβολικά, το κάθε νουκλίδιο παριστάνεται από το σύμβολο του αντίστοιχου στοιχείου X με ένα δείκτη κάτω αριστερά ίσο με Z (συνήθως παραλείπεται) και ένα δείκτη πάνω αριστερά που εκφράζει το μαζικό αριθμό A (${}^A_Z X$).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μάζες πρωτονίου και νετρονίου είναι σχεδόν ίσες, ενώ η μάζα του ηλεκτρονίου είναι 1840 φορές περίπου μικρότερη από τη μάζα ενός νουκλεονίου (p ή n). Σε ένα άτομο δηλαδή, όλη η μάζα του είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα που έχει διάμετρο 100000 φορές περίπου μικρότερη από τη διάμετρο ολόκληρου του ατόμου.

Οι δυνάμεις που συγκρατούν τα πρωτόνια και τα νετρόνια σε στενή σύνδεση στον πυρήνα, παρά τις ηλεκτρικές απώσεις των πρωτονίων (θετικά φορτισμένα σωμάτια), είναι οι λεγόμενες πυρηνικές δυνάμεις. Πρόκειται για ισχυρές δυνάμεις μικρής εμβέλειας (της τάξης μεγέθους των διαστάσεων του πυρήνα) η επίδραση των οποίων είναι η ίδια τόσο για τα πρωτόνια όσο και για τα νετρόνια. Αν ωστόσο, ο πυρήνας ενός στοιχείου είναι υπερβολικά μεγάλος ($A > 209$ ή $Z > 83$) οι απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις υπερिशχούν των ελκτικών πυρηνικών δυνάμεων και ο πυρήνας διασπάται. Ο ασταθής πυρήνας που διασπάται ονομάζεται *μητρικός* ενώ ο πυρήνας που προκύπτει είναι ο *θυγατρικός* πυρήνας. Ένα ραδιενεργό στοιχείο μεταστοιχειώνεται με εκπομπή α ή β ακτινοβολίας που σχεδόν πάντα συνοδεύεται και από εκπομπή ακτινοβολίας γ . Στην α -διάσπαση, ο θυγατρικός πυρήνας έχει μαζικό αριθμό κατά 4 μονάδες μικρότερο και ατομικό αριθμό κατά 2 μονάδες μικρότερο. Στη β ακτινοβολία ο ατομικός αριθμός στο θυγατρικό πυρήνα αλλάζει κατά 1 μονάδα σε σχέση με το μητρικό, ενώ ο μαζικός αριθμός παραμένει αμετάβλητος. Στη γ ακτινοβολία μαζικός και ατομικός αριθμός δε μεταβάλλονται.

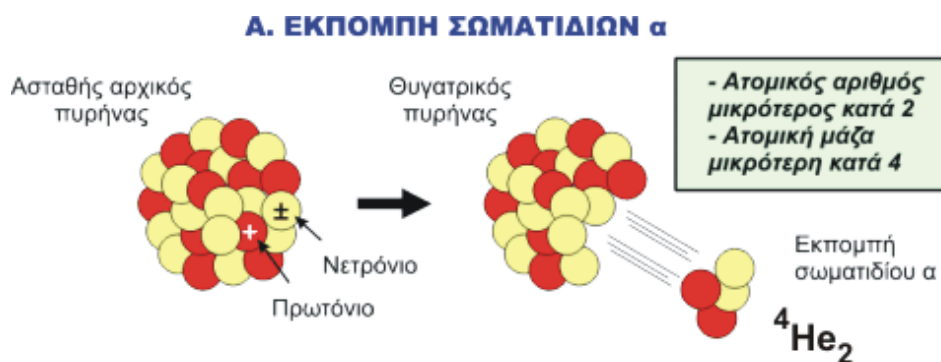
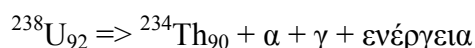
Όταν ένας ραδιενεργός πυρήνας διασπάται, ο θυγατρικός πυρήνας μπορεί να είναι και αυτός ασταθής, οπότε συμβαίνει μια σειρά διαδοχικών διασπάσεων μέχρις

ότου επιτευχθεί ένας σταθερός σχηματισμός. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ραδιενεργό στοιχείο ουράνιο ^{238}U που βρίσκεται στη γη στη μεγαλύτερη αφθονία και το οποίο υπόκειται σε μια σειρά 14 διασπάσεων (8 εκπομπές α και 6 β) καταλήγοντας στο σταθερό ισότοπο του μολύβδου ^{206}Pb .

1.3 Ραδιενεργές διασπάσεις

1.3.1 Διάσπαση με εκπομπή σωματιδίων α

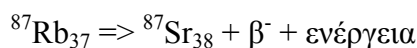
Ένα σωματίδιο α αποτελείται από δύο νετρόνια και δύο πρωτόνια, ισχυρά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Τα α σωματίδια, τα οποία είναι όμοια με τον πυρήνα του ^4He , εκπέμπονται από τους ασταθείς πυρήνες κατά την α -διάσπαση. Σ' αυτό το είδος της διάσπασης ο ατομικός αριθμός του ατόμου ελαττώνεται κατά δύο εξαιτίας της απομάκρυνσης δύο πρωτονίων, ενώ ο μαζικός αριθμός ελαττώνεται κατά τέσσερα (Σχήμα 1). Παράδειγμα μιας τέτοιας διάσπασης είναι:

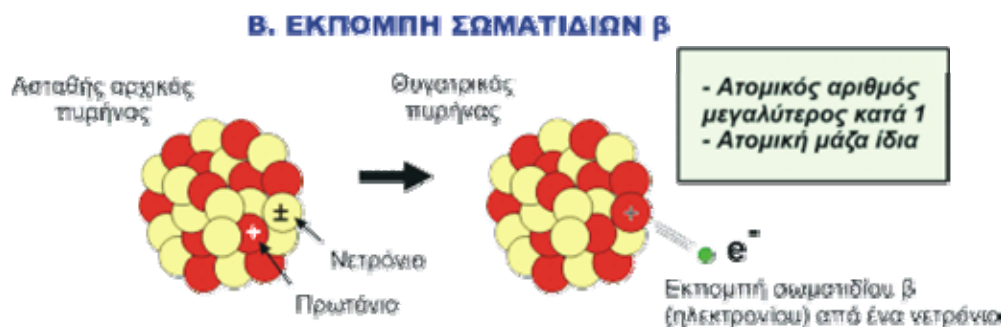


Σχήμα 2.1 Διάσπαση με εκπομπή α σωματιδίων.

1.3.2 Διάσπαση με εκπομπή σωματιδίων β

Ένα σωματίδιο β είναι ένα ηλεκτρόνιο το οποίο εκπέμπεται από τον ασταθή πυρήνα κατά τη β -διάσπαση. Επειδή το ηλεκτρόνιο θεωρείται ότι δεν έχει μάζα, η εκπομπή του δεν επηρεάζει το μαζικό αριθμό, ο ατομικός αριθμός όμως αυξάνεται κατά μία μονάδα, αφού ο αριθμός των νετρονίων αυξήθηκε κατά ένα (Σχήμα 2). Παράδειγμα β -διάσπασης αποτελεί η μετατροπή:

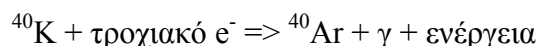




Σχήμα 2.2 Διάσπαση με εκπομπή β σωματιδίων.

1.3.3 Διάσπαση με σύλληψη ηλεκτρονίων

Διάσπαση όμως γίνεται και με τη σύλληψη ηλεκτρονίου, κατά την οποία ένα τροχιακό ηλεκτρόνιο συλλαμβάνεται από τον πυρήνα. Με τη διαδικασία αυτή το φορτίο του πυρήνα ελαττώνεται κατά μία μονάδα χωρίς όμως ουσιαστική μεταβολή της μάζας του. Παράδειγμα μιας τέτοιας διαδικασίας είναι η αντίδραση:



Στην αντίδραση αυτή, όπως και στις δύο προηγούμενες, το γ αντιπροσωπεύει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής ενέργειας, η οποία εκπέμπεται από ένα διεγερμένο πυρήνα καθώς μεταπίπτει σε μια λιγότερο διεγερμένη κατάσταση.

1.4 Ρυθμοί ραδιενεργών διασπάσεων

Ένας ραδιενεργός πυρήνας δε διασπάται αμέσως μόλις σχηματιστεί αλλά υπάρχει μια πεπερασμένη πιθανότητα να διασπαστεί μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Όσο ο συγκεκριμένος πυρήνας δε διασπάται, η πιθανότητα να διασπαστεί σε μια μετέπειτα χρονική στιγμή παραμένει σταθερή. Αν για παράδειγμα, η πιθανότητα να διασπαστεί σε 1 sec είναι 1%, αν μετά από μία ώρα ο πυρήνας δεν έχει διασπαστεί, πάλι θα έχει πιθανότητα 1% να διασπαστεί στο επόμενο sec. Πρόκειται για μια στατιστική διαδικασία η οποία ερμηνεύεται στα πλαίσια της κβαντικής θεωρίας. Μεταβολές στο φυσικό ή χημικό περιβάλλον ενός δείγματος ραδιενεργού στοιχείου (μεταβολή θερμοκρασίας, πίεσης, χημικές αντιδράσεις, κ.λ.π.) δε μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το ρυθμό διάσπασης, ενώ τα όρια των τιμών του ρυθμού αυτού για διαφορετικά νουκλίδια είναι εξαιρετικά ευρεία.

Ας υποθέσουμε ότι σε ένα δείγμα ραδιενεργού στοιχείου υπάρχουν N ραδιενεργοί πυρήνες τη χρονική στιγμή t και ότι ο αριθμός των πυρήνων που θα διασπαστεί στο επόμενο χρονικό διάστημα dt ισούται με dN . Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πυρήνων στο δείγμα, τόσο περισσότεροι πυρήνες διασπώνται κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Η μεταβολή dN στον αριθμό των πυρήνων θα είναι δηλαδή ανάλογη του N και του dt :

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt \quad \text{ή} \quad \frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \quad (1.1)$$

όπου η σταθερά λ ονομάζεται *σταθερά διάσπασης* και εξαρτάται από το είδος των νουκλιδίων. Το αρνητικό πρόσημο στις παραπάνω σχέσεις υποδηλώνει ότι ο αριθμός των πυρήνων ελαττώνεται με το χρόνο (αρνητική μεταβολή).

Η απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής dN/dt στη σχέση 1.1, ονομάζεται *ρυθμός διάσπασης* ή *ενεργότητα* του δείγματος.

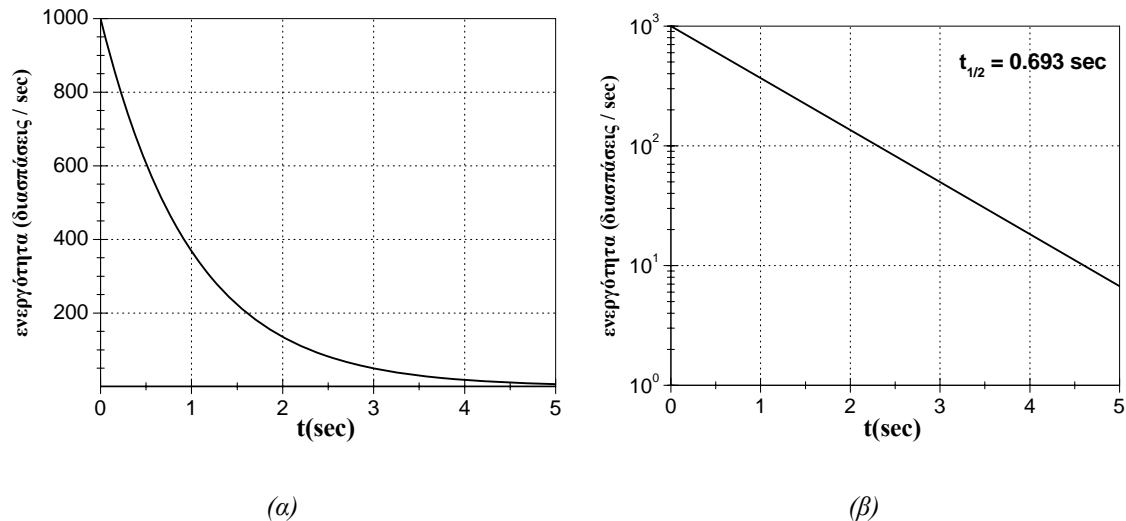
Από τη σχέση 1.1 με ολοκλήρωση προκύπτει:

$$N = N_0 e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.2)$$

όπου N_0 ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων τη χρονική στιγμή $t = 0$. Η παραπάνω μαθηματική έκφραση υποδηλώνει ότι ο αριθμός των πυρήνων σε ένα δείγμα ραδιενεργού υλικού ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο (σχήμα 1.3α).

Ο *χρόνος υποδιπλασιασμού* $t_{1/2}$ (ή *χρόνος ημιζωής*) ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να ελαττωθεί ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων στο μισό του αρχικού αριθμού N_0 . Ο χρόνος υποδιπλασιασμού συναρτήσει της σταθεράς διάσπασης λ μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 1.2 αν θέσουμε $N(t = t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$, οπότε θα προκύψει:

$$\begin{aligned} \frac{N_0}{2} &= N_0 e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} \Rightarrow \ln 2^{-1} = -\lambda \cdot t_{1/2} \Rightarrow \\ t_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \end{aligned} \quad (1.3)$$



Σχήμα 1.3. (α) Μεταβολή της ενεργότητας ενός δείγματος ραδιενεργού υλικού ως προς το χρόνο ($N_0=1000$ πυρήνες και $\lambda=1 \text{ sec}^{-1}$) (β) Η ίδια μεταβολή σε ημιλογαριθμικό χαρτί είναι ευθεία με κλίση $\kappa=-\lambda \log e$.

Η κατά μέσο όρο διάρκεια ζωής ενός πυρήνα εκφράζεται από το μέσο χρόνο ζωής που ορίζεται ως εξής:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t dN(t)}{\int_0^{\infty} dN(t)} \quad (1.4)$$

Με αντικατάσταση της 1.1 και της 1.2 στην παραπάνω σχέση προκύπτει τελικά ότι:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \text{και από την 1.3:}$$

$$\tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} = \frac{t_{1/2}}{0,693} \quad (1.5)$$

Η σταθερά της διάσπασης λ και κατά συνέπεια ο χρόνος υποδιπλασιασμού και ο μέσος χρόνος ζωής ενός πυρήνα, μπορούν εύκολα να υπολογιστούν από τη γραφική παράσταση της σχέσης 10.3 σε ημιλογαριθμικό χαρτί (σχήμα 1.3β). Λογαριθμίζοντας τη 1.2, προκύπτει ότι:

$$\log N = \log N_0 - \lambda \cdot \log e \cdot t$$

Η γραφική παράσταση δηλαδή της ενεργότητας ως προς το χρόνο σε ημιλογαριθμικό χαρτί θα είναι ευθεία της μορφής $y = \kappa \cdot x + \beta$, όπου η κλίση κ θα ισούται με:

$$\kappa = -\lambda \cdot \log e \quad (1.6)$$

Η χρησιμότητα της παραπάνω μεθόδου περιορίζεται σε ραδιενεργούς πυρήνες με μέσο χρόνο ζωής μερικών ημερών. Για ραδιενεργά ισότοπα με μεγαλύτερους χρόνους ζωής υπολογίζεται κατευθείαν η σταθερά διάσπασης λ μετρώντας την ενεργότητα λN και υπολογίζοντας τον αριθμό των ραδιενεργών πυρήνων από τη γνωστή μάζα και σύνθεση του δείγματος. Γενικά, για να είναι παρατηρήσιμος ένας μέσος χρόνος ζωής θα πρέπει να είναι από 10^{-6} sec μέχρι 10^4 χρόνια. Με ραδιενεργές μεθόδους έχει υπολογιστεί ότι η ηλικία της γης είναι περίπου $4,5 \times 10^9$ χρόνια. Στη φύση έχουν βρεθεί περίπου 340 ραδιενεργά ισότοπα από τα οποία τα 25 έχουν πολύ μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού και κατόρθωσαν να επιζήσουν μέχρι σήμερα από το σχηματισμό της γης.

1.5 Μονάδες μέτρησης ραδιενέργειας

Η βασική μονάδα μέτρησης της ενεργότητας είναι το Curie (Ci) που είναι ίσο με τη ραδιενέργεια που εκπέμπεται από ένα καθαρό ραδιενεργό δείγμα με μέσο ρυθμό αποδιέγερσης 3.7×10^{10} διασπάσεις ανά sec. Ο ορισμός αυτός προέρχεται ιστορικά από το γεγονός ότι ο προηγούμενος ρυθμός αντιστοιχεί περίπου στο ρυθμό αποδιεγέρσεων που εμφανίζει 1 gr ^{226}Ra . Ακίνδυνες πηγές ραδιενέργειας σαν κι αυτές που χρησιμοποιούνται στο φοιτητικό εργαστήριο ή για τη βαθμονόμηση ανιχνευτών ακτινοβολίας είναι της τάξης των μCi . Αντίθετα, πηγές ακτινοβολίας γ της τάξης των kCi χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σήμερα στη ραδιοθεραπεία, ενώ ακόμα μεγαλύτερες πηγές, της τάξης των Mci , σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Το Ci είναι σχετικά μεγάλη μονάδα, οπότε εναλλακτικά χρησιμοποιείται ως μονάδα ραδιενέργειας το Becquerel (Bq) που ισούται με μία διάσπαση ανά sec. Επομένως

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι φυσικές διαστάσεις μιας πηγής ορισμένης ενεργότητας, εξαρτώνται από το μέσο χρόνο ζωής της μετάπτωσης που την προκαλεί. Η *ειδική ραδιενέργεια* (ενεργότητα) μιας πηγής, δηλαδή η ραδιενέργεια ανά γραμμάριο υλικού της πηγής δίνεται από την έκφραση:

$$r = \frac{\lambda N}{m} = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{A_0}{A} \quad (1.7)$$

όπου m είναι η μάζα της πηγής, A_0 ο αριθμός του Avogadro και A το ατομικό βάρος του υλικού. Η μάζα επομένως μιας πηγής με ενεργότητα 1 Ci θα δίνεται από την έκφραση:

$$m = \frac{\lambda N}{A_0} A\tau = 6,14 \times 10^{-14} A\tau = 8,86 \times 10^{-14} A \cdot t_{1/2} \quad (1.8)$$

Έτσι μια πηγή καθαρού ουρανίου ^{235}U ($T_{1/2}=7,07 \times 10^8$ y) με ραδιενέργεια 1 Ci έχει μάζα περίπου 500 kg, ενώ πηγή ^{11}C ($T_{1/2}=20$ min) με την ίδια ενεργότητα έχει μάζα μόνο $1,2 \times 10^{-9}$ gr.

1.6 Βιολογικές επιπτώσεις της ραδιενέργειας

Ο άνθρωπος βρίσκεται συνεχώς εκτεθειμένος σε ραδιενέργεια που προέρχεται από την κοσμική ακτινοβολία και σε μικρότερο ποσοστό από τα ραδιοϊσότοπα που απαντώνται στη φύση. Η ραγδαία ανάπτυξη της πυρηνικής τεχνολογίας τον περασμένο αιώνα, τόσο στην παραγωγή ενέργειας όσο και στην πολεμική τέχνη, έχει αυξήσει αισθητά το επίπεδο ραδιενέργειας που δέχεται ο πληθυσμός στη γη. Οι βιολογικές επιπτώσεις της ραδιενέργειας μετρώνται από την ισχύ της να προκαλεί ιονισμό στον αέρα και στο βιολογικό ιστό. Καθώς σωματίδια α , β ή γ διέρχονται μέσα από την ύλη, χάνουν ενέργεια προκαλώντας τη διάσπαση των μοριακών δεσμών και τη δημιουργία ιόντων (*ιονίζουσα ή ιοντίζουσα ακτινοβολία*). Το αποτέλεσμα της δράσης της ραδιενέργειας στους βιολογικούς ιστούς εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας καθώς και το χρόνο έκθεσης και μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ασθένειες ή και το θάνατο με μια ποικιλία μηχανισμών, μεταξύ των οποίων είναι η μαζική καταστροφή των κυττάρων, μεταβολές του γενετικού υλικού και καταστροφή των συστατικών του μυελού των οστών που παράγουν ερυθρά αιμοσφαίρια.

Γενικά ως *δόση* ορίζεται η ενέργεια που αποθηκεύεται σ' ένα γραμμάριο της ύλης από κάθε είδος ακτινοβολίας. Ως *έκθεση* ενός σώματος σε ακτινοβολία ορίζεται το σύνολο των ηλεκτρικών φορτίων που παράγονται κατά την αλληλεπίδραση των φωτονίων με τα μόρια του αέρα ορισμένης μάζας. Ως μονάδα έκθεσης ορίζεται το Roentgen (R). Αρχικά βέβαια το Roentgen ορίστηκε ως μονάδα δόσης για τις ακτίνες X, ώστε να τιμηθεί ο θεμελιωτής των ακτίνων X. Ωστόσο, το 1973 ο ορισμός αυτός τροποποιήθηκε, ώστε να ισχύει και για τις ακτίνες γ . Ως ένα Roentgen ορίζεται η ποσότητα εκείνη των ακτίνων γ ή X, οι οποίες παράγουν σ' ένα κυβικό εκατοστό

ατμοσφαιρικού αέρα πίεσης μιας ατμόσφαιρας και θερμοκρασίας 0 °C (δηλαδή 0,001293 γραμμάρια αέρα) συνολικά θετικά ή αρνητικά ηλεκτρικά φορτία μιας ηλεκτροστατικής μονάδας φορτίου.

Από τον παραπάνω ορισμό του Roentgen που αργότερα ορίστηκε ως μονάδα έκθεσης, και από το γεγονός ότι μια ηλεκτροστατική μονάδα (esu) ισούται με $3,33 \times 10^{-10}$ Coulomb βρίσκουμε ότι :

$$1 \text{ Roentgen} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Coul/kg}$$

Στη συνέχεια παρατίθενται τα μεγέθη και οι αντίστοιχες μονάδες που χρησιμοποιούνται για τις βιολογικές επιπτώσεις της ραδιενέργειας.

Ρυθμός έκθεσης

Ως ρυθμός έκθεσης ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο ελευθερώνεται ένα ηλεκτρικό φορτίο σε μια ορισμένη μάζα, δηλαδή είναι η έκθεση στη μονάδα του χρόνου. Μονάδες μέτρησης του ρυθμού έκθεσης ορίστηκαν οι εξής: R/sec και mR/h.

Απορροφούμενη δόση

Ως απορροφούμενη δόση ορίζεται η ενέργεια των ακτινοβολιών που απορροφάται από μια ορισμένη ποσότητα ύλης, που έχει εκτεθεί στην επίδραση των παραπάνω ακτινοβολιών. Μονάδα μέτρησης της απορροφούμενης δόσης ορίστηκε το rad. Το rad αντιστοιχεί σε ενέργεια ακτινοβολίας 100 εργίων, η οποία έχει απορροφηθεί από ένα γραμμάριο της ύλης στην οποία εισχωρεί η παραπάνω ακτινοβολία. Δηλαδή $1 \text{ rad} = 100 \text{ έργια/γραμμάριο}$. Για να καταλάβουμε τι είναι έργιο, πρέπει να θυμηθούμε ότι όταν ανυψώνουμε ένα κιλό βάρος κατά ένα μέτρο, παράγουμε έργο 100 εκατομμύρια έργια. Το έργιο είναι μονάδα έργου στο σύστημα c.g.s. Άλλη μονάδα της απορροφούμενης δόσης είναι το Grey (Gy). Το Gy είναι πολλαπλάσια μονάδα του rad και συγκεκριμένα 100 φορές μεγαλύτερη από ένα rad, δηλαδή, $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J/kg}$.

Το Kerma είναι ένα ανάλογο μέγεθος που αποτελεί το άθροισμα των κινητικών ενεργειών ΔE των φορτισμένων σωματιδίων, που παράγονται από τις αλληλεπιδράσεις μη ιονιστικών απευθείας ακτινοβολιών σ' ένα στοιχειώδη όγκο υλικού με μάζα Δm , προς τη μάζα αυτή. Δηλαδή: $\text{kerma} = \Delta E / \Delta m \text{ (erg/gr)}$.

Συγκεκριμένα το Kerma αναφέρεται στις ακτινοβολίες που δεν έχουν ηλεκτρικό φορτίο, όπως είναι τα φωτόνια και τα νετρόνια και επομένως δεν μπορούν να ιονίσουν την ύλη απευθείας.

Ρυθμός απορροφούμενης δόσης

Ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης αποτελεί την απορροφούμενη δόση στη μονάδα του χρόνου. Μονάδες μέτρησης της απορροφούμενης δόσης ορίστηκαν οι εξής: rad/hr, rad/min, Gray/min κ.λ.π

Για τον υπολογισμό του ρυθμού της απορροφούμενης δόσης διακρίνουμε δύο περιπτώσεις :

A) Στην περίπτωση που η ραδιενεργός πηγή είναι εξωτερικά του οργανικού ιστού που ακτινοβολείται, ο ρυθμός δόσης της μονοενεργειακής ακτινοβολίας γ υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

Ρυθμός απορροφούμενης δόσης από ιστό που ακτινοβολείται από εξωτερική πηγή = $0,0576IE \mu/r$ (mrad/hr), όπου $I=I_0x$ (παράγοντα εξασθένησης) και I_0 είναι η ένταση της δέσμης στην επιφάνεια πρόσπτωσης σε photons/cm²sec.

Είναι δηλαδή τα Μπεκερέλ που φθάνουν σ' ένα τετραγωνικό εκατοστό επιφάνειας του απορροφητή. E είναι η ενέργεια της μονοενεργειακής ακτινοβολίας γ σε MeV. Η ενέργεια αυτή δίνεται σε πίνακες για τα διάφορα ραδιοϊσότοπα. M είναι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού του απορροφητή και δίνεται σε πίνακες. P είναι η φυσική πυκνότητα σε gr/cm³ του ιστού του απορροφητή και δίνεται σε πίνακες. μ/r είναι ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης σε cm²/gr του απορροφητή και δίνεται σε πίνακες.

B) Στην περίπτωση που η ραδιενεργός πηγή δηλαδή κάποιο ραδιοϊσότοπο έχει μπει μέσα στον οργανισμό, είτε με την αναπνοή, είτε με την τροφή, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες γιατί σχεδόν όλο το ποσό της ενέργειας των φορτισμένων σωματιδίων, κυρίως ακτινοβολίες β και α και ένα μέρος των ακτινοβολιών γ εναποθηκεύεται μέσα στον οργανικό ιστό που περιβάλλει το ραδιοϊσότοπο. Το υπόλοιπο της ενέργειας των ακτινοβολιών γ απορροφάται από τους γειτονικούς ιστούς. Ο ρυθμός δόσης στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται από τον εξής τύπο: ρυθμός απορροφούμενης δόσης από ιστό που ακτινοβολείται από εσωτερική πηγή = $0,000592 C(t)E1/M$ (rad/sec), όπου $C(t)$ είναι η συνολική ραδιενέργεια του ισοτόπου σε μικροΚιουρί (μCi) μέσα στον ιστό κατά την χρονική στιγμή t . Ως αρχή του χρόνου μπορεί να θεωρηθεί η στιγμή που έχει χορηγηθεί και αφομοιωθεί το ραδιοϊσότοπο. E είναι η ενέργεια που εκπέμπεται για κάθε διάσπαση σε MeV. Για την περίπτωση φορτισμένου σωματιδίου ακτινοβολίας β . Ως E λαμβάνεται η μέση ενέργεια ανά διάσπαση και συμβολίζεται με E . Η ενέργεια απορροφάται εξ

ολοκλήρου από μια μικρή περιοχή του ιστού στο μέρος που περιβάλλει το ραδιοϊσότοπο. Μ είναι η μάζα του ιστού που απορροφάει την ενέργεια σε γραμμάρια.

Όσον αφορά τους παραπάνω τύπους, πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η ενέργεια που εκπέμπει το ραδιοϊσότοπο απορροφάται εξ ολοκλήρου από τον ιστό. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ένα μέρος της ακτινοβολίας γ δεν αποθηκεύεται μέσα στον ιστό αλλά διαφεύγει.

Σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα (RBE)

Το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των ακτινοβολιών με την ύλη είναι ο ιονισμός και διέγερση των μορίων τα οποία αντιδρούν μεταξύ τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Τα διάφορα είδη ακτινοβολιών παράγουν διαφορετικά βιολογικά αποτελέσματα και βλάβες για την ίδια εναπόθεση ενέργειας σ' ένα γραμμάριο ιστού.

Για τη διερεύνηση των βιολογικών αποτελεσμάτων είναι απαραίτητο να γίνουν γνωστές οι αλληλεπιδράσεις αυτών των ακτινοβολιών με την ύλη. Το βιολογικό αποτέλεσμα που θα προκύψει μετά την ακτινοβολήση του ιστού εξαρτάται τόσο από το ποσό της ενέργειας που απορρόφησε ο ιστός στη μονάδα όγκου και μάζας, αλλά και από τον τρόπο που η ενέργεια αυτή διανέμεται στον ιστό από τα σωματίδια της ακτινοβολίας.

Σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα είναι ένας παράγοντας που προσδιορίζει τη διαφορετική βιολογική αποτελεσματικότητα των διαφόρων ακτινοβολιών με διαφορετική ενέργεια μολονότι η απορροφούμενη δόση είναι η ίδια. Με άλλα λόγια, για την ίδια απορροφούμενη δόση διαφόρων ακτινοβολιών με διαφορετική ενέργεια, τα βιολογικά αποτελέσματα είναι διαφορετικά. Π.χ. ακτινοβολούμε έναν οργανικό ιστό με ακτίνες X ορισμένης ενέργειας EX για ορισμένο χρονικό διάστημα και λαμβάνουμε τη σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα αυθαίρετα ίση με ένα. Ακολουθεί επανάληψη του πειράματος με ένα άλλο είδος ακτινοβολίας για το ίδιο χρονικό διάστημα. Αν στη δεύτερη περίπτωση βρεθεί ότι έχουμε το ίδιο σχετικό βιολογικό αποτέλεσμα μόνο με τη μισή δόση που απορροφήθηκε στο πρώτο πείραμα, τότε είναι φανερό ότι η δεύτερη ακτινοβολία είναι δύο φορές πιο αποτελεσματική από την πρώτη ακτινοβολία.

Η σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα εξαρτάται από τη δόση, το είδος του ιστού και μερικές φορές από το ρυθμό δόσης. Δεν υπάρχει μια ιδιαίτερη σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα για μια ακτινοβολία ορισμένου τύπου και ορισμένης ενέργειας.

Σήμερα η σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα χρησιμοποιείται με επιτυχία στη ραδιοβιολογία ως παράμετρος για το σκοπό προστασίας από τις ακτινοβολίες. Παρόλα αυτά η σημασία αυτού του μεγέθους RBE περιορίζεται από τις δυσκολίες που προκύπτουν για τη συσχέτιση δύο διαφορετικών ακτινοβολιών με ένα και μόνο παράγοντα .

Ως σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα, για ένα ορισμένο είδος ακτινοβολίας , μπορεί να ορισθεί ο λόγος της απορροφούμενης δόσης των ακτίνων X καθορισμένης έντασης (από πρότυπη λυχνία 250 kV), οι οποίες παράγουν ένα ορισμένο αποτέλεσμα προς την απορροφούμενη δόση της εξεταζόμενης ακτινοβολίας που θα προκαλέσει το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα με τις ακτίνες X.

Οι τιμές του μεγέθους της σχετικής βιολογικής αποτελεσματικότητας για τα διάφορα είδη ακτινοβολιών δίνονται σε ειδικούς πίνακες. Έτσι για τα σωματίδια α και τα ταχεία νετρόνια η RBE παίρνει την τιμή 10, για τα θερμικά νετρόνια παίρνει την τιμή 3, για τα ηλεκτρόνια ανάλογα με την ενέργειά τους παίρνει την τιμή από 1 ως 1,7 και για τις ακτίνες X και γ παίρνει την τιμή 1.

Βιολογική δόση (BD)

Βιολογική δόση ονομάζεται το μέγεθος που προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε την απορροφούμενη δόση D με την σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα RBE που χαρακτηρίζει μια ακτινοβολία:

Βιολογική δόση=απορροφούμενη δόση*σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα

REM (Roentgen Equivalent Man)

Ένα REM είναι η απορροφούμενη δόση μιας ακτινοβολίας που προκαλεί το αυτό βιολογικό αποτέλεσμα μ' ένα rad ακτίνων γ ή X.

Έτσι προκύπτει ότι η βιολογική δόση BD σε rem (δόση ακτινοβολήσης ανθρώπου) ισούται με τη σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα RBE της ακτινοβολίας επί την απορροφούμενη δόση D σε rad, δηλαδή :

$$BD(\text{rem})=RBE \cdot D(\text{rad})$$

Ρυθμός βιολογικής δόσης

Ρυθμός βιολογικής δόσης είναι η βιολογική δόση που παίρνουμε στη μονάδα του χρόνου. Ρυθμός βιολογικής δόσης = $d \cdot BD/dt = RBE \cdot dD/dt$,

Η συνηθισμένη μονάδα του ρυθμού βιολογικής δόσης είναι: Mrem=0,001 rem.

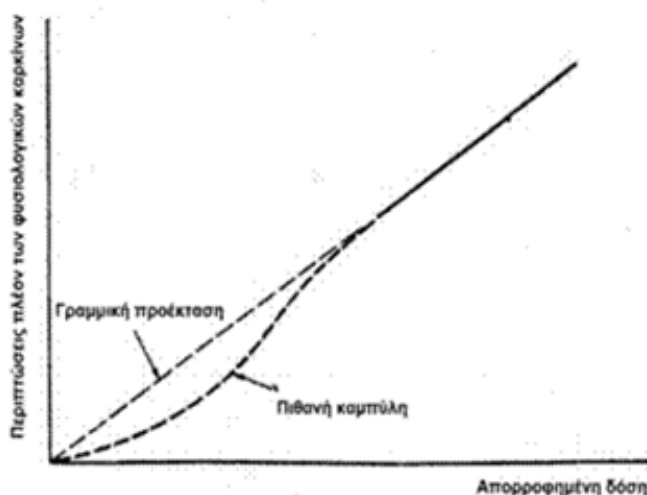
Ισοδύναμη δόση (Deq)

Ισοδύναμη δόση είναι το μέγεθος που προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε την απορροφούμενη δόση με διάφορους παράγοντες τροποποίησης.

Ισοδύναμη δόση=Απορροφούμενη δόση * γινόμενο παραγόντων τροποποίησης

Ρυθμός ισοδύναμης δόσης

Ρυθμός ισοδύναμης δόσης είναι συνήθως οι εξής : Mrem/hr, rem/sec, Sv/m κ.λ.π. Για την εύρεση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης από εξωτερική ακτινοβολή με νετρόνια χρησιμοποιούνται ειδικές γραφικές παραστάσεις . Σε αυτές τις καμπύλες δίνεται ο αριθμός νετρονίων που περνάει από ένα τετραγωνικό εκατοστό σ' ένα δευτερόλεπτο που χρειάζονται για να δώσουν ρυθμό ισοδύναμης δόσης 1 mrem/h ως συνάρτηση της ενέργειας των νετρονίων



Σχήμα 2.4 Συσχέτιση απορροφούμενης δόσης και των περιπτώσεων καρκίνου.

Ενεργή δόση

Η ενεργή δόση ορίζεται ως η μέση ισοδύναμη δόση που δέχεται ένας ιστός ή όργανο του ανθρώπινου σώματος κατά την ακτινοβολήση πολλαπλασιάζεται επί ένα συντελεστή βαρύτητας, που είναι χαρακτηριστικός για το συγκεκριμένο στο ή όργανο. Για τον κάθε ιστό ή όργανο του σώματος που ακτινοβολείται αντιστοιχεί κι ένα τέτοιο γινόμενο της μέσης ισοδύναμης δόσης επί το συντελεστή βαρύτητας. Το άθροισμα όλων αυτών των γινομένων δίνει την ενεργή δόση που δέχθηκε ο ανθρώπινος οργανισμός.

Ομαδική ισοδύναμη δόση

Ομαδική ισοδύναμη δόση είναι η συνολική ισοδύναμη δόση που παίρνει ένα μεγάλο πλήθος ατόμων.

1.7 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας α , β και γ με την ύλη

Ο Rutherford ανακάλυψε ότι τουλάχιστον δύο συστατικά είναι παρόντα στις ραδιενεργές ακτινοβολίες: τα άλφα σωματίδια, που διαπερνούν μόνο μερικά χιλιοστά του εκατοστού το αλουμίνιο, και τα βήτα σωματίδια, τα οποία είναι σχεδόν 100 φορές πιο διαπεραστικά. Τα επόμενα πειράματα στα οποία υποβλήθηκαν οι ραδιενεργές ακτινοβολίες, ήταν στα μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία που αποκάλυψαν την παρουσία ενός τρίτου συστατικού, τις ακτίνες γάμμα, οι οποίες βρέθηκαν να είναι πιο διαπεραστικές από τα βήτα σωματίδια. Σε ένα ηλεκτρικό πεδίο η πορεία των βήτα σωματιδίων εκτρέπεται πολύ προς τον θετικό ηλεκτρικό πόλο, και αυτή των άλφα σωματιδίων σε μικρότερη έκταση όμως προς τον αρνητικό πόλο, ενώ οι ακτίνες γάμμα δεν εκτρέπονται καθόλου. Επομένως, τα βήτα σωματίδια είναι φορτισμένα αρνητικά, τα άλφα είναι θετικά και μάλιστα είναι βαρύτερα από τα βήτα σωματίδια λόγω της μικρής απόκλισης, και οι ακτίνες γάμμα είναι ουδέτερες.

Η ανακάλυψη ότι το ράδιο αποσυντέθηκε για να παραγάγει το ραδόνιο απέδειξε καθοριστικά ότι η ραδιενεργός διάσπαση συνοδεύεται από μια αλλαγή στη χημική φύση του αποσυντιθέμενου στοιχείου. Τα πειράματα στην εκτροπή των άλφα σωματιδίων από ένα ηλεκτρικό πεδίο έδειξαν ότι η σχέση του ηλεκτρικού φορτίου προς τη μάζα αυτών των σωματιδίων (q/m), είναι η μισή περίπου από τον λόγο q/m του ιόντος του υδρογόνου. Οι φυσικοί υπέθεσαν ότι τα σωματίδια άλφα θα μπορούσαν να έχουν διπλό φορτίο όπως τα ιόντα του ηλίου (άτομα ηλίου με αφαίρεση δύο ηλεκτρονίων). Το ιόν του ηλίου έχει περίπου τέσσερις φορές τη μάζα του ιόντος υδρογόνου, το οποίο σημαίνει ότι ο λόγος φορτίου προς μάζα (q/m) θα ήταν πράγματι ο μισός από αυτόν του ιόντος του υδρογόνου.

Αυτή η υπόθεση αποδείχθηκε από τον Rutherford όταν επέτρεψε σε μια ουσία που εξέπεμπε σωματίδια άλφα, να αποσυντεθεί κοντά σε ένα δοχείο με κενό αέρος, φτιαγμένο από λεπτό γυαλί. Τα άλφα σωματίδια ήταν σε θέση να διαπεράσουν το γυαλί και τότε παγιδεύτηκαν μέσα στο γυάλινο δοχείο, και μέσα σε μερικές ημέρες καταδείχθηκε η παρουσία του στοιχειώδους ηλίου μέσω ενός φασματομέτρου. Τα βήτα σωματίδια αποδείχθηκαν στη συνέχεια πως πρέπει να είναι ηλεκτρόνια, και οι ακτίνες γάμμα ότι αποτελούν μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, με την ίδια φύση με τις ακτίνες X, αλλά πολύ μεγαλύτερης ενέργειας.

Οι ακτινοβολίες α είναι ιονισμένοι πυρήνες ηλίου με διπλό θετικό φορτίο και επειδή έχουν μεγάλη μάζα είναι πολύ λίγο διεισδυτικές. Ένα φύλλο χαρτιού μπορεί να σταματάει τις ακτινοβολίες αυτές, που στον αέρα δεν μπορούν να διατρέξουν

διάστημα μεγαλύτερο από 2 εκατοστά. Οι ακτινοβολίες α διαθλώνται πολύ λίγο όταν συγκρουστούν με τα ηλεκτρόνια των ατόμων. Έτσι κινούνται σχεδόν ευθύγραμμα μέσα στην ύλη. Η ανίχνευσή τους γίνεται με βάση τον ιονισμό ή τη διέγερση που προκαλούν. Η ενέργεια που αποδίδουν είναι μεγάλη σε πολύ μικρό όγκο, πράγμα που προκαλεί αρκετή θέρμανση. Ως πηγή των σωματιδίων α αναφέρεται το πλουτόνιο.

Οι ακτινοβολίες β είναι δέσμη ηλεκτρονίων θετικού ή αρνητικού φορτίου (ποζιτρόνια, νεγκατρόνια) με αμελητέα μάζα και συνεχή κατανομή ενέργειας. Προκύπτουν είτε από το μετασχηματισμό ενός πρωτονίου σε νετρόνιο, ποζιτρόνιο και νετρόνιο, είτε από το μετασχηματισμό ενός νετρονίου σε πρωτόνιο, ηλεκτρόνιο και αντινετρόνιο. Ένωση ποζιτρονίου με νεγκατρόνιο έχει ως αποτέλεσμα τη γένεση δύο φωτονίων που κινούνται αντίθετα .

Οι ακτινοβολίες αυτές στον αέρα δεν μπορούν να διατρέξουν διάστημα μεγαλύτερο από 50 εκατοστά και ένα ξύλινο διάφραγμα πάχους 2 εκατ. μπορεί να τις σταματήσει .

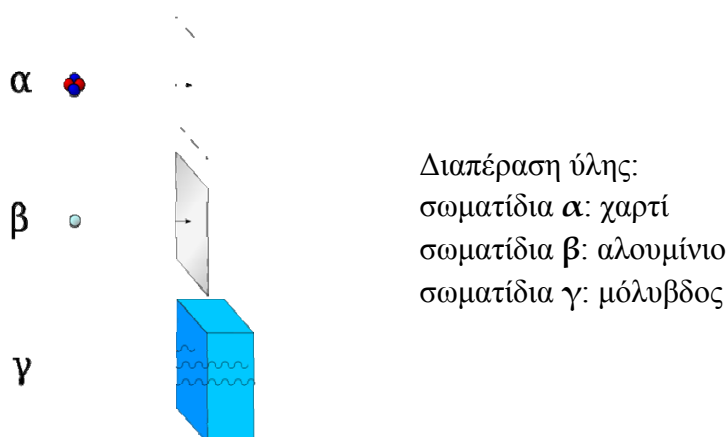
Τα σωματίδια β μπορούν να διεγείρουν ή να ιονίσουν την ύλη και να δώσουν φωτόνια (Bremsstrahlung) ύστερα από απότομη μεταβολή της ταχύτητάς τους. Μέσα στην ύλη κινούνται σε πολύπλοκες τροχιές ζιγκ ζαγκ. Οι ακτίνες β εξασθενούν καθώς διασχίζουν την ύλη και η εξασθένιση αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί από ένα γραμμικό συντελεστή απορρόφησης $\mu\beta$. Οι διεγερμένοι πυρήνες πολλών ραδιοϊσοτόπων είναι πηγές ακτινοβολιών β . Εδώ αναφέρω ότι το στρόντιο -90 εκπέμπει μόνο ακτινοβολίες β .

Η εκπομπή ακτίνων γ εμφανίζεται συνήθως σε συνδυασμό με την άλφα και την βήτα εκπομπή. Οι ακτίνες γάμμα δεν φέρουν κανένα φορτίο ή μάζα και κατά συνέπεια η εκπομπή των ακτίνων γάμμα από έναν πυρήνα δεν οδηγεί σε καμιά αλλαγή στις χημικές ιδιότητες του πυρήνα αλλά μόνο στην απώλεια ενός ορισμένου ποσού ακτινοβόλου ενέργειας. Η εκπομπή των ακτίνων γάμμα οφείλεται σε μια αποδιέγερση του πυρήνα που βρισκόταν σε μια ασταθή κατάσταση, λόγω των εκπομπών άλφα ή βήτα από τον πυρήνα. Το αρχικό άλφα ή βήτα σωματίδιο και η επακόλουθη εκπομπή ακτίνων γάμμα εκπέμπονται σχεδόν ταυτόχρονα.

Μερικές μόνο περιπτώσεις είναι γνωστές για την εκπομπή άλφα και βήτα ακτινοβολίας χωρίς να συμμετέχει σε αυτές η εκπομπή ακτίνων γάμμα, επίσης είναι γνωστή εκπομπή αποκλειστικά γάμμα ακτινοβολίας από ορισμένα ισότοπα. Η καθαρή εκπομπή γάμμα εμφανίζεται όταν υπάρχει ένα ισότοπο με δύο διαφορετικές μορφές, που αποκαλούνται πυρηνικά ισομερή έχοντας τους ίδιους ατομικούς

αριθμούς και τους μαζικούς αριθμούς αλλά διαφέρουν στην ενέργεια. Η εκπομπή των ακτίνων γάμμα συνοδεύει τη μετάβαση του υψηλού-ενεργειακού ισομερούς στην χαμηλή-ενεργειακή μορφή.

Τα σωματίδια α , β και οι ακτινοβολίες γάμμα εκπέμπονται από τους μητρικούς πυρήνες τους με τεράστιες ταχύτητες. Τα άλφα σωματίδια επιβραδύνονται και σταματούν καθώς περνούν μέσω της ύλης, πρώτιστα μέσω της αλληλεπίδρασης τους με τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε εκείνη την ύλη. Επιπλέον, τα περισσότερα από τα άλφα σωματίδια εκπεμπόμενα από την ίδια ουσία εκτινάσσονται με σχεδόν ίδια ταχύτητα. Κατά συνέπεια σχεδόν όλα τα άλφα σωματίδια από το πολώνιο- 210 ταξιδεύουν 3,8 cm μέσω του αέρα πριν να σταματήσουν εντελώς, και εκείνα από το πολώνιο- 212 ταξιδεύουν 8,5 cm υπό τους ίδιους όρους. Η μέτρηση της απόστασης που διανύεται από τα άλφα σωματίδια χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τα ισότοπα.



Τα βήτα σωματίδια εκτινάσσονται με πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες από τα άλφα σωματίδια, και έτσι θα διαπεράσουν αρκετή περισσότερη ύλη, αν και ο μηχανισμός με τον οποίο αυτά σταματούν είναι ουσιαστικά παρόμοιος. Αντίθετα από τα άλφα σωματίδια, όμως, τα βήτα σωματίδια εκπέμπονται με πολλές διαφορετικές ταχύτητες, και οι βήτα εκπομπές πρέπει να διακριθούν μεταξύ τους από τις χαρακτηριστικές μέγιστες και μέσες ταχύτητες των βήτα σωματιδίων τους. Η κατανομή στις ενέργειες βήτα-σωματιδίων (ταχυτήτων) απαίτησε την υπόθεση της ύπαρξης, ενός σωματιδίου χωρίς μάζα αποκαλούμενο νετρίνο. Η εκπομπή νετρίνο συνοδεύει όλες τις διασπάσεις βήτα.

Οι ακτίνες γάμμα έχουν ακτίνα δράσης αρκετές φορές μεγαλύτερη από αυτήν των βήτα σωματιδίων και μπορούν σε μερικές περιπτώσεις να περάσουν μέσω αρκετών cm φύλλων μολύβδου. Τα άλφα και βήτα σωματίδια, κατά τη διέλευσή τους μέσα από την ύλη, προκαλούν τον σχηματισμό πολλών ιόντων. Αυτός ο ιονισμός είναι ιδιαίτερα εύκολο να παρατηρηθεί όταν η ύλη είναι αεριώδης. Οι ακτίνες γάμμα δεν έχουν φορτίο, και ως εκ τούτου δεν μπορούν να προκαλέσουν τέτοιο ιονισμό τόσο εύκολα. Οι βήτα ακτίνες παράγουν το 1/100 έως το 1/200 του ιονισμού που παράγεται από τις άλφα ακτίνες ανά εκατοστόμετρο της διαδρομής τους στον αέρα. Οι ακτίνες γάμμα παράγουν περίπου το 1/100 του ιονισμού των βήτα ακτίνων.

Ο μετρητής Geiger-Mueller αλλά και άλλοι θάλαμοι ιονισμού, που είναι βασισμένοι σε αυτές τις αρχές, χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει τις ποσότητες μεμονωμένων άλφα, βήτα, και ακτίνων γάμμα, και ως εκ τούτου τα απόλυτα ποσοστά αποσύνθεσης των ραδιενεργών ουσιών. Μια μονάδα της ραδιενέργειας, το curie, είναι βασισμένη στο ποσοστό αποσύνθεσης του Ra-226, το οποίο είναι 37 δισεκατομμύρια αποσυνθέσεις ανά δευτερόλεπτο και ανά γραμμάριο του ραδίου.

Υπάρχουν και άλλοι τρόποι ραδιενεργού αποσύνθεσης εκτός από τις τρεις προαναφερθείσες. Μερικά ισότοπα είναι ικανά να εκπέμπουν ποζιτρόνια τα οποία είναι ίδια με τα ηλεκτρόνια αλλά με αντίθετο φορτίο. Η διαδικασία εκπομπής ποζιτρονίου είναι συνήθως ταξινομημένη ως βήτα-διάσπαση και καλείται βήτα-συν εκπομπή για να την διακρίνει κάποιος από την πιο κοινή εκπομπή των αρνητικών ηλεκτρονίων. Η εκπομπή ποζιτρονίων ολοκληρώνεται πιθανά μέσω της μετατροπής, στον πυρήνα, ενός πρωτονίου σε ένα νετρόνιο, με συνέπεια μια μείωση του ατομικού αριθμού κατά μια μονάδα.

Ένας άλλος τρόπος αποσύνθεσης, γνωστός ως σύλληψη K-ηλεκτρονίου, αποτελείται από την σύλληψη ενός ηλεκτρονίου από τον πυρήνα, ακολουθούμενη από το μετασχηματισμό ενός πρωτονίου σε ένα νετρόνιο. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι επίσης μια μείωση του ατομικού αριθμού κατά μια μονάδα. Η διαδικασία είναι αισθητή μόνο επειδή η αφαίρεση του ηλεκτρονίου από την τροχιά του οδηγεί στην εκπομπή μιας ακτίνας-X.

Διάφορα ισότοπα, ειδικότερα το ουράνιο-235 και διάφορα ισότοπα των τεχνητών υπερουρανίων στοιχείων είναι σε θέση με μια διαδικασία αυθόρμητης διάσπασης, στην οποία ο πυρήνας διασπάται σε δύο τμήματα. Στα μέσα της δεκαετίας του '80 ένας μοναδικός τρόπος διάσπασης παρατηρήθηκε, στον οποίο τα ισότοπα του

ραδίου με μάζες 222, 223, και 224 εκπέμπουν πυρήνες άνθρακα-14 παρά να αποσυντεθούν όπως συνήθως γίνεται με την εκπομπή της άλφα ακτινοβολίας.

Η ένταση των ακτίνων γ , όταν συγκρούονται με την ύλη και τη διασχίζουν, ελαττώνεται εκθετικά σύμφωνα με το νόμο :

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1.9)$$

όπου I_0 είναι η ένταση της προσπίπτουσας στην ύλη ακτινοβολίας γ , I είναι η ένταση σε βάθος x της ύλης και μ είναι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης. Ως πηγή των ακτινοβολιών γ μπορούν να θεωρηθούν τα περισσότερα από τα ραδιενεργά ισότοπα, τα οποία μπορούν να εκπέμπουν φωτόνια διαφόρων ενεργειών από τους διεγερμένους πυρήνες, οι οποίοι έτσι καταλήγουν σε σταθερότερη κατάσταση. Πολλά από τα ραδιενεργά στοιχεία εκπέμπουν συγχρόνως γ και β ακτινοβολίες. Τέτοια είναι το καίσιο 134, καίσιο 137, το ιώδιο 131 κ.λ.π.

Γενικά οι παραπάνω ακτινοβολίες θα μπορούσαν να καταταγούν στους εξής δύο τύπους:

A) ακτινοβολίες σωματιδιακής φύσης, όπου ανήκουν οι ακτινοβολίες α και β

B) ακτινοβολίες ηλεκτρομαγνητικής φύσης, όπου ανήκουν οι ακτινοβολίες γ .

Συνοψίζοντας τις ιδιότητες των τριών ειδών των ραδιενεργών ακτινοβολιών, μπορούμε να πούμε ότι οι ακτίνες άλφα έχουν ασθενή διεισδυτική ικανότητα εφόσον μπορούν να απορροφηθούν ακόμα και μέσα από λίγα φύλλα χαρτιού. Οι ακτίνες αυτές προκαλούν σημαντικό ιονισμό των αερίων μέσα από τα οποία διέρχονται λόγω είτε της μεγάλης σχετικής μάζας τους είτε της υψηλής ταχύτητάς τους.

Οι ακτίνες βήτα είναι περισσότερο διεισδυτικές από τις άλφα, καθώς για την απορρόφησή τους απαιτούνται φύλλα αργιλίου πάχους λίγων χιλιοστομέτρων

1.8 Φυσική και τεχνητή ραδιενέργεια

Τα ραδιενεργά στοιχεία μπορούν να ταξινομηθούν σε ορισμένες ακολουθίες, οι οποίες ονομάζονται οικογένειες. Είναι φυσικό ότι τα μέλη κάθε οικογένειας έχουν μαζικούς αριθμούς που ανήκουν σε ένα γενικό τύπο. Οι οικογένειες αρχίζουν με ένα στοιχείο που έχει μεγάλο χρόνο ζωής και καταλήγουν σε σταθερά ισότοπα. Από τις τέσσερις οικογένειες οι τρεις περιλαμβάνουν τα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία και η τέταρτη είναι η τεχνητή ραδιενεργός οικογένεια του ποσειδωνίου. Οι οικογένειες των φυσικών ραδιενεργών στοιχείων είναι: α) η οικογένεια του θορίου β) η οικογένεια

του ακτινίου και γ) η οικογένεια του ουρανίου, οι οποίες και καταλήγουν σε σταθερά ισότοπα του μολύβδου, ενώ η οικογένεια του ποσειδωνίου καταλήγει σε βισμούθιο.

Όλα τα φυσικά εμφανιζόμενα ισότοπα πάνω από το βισμούθιο στον περιοδικό πίνακα είναι ραδιενεργά, και υπάρχουν επιπλέον φυσικά ραδιενεργά ισότοπα του βισμούθιου, του θαλλίου, του βαναδίου, του ινδίου, του νεοδυμίου, του γαδολίνιου, του αίφνιου, του λευκόχρυσου, του μολύβδου, του ρήνιου, του λουτήτιου, του ρουβιδίου, του καλίου, του υδρογόνου, του άνθρακα, του λανθανίου, και του σαμαρίου. Ιδιαίτερη σημασία έχει το κάλιο, που αποτελεί και συστατικό του ανθρώπινου σώματος. Το 1919 ο Rutherford επέφερε την πρώτη προκληθείσα πυρηνική αντίδραση με τεχνητό τρόπο, όταν βομβάρδισε το συνηθισμένο αέριο αζώτου (αζώτο-14) με τα άλφα σωματίδια και διαπίστωσε ότι οι πυρήνες αζώτου συνέλαβαν τα άλφα σωματίδια και εξέπεμψαν τα πρωτόνια πολύ γρήγορα, διαμορφώνοντας ένα σταθερό ισότοπο του οξυγόνου, το οξυγόνο-17.

Το 1933 ήταν που καταδείχθηκε ότι τέτοιες πυρηνικές αντιδράσεις θα μπορούσαν μερικές φορές να οδηγήσουν στο σχηματισμό των νέων ραδιενεργών πυρήνων. Οι Γάλλοι χημικοί Irene και Frederic Joliot-Curie προετοίμασαν την πρώτη τεχνητή ραδιενεργό ουσία στο ίδιο έτος, όταν βομβάρδισαν το αργίλιο με άλφα σωματίδια. Οι πυρήνες αργιλίου συνέλαβαν τα άλφα σωματίδια και εξέπεμψαν έπειτα νετρόνια, με τον επακόλουθο σχηματισμό ενός ισότοπου του φωσφόρου, το οποίο αποσυντέθηκε λόγω εκπομπής ποζιτρονίων, και που παρουσιάζει ένα μικρό χρόνο ημιζωής.

Οι Joliot-Curie παρήγαγαν επίσης ένα ισότοπο του αζώτου από το βόριο και ένα του αργιλίου από το μαγνήσιο. Από τότε πολλές πυρηνικές αντιδράσεις έχουν ανακαλυφθεί, και οι πυρήνες των στοιχείων σ' όλο τον περιοδικό πίνακα έχουν βομβαρδιστεί με διαφορετικά σωματίδια, συμπεριλαμβανομένου των άλφα σωματιδίων, πρωτονίων, νετρονίων, και δευτερονίων (πυρήνες του δευτέρου, το ισότοπο υδρογόνου με μαζικό αριθμό=2). Ως αποτέλεσμα αυτής της εντατικής έρευνας, περισσότερες από 400 τεχνητές ραδιενέργειες είναι τώρα γνωστές. Αυτή η έρευνα έχει βοηθηθεί αποφασιστικά από την ανάπτυξη των επιταχυντών που επιταχύνουν τα σωματίδια που βομβαρδίζουν τους πυρήνες, με τεράστιες ταχύτητες, και κατά συνέπεια αυξάνοντας σε πολλές περιπτώσεις την πιθανότητα της σύλληψής τους από τους πυρήνες-στόχους.

1.9 Ανίχνευση και μέτρηση της ραδιενέργειας

Η ανίχνευση και μέτρηση της ραδιενέργειας γίνεται με διαφόρων τύπων ανιχνευτές οι οποίοι λειτουργούν με βάση τον ιονισμό που προκαλούν οι ακτινοβολίες α , β ή γ όταν εισέρχονται μέσα στον ανιχνευτή (θάλαμος ιονισμού, αναλογικός απαριθμητής, απαριθμητής Geiger – Muller, ανιχνευτές ημιαγωγών) ή με βάση τη διέγερση των ατόμων του ανιχνευτή (ανιχνευτές σπινθηρισμών). Από τους παραπάνω ανιχνευτές, ο μετρητής Geiger – Muller είναι ευρέα διαδεδομένος εξαιτίας του μικρού του μεγέθους, της αξιοπιστίας και του χαμηλού του κόστους, μειονεκτώντας ωστόσο στη μικρή ευαισθησία ανίχνευσης ακτίνων $-\gamma$ και την αδυναμία διαχωρισμού των διαφορετικών ενεργειών των ραδιενεργών ακτινοβολιών.

Ο απαριθμητής Geiger-Muller, αποτελείται από ένα κυλινδρικό μεταλλικό σωλήνα με λεπτά τοιχώματα και ένα σύρμα κατά μήκος του κυρίου άξονα, ηλεκτρικά μονωμένου από τα τοιχώματα του σωλήνα. Εφαρμόζοντας υψηλή διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου, ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται στο εσωτερικό του σωλήνα. Σωματίδια που εκπέμπονται από ραδιενεργά υλικά εισέρχονται στον απαριθμητή από ένα μεταλλικό παράθυρο, το οποίο είναι πολύ λεπτό (και συνεπώς εύθραυστο) έτσι ώστε να μην απορροφάται μεγάλο μέρος της ραδιενέργειας. Ο σωλήνας περιέχει ένα ευγενές αέριο, συνήθως Ar, σε πίεση μικρότερης της ατμοσφαιρικής. Όταν φορτισμένα σωματίδια, όπως σωματίδια άλφα ή βήτα εισέρχονται στο σωλήνα, προκαλούν τον ιονισμό των ατόμων του ευγενούς αερίου διώχνοντας σε καθένα από αυτά 1-2 εξωτερικά ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται επιταχύνονται προς τη θετικά φορτισμένη άνοδο προκαλώντας επιπρόσθετους ιονισμούς. Αυτή η αλυσιδωτή αντίδραση (φαινόμενο χιονοστιβάδας) έχει ως αποτέλεσμα ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων να φτάνει στο συλλέκτη για κάθε σωματίδιο που εισέρχεται στο σωλήνα, δίνοντας ένα παλμό ρεύματος μετρήσιμο από το εξωτερικό κύκλωμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Φυσικές πηγές ραδιενέργειας

2.1 Εισαγωγικά

Όπως περιγράφεται και στην εισαγωγή, μερικοί πυρήνες ή άτομα της ύλης βρίσκονται σε μια προσωρινή ασταθή κατάσταση που ονομάζεται διεγερμένη. Οι πυρήνες αυτοί, που καλούνται πατρικοί πυρήνες τείνουν να μετασχηματίζονται (ή να μεταστοιχειώνονται) σε νέους που είναι περισσότερο σταθεροί και ονομάζονται θυγατρικοί πυρήνες. Οι θυγατρικοί περικλείουν λιγότερη ενέργεια από τους πατρικούς πυρήνες. Αυτή η διαφορά ενέργειας μεταξύ του αρχικού ασταθούς και του τελικού περισσότερο σταθερού πυρήνα εκπέμπεται στο περιβάλλον με ασυνεχή τρόπο. Η ενέργεια που εκπέμπεται ονομάζεται ακτινοβολία, ενώ η όλη διαδικασία μεταστοιχειώσης ονομάζεται ραδιενέργεια.

Όπως αναφέραμε, από τις πιο γνωστές ακτινοβολίες είναι οι ακτινοβολίες α , β και γ . Οι ακτινοβολίες αυτές προέρχονται από το υπέδαφος, το αστρικό διάστημα, τις πυρηνικές δοκιμές, τα ατυχήματα στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, τις συσκευές ακτινογραφίας, ακτινοθεραπείας, ραδιογραφίας κ.λ.π. από τα διάφορα ραδιοϊσότοπα (που βρίσκονται σε διάφορα φάρμακα, στο χώμα, στις τροφές, σε ιχνοστοιχεία) από την καύση ορισμένων ανθράκων, όπως π.χ. ουρανιούχων γαιανθράκων, λιγνίτη κ.λ.π. Στο υπέδαφος υπάρχουν πολλά ραδιενεργά υλικά τα οποία ακτινοβολούν συνεχώς. Το μεγαλύτερο όμως ποσοστό της ακτινοβολίας αυτής το απορροφούν τα επιφανειακά στρώματα της γης με αποτέλεσμα να φτάνει ως την επιφάνεια ένα μικρό μόνο μέρος της.

Τα υπόγεια νερά που κυκλοφορούν στο στερεό φλοιό της γης, διαλύουν μερικά από τα ραδιενεργά υλικά τα οποία μπορεί να φτάσουν ως την επιφάνεια του εδάφους. Επίσης από μερικές πυρηνικές μεταστοιχειώσεις που γίνονται στα φυσικά

ραδιενεργά υλικά παράγονται αέρια ραδιενεργά προϊόντα, όπως π.χ. το ραδόνιο, μέρος των οποίων φτάνει ως την επιφάνεια της γης από διάφορες ρωγμές και πόρους του εδάφους. Επίσης φυτά που καλλιεργούνται σε ραδιενεργά εδάφη απορροφούν μικρό ποσοστό διαλυτών ραδιοϊσοτόπων τα οποία μπορούν να φτάσουν ως τον καρπό και το ξύλο. Τέλος πολλοί άνθρωποι μπορεί να ακτινοβολούνται μέσα στο ίδιο το σπίτι τους από ραδιενεργά οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των σπιτιών τους. Η ακτινοβολία αυτή μπορεί να είναι και εξωτερική στο σώμα τους και εσωτερική με την εισπνοή δηλαδή ραδιενεργών αερίων που μπορεί να παράγονται από τα υλικά. Για τον λόγο αυτό δεν θα ήταν άσκοπη υπερβολή να καθιερωθεί στο μέλλον ο έλεγχος της ραδιενέργειας όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή και τον εξοπλισμό των σπιτιών.

Το απέραντο σύμπαν με τον τεράστιο αριθμό γαλαξιών, που είναι συγκροτήματα δισεκατομμυρίων αστερών, είναι ένα πελώριο πυρηνικό εργαστήριο, όπου γίνονται ασταμάτητες θερμοπυρηνικές αντιδράσεις και εκρήξεις ασύλληπτων διαστάσεων. Από όλες αυτές τις θερμοπυρηνικές εκρήξεις παράγονται οι κοσμικές ακτινοβολίες, που έχουν τεράστιες ενέργειες και ταξιδεύουν στο διάστημα σε τεράστιες αποστάσεις έως ότου συναντήσουν την αστρική ύλη. Οι ακτινοβολίες αυτές που είναι κυρίως πρωτόνια και σωματίδια –α αποτελούν την πρωτογενή κοσμική ακτινοβολία. Η ατμόσφαιρα της γης βομβαρδίζεται συνεχώς με ένα μεγάλο μέρος κοσμικών ακτινοβολιών. Η αλληλεπίδραση της ατμόσφαιρας με τις κοσμικές ακτινοβολίες έχει ως αποτέλεσμα τη γένεση δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας, της οποίας ένα μεγάλο μέρος φτάνει ως την επιφάνεια της γης.

Η ρύπανση της ατμόσφαιρας από τη πυρηνική βιομηχανία που αναπτύσσεται με γοργό ρυθμό τα τελευταία χρόνια είναι αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης. Από τα διάφορα πυρηνικά εργοστάσια ξεφεύγουν μικρές ποσότητες ραδιενεργών προϊόντων (κυρίως αέρια και σκόνη) κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας τους. Σε περίπτωση όμως ατυχήματος οι ποσότητες των ραδιενεργών προϊόντων που μπορεί να ξεφύγουν είναι τεράστιες. Πρόσφατο παράδειγμα το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνομπίλ (1986). Τα απόβλητα μπορούν να παραμείνουν στην ατμόσφαιρα από λίγα λεπτά της ώρας έως και μερικά χρόνια. Τα ραδιενεργά απόβλητα μετακινούνται και διαχέονται μέσα στην ατμόσφαιρα κυρίως με τον αέρα και οι συγκεντρώσεις τους υπολογίζονται με τις γνωστές μεθόδους της ατμοσφαιρικής διάχυσης της μετεωρολογίας, όπως και για τα κοινά απόβλητα. Σημειώνεται ότι το πάχος της ατμόσφαιρας από την επιφάνεια της θάλασσας, είναι περίπου 1200 χιλιόμετρα κι ότι

τα κυριότερα συστατικά της είναι το άζωτο 75% και το οξυγόνο 23%. Άλλα συστατικά είναι το κρυπτό, το αργό, το διοξείδιο του άνθρακα, το νέο, το ήλιο, το διοξείδιο του αζώτου, το υδρογόνο, το όζον, το ξένο και άλλα (χρώμιο, μεθάνιο κ.λ.π.)

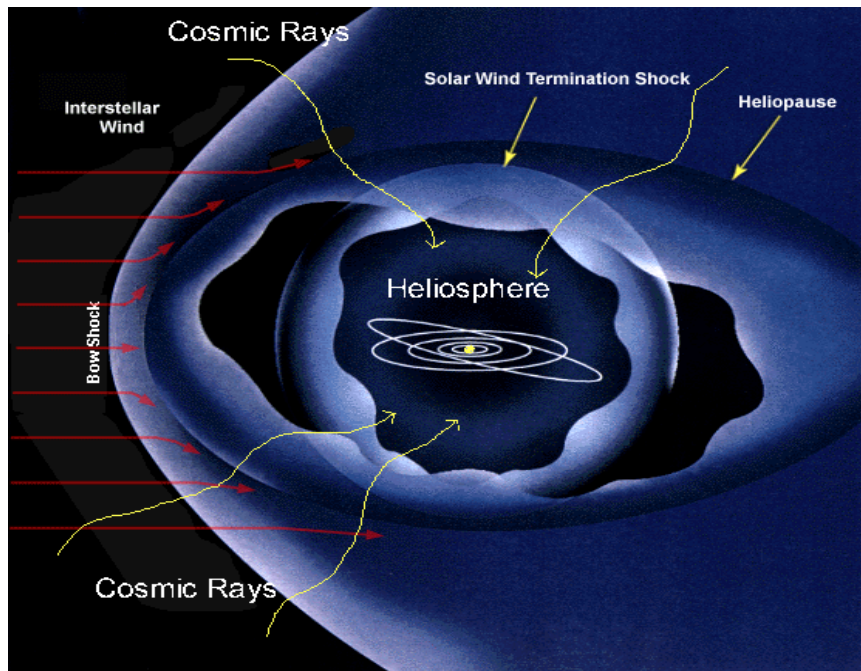
Οι δοκιμές των πυρηνικών όπλων, ειδικά αυτές που έγιναν παλαιότερα στην ατμόσφαιρα, είναι μία από τις πιο σοβαρές πηγές μόλυνσης με ραδιενεργά απόβλητα. Ακόμη ως σήμερα υπάρχουν υπολείμματα ραδιενεργών νεφών στα ψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας και κατά περιόδους μικρές ποσότητες αυτών των αποβλήτων φτάνουν στην επιφάνεια της γης. Αλλά και οι υπόγειες δοκιμές, που συνεχίζονται ως σήμερα μολύνουν το υπέδαφος, τα υπόγεια νερά και τη θάλασσα. Επιβάρυνση της ατμόσφαιρας και του εδάφους με ραδιενεργά απόβλητα μπορεί επίσης να γίνεται από την καύση των διαφόρων ειδών άνθρακα (ουρανιούχων γαιανθράκων, λιγνιτών κ.λ.π.) στα διάφορα εργοστάσια και κυρίως τα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια.

Επιβάρυνση του οργανισμού μας με ακτινοβολίες γίνεται και κατά τη διάρκεια της ακτινοθεραπείας και ακτινοδιαγνωστικής καθώς και από τη χρησιμοποίηση των ραδιοϊσοτόπων στη γεωργία, τη βιολογία, την ιατρική κ.λ.π.

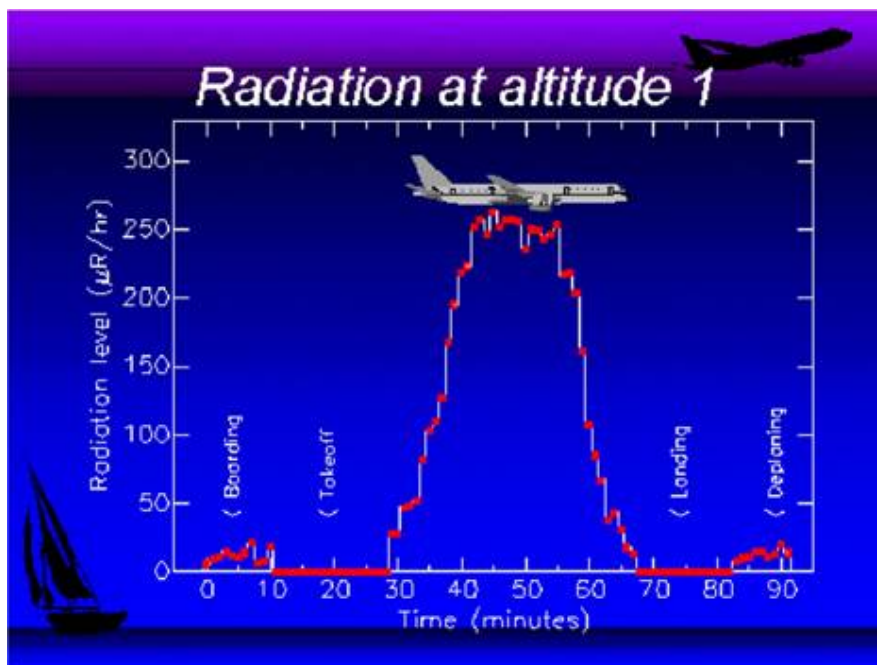
2.2 Ραδιενέργεια στην ατμόσφαιρα

2.2.1 Κοσμική ακτινοβολία

Κοσμική ακτινοβολία είναι η μυστηριώδης ακτινοβολία που μας έρχεται από το αχανές διάστημα. Είναι προϊόν των συνεχών μεταβολών που συμβαίνουν στον αστρικό χώρο. Από το διάστημα φτάνει στη Γη ακτινοβολία, πυρηνικά σωματίδια – βλήματα αλλά δεν φτάνουν ραδιενεργοί πυρήνες. Αυτοί προέρχονται από τη σύγκρουση της κοσμικής ακτινοβολίας με στοιχεία που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Η κοσμική ακτινοβολία είναι ελάχιστη αισθητή στην επιφάνεια της Γης, γιατί η γήινη ατμόσφαιρα την εξασθενεί και συγκρατεί το μεγαλύτερο μέρος της. Φτάνει από παντού. Κανείς δεν μπορεί να ξεφύγει από την «αστρική βροχή». Όσο πιο ψηλά βρισκόμαστε στην ατμόσφαιρα τόσο δεχόμαστε περισσότερη κοσμική ακτινοβολία. Αυτό έχει ως συνέπεια οι επιβάτες και τα πληρώματα των αεροπορικών πτήσεων να επιβαρύνονται με μια πρόσθετη δόση. Τα μέρη που είναι πιο κοντά στους πόλους δέχονται 4 φορές περισσότερη ακτινοβολία από τα μέρη που είναι πιο κοντά στον Ισημερινό. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο της γης.



Σχήμα 2.1 Κοσμική ακτινοβολία



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα έκθεσης σε ραδιενέργεια ($\mu R/hr$) κατά τη διάρκεια αεροπορικού ταξιδιού

2.2.2 Ακτινοβολία από τη γη

Στο υπέδαφος έχουν βρεθεί περισσότερα από 40 ραδιενεργά ισότοπα. Τα πιο πολλά προέρχονται από διαδοχικές διασπάσεις άλλων ραδιενεργών ισοτόπων και κατατάσσονται σε τρεις σειρές με επικεφαλής κάθε σειράς το αρχικό ισότοπο από το οποίο προέρχονται. Τα πρώτα (πατρικά) ισότοπα που δίνουν και το όνομά τους στις αντίστοιχες σειρές είναι το Ουράνιο –238 (σειρά ουρανίου), το Θόριο –232 (σειρά θορίου) και το Ουράνιο –235 (για ιστορικούς λόγους ονομάζεται σειρά ακτινίου). Τα τρία αυτά ισότοπα έχουν αντίστοιχα χρόνους υποδιπλασιασμού (χρόνος που απαιτείται για να χάσουν τη μισή από την αρχική τους μάζα) 4.5, 14 και 0.7 δισεκατομμύρια χρόνια. Οι χρόνοι αυτοί πλησιάζουν την ηλικία της Γης. Πιθανόν αυτά τα ισότοπα να προέρχονται από άλλα των οποίων ο χρόνος υποδιπλασιασμού ήταν μικρότερος και δεν υπάρχουν σήμερα. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μεταβάλλεται από τόπο σε τόπο, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε φυσικά ραδιενεργά κοιτάσματα.

2.3 Άλλες φυσικές πηγές ραδιενέργειας

Υπάρχουν στη Γη κι άλλες πηγές ραδιενέργειας μικρότερης σημασίας. Η πιο σημαντική προέρχεται από το κάρβουνο, το οποίο όταν καίγεται ελευθερώνει τα ραδιενεργά ισότοπα που περικλείει. Αυτά είτε φεύγουν με τον καπνό, είτε παραμένουν στη στάχτη.

Επίσης τα φωσφαντικά ορυκτά, που χρησιμοποιούνται για λιπάσματα, περιέχουν σε πολύ μικρές ποσότητες ραδιενεργά ισότοπα και φτάνουν στον άνθρωπο με την τροφή.

Η γεωθερμική ενέργεια, που ελευθερώνεται με τη μορφή ατμού ή ζεστού νερού, είναι ένα μέσο με το οποίο φτάνει η ραδιενέργεια από το εσωτερικό της γης στην επιφάνεια της. Η χρήση της για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προξενεί τριπλάσια ραδιενεργό ρύπανση ανά μονάδα παραγωγής έναντι της αντίστοιχης ρύπανσης από ηλεκτρικά εργοστάσια κάρβουνου. Η διάδοση της γεωθερμικής ενέργειας είναι περιορισμένη (0,1% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας και η συμμετοχή της στη φυσική ραδιενέργεια είναι μικρή).

Άλλο μέσο είναι οι πηγές των μεταλλικών μερών, που περιέχουν σε διάλυση απορροές ραδιενεργών στοιχείων και πολύ σπάνια ελάχιστα ποσά των ίδιων ραδιενεργών στοιχείων ή των αλάτων τους. Οι ραδιενεργές πηγές έχουν θεραπευτική επίδραση σε πολλές παθήσεις όπως τα αρθριτικά, οι χρόνιοι ρευματισμοί, η

πνευμονική φυματίωση κ.ά. Στην Ελλάδα οι ισχυρότερες ραδιενεργές πηγές είναι αυτές που βρίσκονται στα Καμένα Βούρλα.

2.4 Εσωτερική ραδιενέργεια

Ραδιενεργά ισότοπα εισέρχονται στον ανθρώπινο σώμα με την εισπνοή και τις τροφές. Ανάλογα με το είδος τους κατακρατούνται από ορισμένα μέρη (όργανα) του σώματος για κάποιο διάστημα. Από τη θέση αυτή ακτινοβολούν τη γύρω περιοχή. Αν το περιβάλλον δεν έχει ρυπανθεί με τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα, τα κυριότερα ραδιενεργά ισότοπα που εισέρχονται κι έχουν ανιχνευθεί στο σώμα είναι: ο άνθρακας -14 , το ραδόνιο -222 και 220 και το Κάλιο -40 . Τα ισότοπα αυτά έχουν ένα σταθερό ρυθμό εισόδου και εξόδου στο σώμα, λόγω του βιολογικού κύκλου, με αποτέλεσμα να βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας. Ένα καινούργιο ισότοπο που εντοπίστηκε στο ανθρώπινο σώμα μετά το ατύχημα του Τσερνομπίλ είναι το Καίσιο -137 . Η τιμή ισορροπίας του που μετριέται στο σώμα μας φτάνει τις μερικές χιλιάδες Bq.

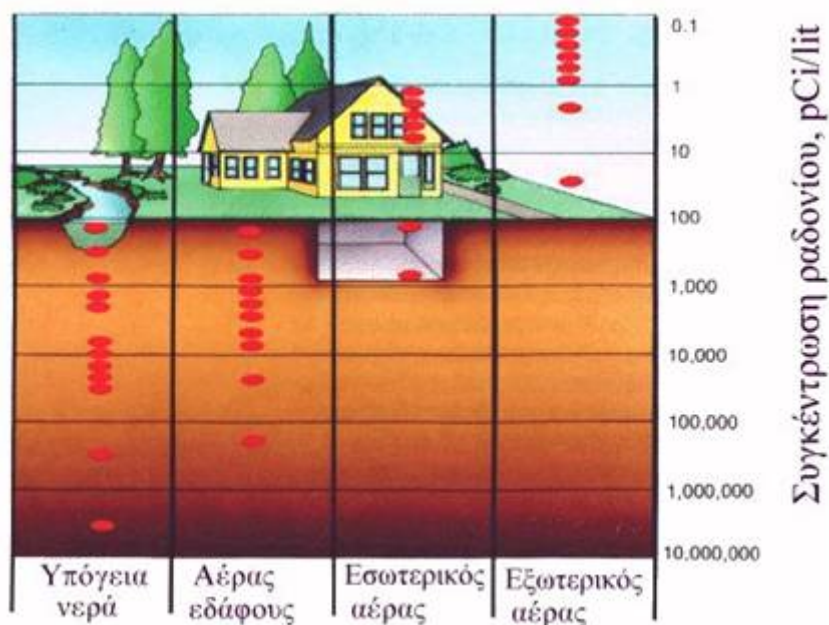
Μέχρι σήμερα δεν έχει ανακοινωθεί κάποια ασθένεια που να αποδόθηκε σε φυσική ραδιενέργεια ακόμη και σε περιοχές που μετρήθηκαν 20 και 30 φορές μεγαλύτερες από 10 μέσο όρο. Είναι πιθανό οι μικρές δόσεις από φυσική ραδιενέργεια να προκαλούν γενετικές βλάβες σε πολύ μικρά ποσοστά σε σχέση με άλλες εξωγενείς αιτίες. Επίσης τα υψηλά επίπεδα ραδονίου σε σπίτια είναι ένας κίνδυνος και πρέπει οι έρευνες σ' αυτή την κατεύθυνση να συνεχιστούν.

2.5 Το πρόβλημα του Ραδονίου

Σχετικά πρόσφατα οι επιστήμονες ανακάλυψαν ότι η σπουδαιότερη πηγή ραδιενέργειας που φτάνει στον άνθρωπο είναι το αέριο Ραδόνιο. Παράγεται κατά τη ραδιενεργό διάσπαση του ραδίου, που είναι συστατικό της γης σε πολύ μικρή αναλογία (ιχνοστοιχείο). Το ραδόνιο και τα θυγατρικά του ραδιοϊσότοπα συνεισφέρουν περίπου κατά 50% στη συνολική δόση από φυσικές πηγές που δέχεται ο άνθρωπος. Όταν εισπνέεται σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να προκαλέσει καρκίνο του πνεύμονα. Το περιέχουν τα οικοδομικά υλικά στους πόρους τους και τελικά εκλύεται από την επιφάνεια στον ελεύθερο αέρα. Στους κλειστούς χώρους (κατοικίες, γραφεία, σχολεία κ.ά.) συσσωρεύεται από τους τοίχους, την οροφή και το δάπεδο κυρίως (ιδιαίτερα, όταν αυτό έρχεται σε άμεση επαφή με τη Γη ή είναι από μπετόν αρκετά πορώδες). Ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει ραδόνιο που εκλύεται από το έδαφος, όμως σε πολύ μικρή συγκέντρωση. Έτσι το άνοιγμα των παραθύρων

(εξαερισμός) ελάχιστα επιβαρύνει σε ραδόνιο τον αέρα των εσωτερικών χώρων. Το ραδόνιο επίσης εισβάλλει στις κατοικίες με το νερό της βρύσης, με τους αγωγούς φυσικού αερίου (γκάζι), τους αρμούς και τις ρωγμές από σεισμούς ή άλλες αιτίες, τις αποχετεύσεις και τις χαλαρές συνδέσεις των σωληνώσεων.

Η συσσώρευση του ραδονίου γίνεται ακόμα μεγαλύτερη όταν οι κατοικίες έχουν υψηλού βαθμού μόνωση, για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας τη χειμερινή περίοδο ή air-conditioning κατά τη θερινή περίοδο. Έτσι δεν γίνεται ο απαιτούμενος εξαερισμός των κατοικιών που θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης του ραδονίου.



Σχήμα 2.3 Παράγοντες που συνεισφέρουν κατά διαφορετικό ποσοστό στη συγκέντρωση ραδονίου στο εσωτερικό κατοικιών (η κλίμακα της συγκέντρωσης είναι λογαριθμική).

Σήμερα το ραδόνιο θεωρείται ο κυριότερος ρυπαντής του αέρα εσωτερικών χώρων. Έχουν γίνει πάρα πολλές μελέτες στις κατοικίες για τις επιπτώσεις του στην υγεία του ανθρώπου σε διάφορες χώρες (ιδιαίτερα στις ΗΠΑ, στη Σουηδία, στη Νορβηγία, στη Μ. Βρετανία και στην Ινδία). Το Εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης κάνει συστηματικές μετρήσεις του ραδονίου στις κατοικίες από το 1983. Παράλληλα έγινε μελέτη του ραδονίου και σε άλλους κλειστούς χώρους, όπως τα σπήλαια (Πετραλώνων Χαλκιδικής) ή διάφορα κτίσματα από γρανιτικούς λίθους που περιείχαν ουράνιο ή ράδιο σε υψηλότερες συγκεντρώσεις από τις κανονικές. Οι μετρήσεις αυτές έδειξαν πως η συγκέντρωση του ραδονίου

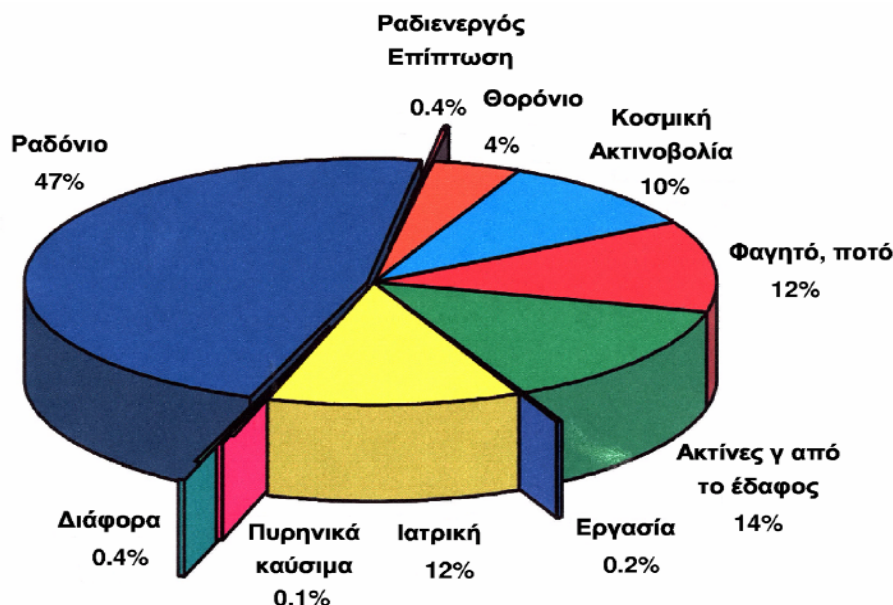
στους κλειστούς χώρους στη Θεσσαλονίκη είναι σχετικά χαμηλή (από 0,4 ως 6,7 pCi/lit αέρα). Στις ΗΠΑ κυμαίνεται από 0,36 ως 4.354,47 pCi/lit, ενώ στη Σουηδία από 10,8 έως 54 pCi/lit.

Εκείνο που έχει περισσότερη σημασία για την υγεία μας και αφορά ειδικότερα τους πνεύμονες και όλο το αναπνευστικό σύστημα, δεν είναι το ίδιο το ραδόνιο αλλά τα θυγατρικά του ισότοπα: Πολώνιο –218 και 214, Μόλυβδος –214 και Βισμούθιο –214. Έτσι με κάποιους τύπους οι επιστήμονες μπορούν να υπολογίσουν περίπου τον αναμενόμενο αριθμό περιπτώσεων καρκίνου του πνεύμονα ανά έτος. Για την Ελλάδα κυμαίνεται από 160 έως 6.200 περιπτώσεις το χρόνο. Οι ειδικοί (επιδημιολόγοι) επιμένουν βέβαια πως το μεγαλύτερο ίσως ποσοστό, οφείλεται στο κάπνισμα κι όχι στο ραδόνιο.

Η μείωση του ραδονίου στις κατοικίες και ο περιορισμός των συνεπειών του αντιμετωπίζεται ως εξής:

1. Να γίνεται καλός εξαερισμός των κατοικιών, που σημαίνει πολλές αλλαγές αέρα την ημέρα.
2. Κατάλληλος συνδυασμός της θερμομόνωσης και του κλιματισμού των κατοικιών με τον επαρκή εξαερισμό.
3. Επιλογή των οικοδομικών υλικών ύστερα από εξέταση της ραδιενέργειάς τους.

Σύμφωνα με μελέτες του Εργαστηρίου Πυρηνικής Φυσικής του Παν/μίου Θεσ/νίκης καθώς και άλλων επιστημόνων, για τη ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών στην Ελλάδα, θα πρέπει να γίνεται συνεχώς έλεγχος των οικοδομικών υλικών παλαιότερης και νεότερης τεχνολογίας, ώστε να είναι σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές όπως αυτές καθορίζονται την Διεθνή Επιτροπή Ραδιοπροστασίας (ICRP). Στις ΗΠΑ οι αγοραστές κατοικιών ζητούν να προμηθευτούν πιστοποιητικό ελέγχου του ραδονίου πριν από την υπογραφή του συμβολαίου για αγορά κατοικίας. Στην Ελλάδα δεν υπάρχει πρόβλημα ραδονίου όσο σε άλλες χώρες. Για πολλούς μήνες έχουμε παράθυρα και πόρτες ανοιχτές και είναι ελάχιστες οι περιπτώσεις υψηλού βαθμού θερμομόνωσης ή air conditioning. Έτσι με την ισχύουσα θεωρία περί καρκίνου μειώνεται ο αριθμός των περιπτώσεων, όμως δεν μηδενίζεται.



Σχήμα 2.4 Παράγοντες που συνεισφέρουν στην μέση ετήσια δόση (2.4 mSv) του μέσου κάτοικου του πλανήτη. Το 47% προέρχεται από το ραδόνιο.

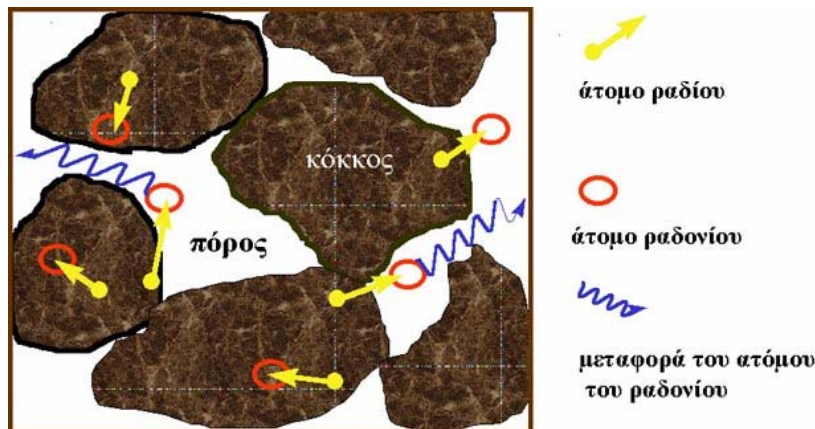
2.6 Το ραδόνιο αναλυτικά

Το ραδόνιο είναι ένα φυσικό ραδιενεργό αέριο, άχρωμο, άοσμο, άγευστο, ανήκει στην ομάδα των ευγενών αερίων (και ως εκ τούτου είναι χημικά αδρανές), το οποίο προέρχεται από το ράδιο που υπάρχει στο έδαφος και τα πετρώματα της γης. Από τη στιγμή που παράγεται, το αέριο ραδόνιο διαφεύγει από τους πόρους και τις ρωγμές των πετρωμάτων και εισέρχεται στην ατμόσφαιρα όπου διαχέεται γρήγορα. Το ραδόνιο εισέρχεται και σε κλειστούς χώρους όπως ορυχεία, σπίτια, σχολεία και χώρους εργασίας όπου και συγκεντρώνεται. Μάλιστα, οι συγκεντρώσεις του μπορεί να είναι υψηλές, ανάλογα με τα γεωλογικά στοιχεία και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες της περιοχής καθώς επίσης και με τις συνθήκες εξαερισμού του χώρου. Συνήθως στο εσωτερικό των σπιτιών η συγκέντρωσή του είναι 10 φορές μεγαλύτερη απ' ό,τι στον εξωτερικό αέρα. Επειδή το ραδόνιο είναι αέριο, κυκλοφορεί με τον ατμοσφαιρικό αέρα και καθώς ο άνθρωπος αναπνέει, το ραδόνιο, καθώς και τα επίσης ραδιενεργά θυγατρικά του, εισέρχονται και εναποτίθενται στους πνεύμονές του και επομένως τους ακτινοβολούν. Αυτή η ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει βλάβη στους πνεύμονες, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε εμφάνιση καρκίνου των πνευμόνων.

Η ραδιενέργεια που οφείλεται στο ραδόνιο και στα επίσης ραδιενεργά θυγατρικά του, αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή έκθεσης του ανθρώπου σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Σύμφωνα με τα τελευταία δεδομένα, όπως δίδονται από το UNSCEAR

93 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), ο μέσος κάτοικος του πλανήτη λαμβάνει ετησίως ισοδύναμη δόση 2,5 mSv, της οποίας το 47% οφείλεται στο ραδόνιο.

Το ραδόνιο είναι αέριο ραδιοϊσότοπο το οποίο προέρχεται από τη διάσπαση του ραδίου. Και τα δύο ραδιοϊσότοπα είναι μέλη της ραδιενεργού σειράς του Ουρανίου 238 (U-238) το οποίο αποτελεί μέρος της φυσικής ραδιενέργειας. Όλα τα πετρώματα και τα εδάφη της γης περιέχουν ουράνιο σε μικρές συνήθως ποσότητες (1–3 ppm). Το ράδιο είναι στερεό και βρίσκεται στο φλοιό της γης, η διάσπασή του συνοδεύεται και από μια φυσικοχημική μεταβολή. Ενώ το ράδιο σαν στοιχείο είναι στερεό και παραμένει στο κέλυφος στο οποίο εναποτέθηκε, το παραγόμενο από τη διάσπασή του ραδίου ραδόνιο, είναι αέριο και μάλιστα αδρανές. Και αφού είναι αέριο, αν του δοθεί η δυνατότητα όπως θα δούμε παρακάτω, θα διαφύγει α σχηματισθεί. Ας παρατηρήσουμε ένα κόκκο υλικού που περιέχει ράδιο. Ο πυρήνας του ραδίου διασπάται και μετατρέπεται σε πυρήνα ραδονίου ο οποίος μπορεί να μη μπορεί να βγει από τον κόκκο, να βγει και να περάσει στους πόρους (διάκενα των κόκκων), ή να εισέλθει σε γειτονικό κόκκο.



Σχήμα 2.5 Μηχανισμοί μεταφοράς του ραδονίου

Η διαφυγή του ραδονίου από τους κόκκους μέσα στους οποίους παράγεται, εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες αυτών, όπως το μέγεθος των κόκκων, το πορώδες, η διαπερατότητα, η υγρασία του εδάφους και η κρυσταλλική δομή των κόκκων. Από τη στιγμή που παράγεται, το αέριο ραδόνιο διαφεύγει από τους πόρους και τις ρωγμές των πετρωμάτων και εισέρχεται στην ατμόσφαιρα όπου διαχέεται γρήγορα.

2.7 Κίνδυνοι για την υγεία εξαιτίας του ραδονίου

Το ραδόνιο και τα θυγατρικά του ισότοπα, εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό με την αναπνοή. Οι επιπτώσεις στον πνευμονικό ιστό οφείλονται περισσότερο στα θυγατρικά του ραδονίου παρά στο ίδιο το ραδόνιο. Επειδή το ραδόνιο είναι χημικά αδρανές και ο χρόνος ημιζωής του είναι σχετικά μεγάλος συγκρινόμενος με το χρόνο της αναπνοής, μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό από το εισπνεόμενο ραδόνιο από το έδαφος προλαβαίνει να διασπαστεί μέσα στους πνεύμονες. Αντίθετα όμως, τα τέσσερα θυγατρικά του ραδονίου (Po-218, Pb-214, Bi-214 και Po-214) δεν είναι αδρανή αέρια και λίγο μετά το σχηματισμό τους προσκολλούνται σε σωματίδια αεροζόλ. Αυτά τα θυγατρικά, όταν εισπνέονται μαζί με τον αέρα επικάθονται στο πνευμονικό επιθήλιο, διασπώνται μέσα στους πνεύμονες εκπέμποντας κυρίως σωματίδια άλφα, και μπορεί να προκαλέσουν, βλάβες στις ευαίσθητες κυψελίδες του πνεύμονα.

Πίνακας 2.1 Εκτίμηση του κινδύνου έκθεσης στο ραδόνιο (Πηγή: NRPB - National Radiological Protection Board, United Kingdom)

Πληθυσμός	Εκτίμηση του κινδύνου εξαιτίας της έκθεσης στο ραδόνιο* (αριθμός ατόμων)	
	20 Bq/m ³	200 Bq/m ³
Καπνιστές	10	100
Μη καπνιστές	1	10
Γενικός πληθυσμός	3	30

2.8 Πως εισέρχεται στην κατοικία το ραδόνιο

Η κύρια πηγή του ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους είναι το Ra226 που βρίσκεται στο έδαφος και στα οικοδομικά υλικά. Ο εξωτερικός αέρας συνεισφέρει επίσης στις συγκεντρώσεις ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους, δια μέσω του εξαερισμού. Το νερό της βρύσης και η οικιακή εγκατάσταση γκαζιού είναι συνήθως πηγές ραδονίου μικρότερης σημασίας, με ελάχιστες εξαιρέσεις. Το ραδόνιο εισρέει στους ζωτικούς χώρους των κατοικιών με διάχυση ή λόγω διαφοράς πίεσης, εφόσον υπάρχουν κατάλληλοι δίοδοι μεταξύ του εδάφους και των χώρων αυτών. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί, ότι μια μειονότητα των περιπτώσεων υψηλών επιπέδων

συγκέντρωσης ραδονίου οφείλεται στη χρήση οικοδομικών υλικών που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις ραδίου-226.

Για μία τυπική ισόγεια κατοικία, οι συνεισφορές του εδάφους, των οικοδομικών υλικών και του εξωτερικού αέρα στην συγκέντρωση του ραδονίου είναι αντίστοιχα ~60%, ~20 % και ~20 %, ενώ για τα υψηλότερα πατώματα σε πολυώροφα κτίρια, τα ποσοστά γίνονται ~0 %, ~50 % και ~50 %.

Το ραδόνιο έχει πολλές οδούς εισόδου σε ένα κτίριο. Αυτές είναι οι εξής:

- ✓ Οι μικρορωγμές που υπάρχουν στο τσιμεντένιο δάπεδο
- ✓ Τα κενά ή ρωγμές που υπάρχουν στους τοίχους
- ✓ Τα κενά στα σημεία σύνδεσης τοίχου δαπέδου
- ✓ Τα διάκενα στα ξύλινα πατώματα
- ✓ Τα κενά στα σημεία εισόδου των σωλήνων ύδρευσης και αποχέτευσης
- ✓ Τα διάκενα στις πόρτες και τα παράθυρα

Πολλοί παράγοντες επιδρούν στη διαμόρφωση της εσωτερικής συγκέντρωσης του ραδονίου σε μία οικοδομή. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι:

- ✓ Ο ρυθμός εκροής ραδονίου από το έδαφος
- ✓ Το είδος θεμελίωσης της οικοδομής πάνω στο έδαφος
- ✓ Το ύψος της κατοικίας από το έδαφος
- ✓ Η εκροή του ραδονίου από τα οικοδομικά υλικά και μάλιστα από τις εσωτερικές επιφάνειες
- ✓ Ο εξαερισμός
- ✓ Η διαφορά πίεσης ανάμεσα στο εσωτερικό της κατοικίας και στο εξωτερικό περιβάλλον.

2.9 Πως μετριέται το ραδόνιο

Όπως εξηγήθηκε και νωρίτερα, το αέριο ραδόνιο του εσωτερικού αέρα προέρχεται κυρίως από το έδαφος, το οποίο οδηγούμενο από διαφορές πιέσεων εισέρχεται στον εσωτερικό αέρα μέσω ρωγμών στα θεμέλια των κτιρίων, ή από υλικά οικοδομών, ή από οικιακή χρήση νερού από βαθιά πηγάδια, ή τέλος από τον εξωτερικό αέρα.

Για μια σωστή προσέγγιση της κατάστασης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του. Αυτές οι μεταβολές συμβαίνουν σε πολλές χρονικές κλίμακες (ωριαίες μέχρι ετήσιες μεταβολές), και εξαρτώνται από εποχικούς παράγοντες, τις καιρικές συνθήκες, τα

χαρακτηριστικά του κτιρίου, τη χρήση των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού των κατοικιών, τις συνήθειες των κατοίκων, και από αρκετούς άλλους παράγοντες. Συνήθως οι συγκεντρώσεις είναι υψηλότερες το απόγευμα και τη νύχτα απ' ό,τι αργά το πρωί και το μεσημέρι, υψηλότερες το χειμώνα απ' ό,τι το καλοκαίρι, παρ' όλο που είναι σχεδόν αδύνατο να προβλεφθούν αυτές οι μεταβολές με αρκετή ακρίβεια.

Οι περισσότερες μέθοδοι μέτρησης του ραδονίου (Rn) και των θυγατρικών του (RnD) βασίζονται στην ανίχνευση α -σωματιδίων που εκπέμπονται από τα ραδιονουκλίδια αυτά κατά τη ραδιενεργό διάσπασή τους. Οι μέθοδοι μέτρησης διακρίνονται γενικά σε ενεργητικές και παθητικές. *Ενεργητικές τεχνικές* είναι εκείνες που απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια και τη χρήση αντλιών αέρα. *Παθητικές τεχνικές* είναι εκείνες στις οποίες αφού βάλουμε τον ανιχνευτή στο σημείο μέτρησης, αυτός δεν απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια. Οι παθητικές τεχνικές είναι συνήθως απλές, με ανταγωνιστικό κόστος και εύκολη χρήση. Είναι κατάλληλες για ερευνητική δουλειά και για μακροχρόνιες μετρήσεις. Το αποτέλεσμα μίας μέτρησης ραδονίου με παθητικούς ανιχνευτές εκφράζεται σε Bq/m^3 και εκφράζει την μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου που είναι και η πλέον αντιπροσωπευτική για τον εσωτερικό αέρα της κατοικίας. $1 Bq/m^3$ σημαίνει ότι κατά μέσο όρο σε κάθε κυβικό μέτρο αέρα, συμβαίνει μία διάσπαση ενός ατόμου ραδονίου σε κάθε δευτερόλεπτο.

Οι διάφοροι διεθνείς οργανισμοί καθώς και αρκετά κράτη έχουν προτείνει όρια για την συγκέντρωση ραδονίου στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών. Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα ισχύοντα και τα προτεινόμενα όρια.

Η Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων λαμβάνοντας υπόψη τις προτάσεις της Διεθνούς Επιτροπής Ακτινοπροστασίας (ICRP), εξέδωσε το 1990 την σύσταση "Προστασία του πληθυσμού από την έκθεση στο ραδόνιο μέσα στα κτίρια" (90/143/Euratom), η οποία αποσκοπεί στο να καθιερώσουν τα κράτη-μέλη ένα κατάλληλο σύστημα, για τον περιορισμό της έκθεσης λόγω της συγκέντρωσης ραδονίου μέσα στα κτίρια.

Πίνακας 2.2 Εκτίμηση του κινδύνου έκθεσης στο ραδόνιο

Οργανισμός / Κράτος	Υπάρχουσες κατοικίες (Bq/m ³)	Νεόδμητες κατοικίες (Bq/m ³)	
ICRP§	400	200	Υιοθετήθηκε το1984
CEC†	400	200	Προτάθηκε το 1989
WHO*	200	200	Υιοθετήθηκε το1987
Σουηδία	800	140	Υιοθετήθηκε το1981
Νορβηγία	800	200	Υιοθετήθηκε το1986
Φιλανδία	800	200	Προτάθηκε το 1986
Η.Π.Α	150	150	Υιοθετήθηκε το1986

ICRP§: *International Commission on Radiological Protection (Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας)*

CEC†: *Commission of European Communities (Ευρωπαϊκή Κοινότητα)*

WHO*: *World Health Organization (Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας)*

2.10 Ραδόνιο και χώροι εργασίας

Σύμφωνα με τους Ελληνικούς κανονισμούς Ακτινοπροστασίας (ΦΕΚ 216B, 5/3/2001), που είναι πλήρως εναρμονισμένοι με την Οδηγία 96/29/EURATOM 31/5/1996, τα επίπεδα δράσης για τη συγκέντρωση ραδονίου στους εργασιακούς χώρους είναι:

- Εργασιακοί χώροι στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών), είναι μικρότερη από 400 Bq/m³ εξαιρούνται περαιτέρω ελέγχου και μέτρων ακτινοπροστασίας.
- Σε εργασιακούς χώρους στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών), είναι μεγαλύτερη από 400 Bq/m³ και μικρότερη από 1000 Bq/m³ 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.
- Εργασιακοί χώροι στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών), είναι μεγαλύτερη από 1000 Bq/m³ και μικρότερη από 3000 Bq/m³ χαρακτηρίζονται ως

ελεγχόμενες περιοχές και οι πρακτικές αδειοδοτούνται από τη ΕΕΑΕ, τα δε λαμβανόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας εγκρίνονται από την ΕΕΑΕ.

- Η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση του ραδονίου σε εργασιακούς χώρους, δεν μπορεί να υπερβαίνει τα $3000\text{Bq}/\text{m}^3$ λαμβανομένων υπ' όψη των 2000 ωρών διάρκειας εργασίας.

Στις εργασιακές δραστηριότητες, όπου ενδέχεται η παρουσία φυσικών πηγών ακτινοβολίας (γήινης ή κοσμικής), να συνεπάγεται σημαντική αύξηση της έκθεσης των εργαζομένων, η οποία δεν μπορεί να αγνοηθεί από την άποψη ακτινοπροστασίας περιλαμβάνονται:

(α) Εργασιακές δραστηριότητες, όπου οι εργαζόμενοι και ενδεχομένως άτομα του κοινού εκτίθενται σε ακτινοβολία γάμμα, σε θυγατρικά στοιχεία του ραδονίου ή του θορονίου, ή οποιαδήποτε άλλη δίοδο έκθεσης σε ακτινοβολία στους χώρους εργασίας. Οι εργασιακές αυτές δραστηριότητες αφορούν κυρίως σε ιαματικές πηγές, σπήλαια, ορυχεία, υπόγειους χώρους εργασίας ή υπέργειους χώρους εργασίας σε καθορισμένες ζώνες.

(β) Εργασιακές δραστηριότητες στις οποίες γίνεται χρήση ή αποθήκευση υλικών, τα οποία συνήθως δεν θεωρούνται ραδιενεργά, αλλά περιέχουν φυσικά ραδιονουκλίδια και τα οποία προκαλούν ουσιώδη αύξηση της έκθεσης των εργαζομένων και ενδεχομένως του κοινού.

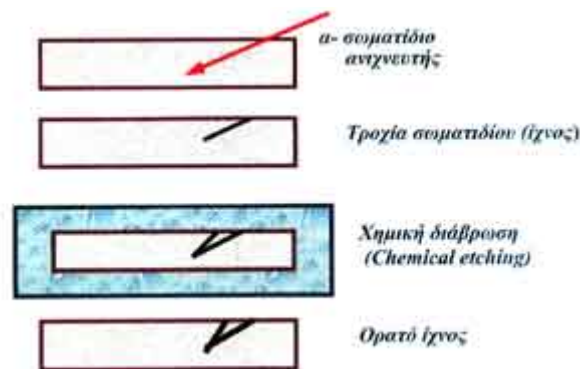
(γ) Εργασιακές δραστηριότητες, οι οποίες συνεπάγονται την παραγωγή καταλοίπων που συνήθως δεν θεωρούνται ραδιενεργά, αλλά περιέχουν φυσικά ραδιονουκλίδια και τα οποία προκαλούν σημαντική αύξηση της έκθεσης των εργαζομένων και ενδεχομένως του κοινού.

2.11 Μετρήσεις ραδονίου από την ΕΕΑΕ

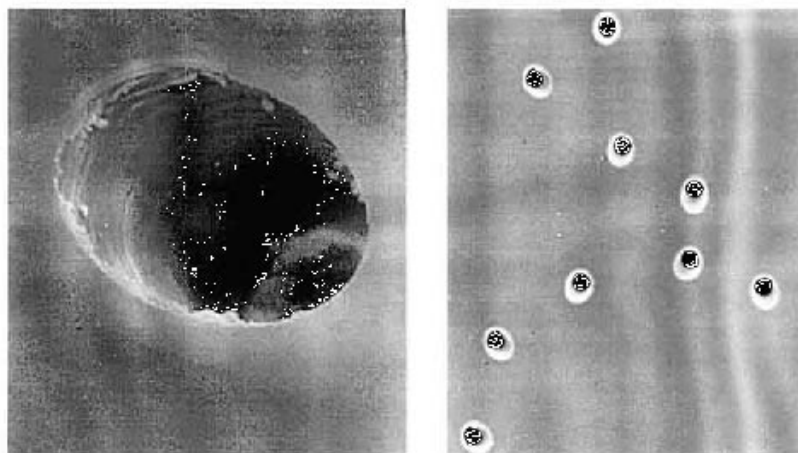
Η ΕΕΑΕ παρέχει από τον Μάρτιο του 1997 τη δυνατότητα μέτρησης δοσιμέτρων ραδονίου. Τα δοσίμετρα που χρησιμοποιούνται βασίζονται στους ανιχνευτές ιχνών. Οι παθητικοί ανιχνευτές ιχνών αποτελούν μία από τις μεθόδους επιλογής για ολοκληρωτικές μετρήσεις της συγκέντρωσης του ραδονίου στον εσωτερικό αέρα κατοικιών, και αυτό γιατί είναι μία απλή και οικονομική τεχνική. Η όλη μέθοδος βασίζεται στην τοποθέτηση ενός ανιχνευτή ιχνών SSNTD (Solid State Nuclear Track Detector) υπό μορφή πλακιδίου διαστάσεων από 2-5 cm και πάχους μερικών μm, μέσα σε ένα πλαστικό δοχείο.

Οι γνωστότεροι ανιχνευτές αυτής της κατηγορίας είναι τα πολυμερή CR-39, PADP και LR-115. Στο κάλυμμα του δοχείου τοποθετείται συνήθως φίλτρο το οποίο δεν επιτρέπει την είσοδο στο δοχείο των θυγατρικών που υπάρχουν στον αέρα του χώρου. Λόγω διάχυσης η συγκέντρωση του ραδονίου στο δοχείο είναι περίπου ίση με τη συγκέντρωση του ραδονίου στον περιβάλλοντα χώρο. Το δοσίμετρο (δοχείο με τον ανιχνευτή) τοποθετείται σε κάποιο σημείο της κατοικίας και αφήνεται εκεί για διάστημα από 1 μήνα έως και 1 χρόνο.

Μετά την πάροδο του χρόνου έκθεσης ο ανιχνευτής αφαιρείται και υποβάλλεται σε χημική διαδικασία επιλεκτικής διάβρωσης (chemical etching) με διάλυμα NaOH ή KOH. Με αυτή τη διαδικασία τα ίχνη τα οποία άφησαν στον ανιχνευτή τα α-σωματίδια που εκπέμφθηκαν από τη διάσπαση του ραδονίου μέσα στο δοχείο διευρύνονται και γίνονται ορατά σε οπτικό μικροσκόπιο όπου και καταμετρώνται.



Σχήμα 2.6 Διαδικασία χημικής διάβρωσης πλαστικού ανιχνευτή ιχνών



Σχήμα 2.7 Ίχνη ραδονίου σε ανιχνευτή ιχνών όπως φαίνονται σε (α) ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και σε (β) οπτικό μικροσκόπιο.

Με την κατάλληλη βαθμονόμηση η πυκνότητα ιχνών του ανιχνευτή (ίχνη/cm²) μετατρέπεται σε συγκέντρωση ραδονίου (Bq/m³) του εσωτερικού αέρα της κατοικίας. Όπως προαναφέρθηκε η μέτρηση αυτή ανήκει στην κατηγορία των ολοκληρωτικών μετρήσεων και το αποτέλεσμα αντιπροσωπεύει την ολοκληρωτική έκθεση.

2.12 Εφαρμογή της ραδιενέργειας στη ραδιοχρονολόγηση

2.12.1 Υπολογισμός ηλικίας της γης

Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή της γνώσης των ραδιενεργών στοιχείων υποβάλλεται για τον καθορισμό της ηλικίας της Γης. Μια μέθοδος του καθορισμού των ηλικιών των βράχων είναι βασισμένη στο γεγονός ότι σε πολλά μεταλλεύματα ουρανίου και θορίου, που έχουν αποσυντεθεί από το σχηματισμό τους, τα άλφα σωματίδια έχουν παγιδευτεί (ως άτομα ηλίου) στο εσωτερικό του βράχου. Με ακρίβεια καθορίζουν τα σχετικά ποσά του ηλίου, ουρανίου, και θορίου στο βράχο, κι έτσι μπορεί να υπολογιστεί το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου έχουν συνεχιστεί οι διαδικασίες αποσύνθεσης δηλαδή η ηλικία του βράχου.

Μια άλλη μέθοδος είναι βασισμένη στον προσδιορισμό της αναλογίας ουρανίου-238 προς το μόλυβδο-206 ή θορίου-232 προς το μόλυβδο-208 στους βράχους (δηλαδή οι αναλογίες των συγκεντρώσεων των αρχικών και τελικών μελών της ραδιενεργού σειράς αποσύνθεσης). Αυτές και άλλες μέθοδοι δίνουν τις τιμές για την ηλικία της γης περίπου 4.6 δισεκατομμύρια έτη. Παρόμοιες τιμές λαμβάνονται και για τους μετεωρίτες που έχουν πέσει στην επιφάνεια της γης, καθώς επίσης και για τα δείγματα της Σελήνης που ήλθαν πίσω από το διαστημικό σκάφος Απόλλωνα-11 τον Ιούλιο του 1969, δείχνοντας έτσι ότι ολόκληρο το ηλιακό σύστημα είναι πιθανώς της ίδιας σχεδόν ηλικίας όπως η Γη.

Οι μέθοδοι αυτοί ξεκίνησαν το 1905 με τον Rutherford και Boltwood που χρησιμοποίησαν για πρώτη φορά την αρχή της ραδιενεργής διάσπασης για τη χρονολόγηση ορυκτών και πετρωμάτων. Το 1907 ο Boltwood χρονολόγησε ένα δείγμα ουρανίτη με τη μέθοδο ουρανίου/μόλυβδου. Η ραδιοχρονολόγηση είχε επιτευχθεί πριν ακόμα είναι γνωστά με ακρίβεια τα ισότοπα και οι ρυθμοί διάσπασής τους. Ο Boltwood δημοσίευσε για πρώτη φορά απόλυτες ηλικίες πετρωμάτων της τάξης εκατομμυρίων χρόνων. Τα επόμενα σαράντα χρόνια η έρευνα οδήγησε στην ανάπτυξη και βελτίωση τεχνικών και μεθόδων για τη μέτρηση της ηλικίας γήινων υλικών. Η ακριβής χρονολόγηση τελειοποιήθηκε το 1950. Η ανακάλυψη του

φασματογράφου μάζας το 1919 οδήγησε στον εντοπισμό και τη μελέτη περισσότερων ισοτόπων.

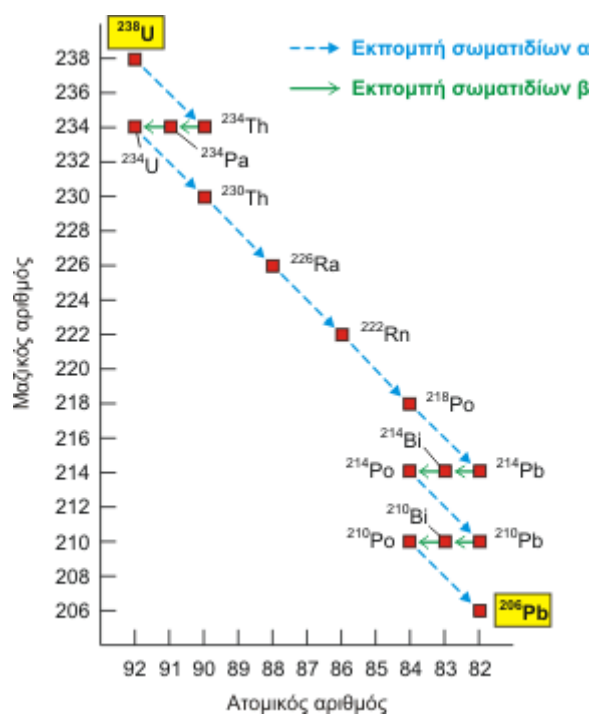
Όπως είδαμε πιο πάνω τα ασταθή ισότοπα μέσα από διαδοχικές ραδιενεργές διασπάσεις τείνουν να γίνουν σταθερά. Οι ραδιενεργοί μητρικοί πυρήνες μετατρέπονται -σταδιακά- σε θυγατρικούς σταθερούς πυρήνες σε καθορισμένο χρόνο, που είναι διαφορετικός για κάθε ισότοπο. Κάθε ραδιενεργό ισότοπο έχει το δικό του χρόνο ημιζωής. Ο λόγος της απομένουσας ποσότητας από το αρχικό ισότοπο προς το σύνολο των προϊόντων της διάσπασης (μητρικοί πυρήνες/θυγατρικοί πυρήνες) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ηλικίας των πετρωμάτων που περιέχουν ραδιενεργά ορυκτά.

Τα περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα έχουν γρήγορους ρυθμούς διάσπασης, δηλαδή μικρούς χρόνους ημιζωής και χάνουν τη ραδιενεργειά τους μέσα μερικές ημέρες ή έτη (το ιώδιο-131 έχει χρόνο ημιζωής 8,02 μέρες). Μερικά ραδιενεργά ισότοπα, όμως, αποσυντίθενται αργά και είναι αυτά που χρησιμοποιούνται ως γεωλογικά ρολόγια, υπολογίζουν δηλαδή την απόλυτη ηλικία των πετρωμάτων, των ορυκτών αλλά και γεγονότων που συνέβησαν πριν εκατομμύρια χρόνια. Το πιθανό σφάλμα στους χρόνους ημιζωής είναι πολύ μικρό, της τάξης του $\pm 2\%$.

2.12.2 Σειρές διασπάσεως

Στις σειρές διασπάσεως $^{238}\text{U} \Rightarrow ^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U} \Rightarrow ^{207}\text{Pb}$ και $^{232}\text{Th} \Rightarrow ^{208}\text{Pb}$, που αποτελούν τη βάση για τρεις διαφορετικές και ανεξάρτητες μεθόδους προσδιορισμού της ηλικίας γεωλογικών σχηματισμών, παράγονται και εκπέμπονται αρκετά σωματίδια α και β , σε μία ακολουθία ενδιάμεσων ραδιενεργών προϊόντων.

Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 3.7, όπου κανείς μπορεί να δει ότι όταν το μητρικό ραδιενεργό ^{238}U (ατομικός αριθμός 92, μαζικός αριθμός 238) διασπάται, εκπέμπει 8 σωματίδια α και 6 σωματίδια β πριν καταστεί το σταθερό θυγατρικό ^{206}Pb (ατομικός αριθμός 82, μαζικός αριθμός 206). Αυτό φυσικά γίνεται με τις διαδοχικές μετατροπές σε διάφορα στοιχεία. Εκπομπή 8 σωματιδίων α σημαίνει εκπομπή $8 \times 2 = 16$ πρωτονίων και $8 \times 2 = 16$ νετρονίων, δηλαδή μείωση του μαζικού αριθμού του μητρικού ισοτόπου κατά 32 και του ατομικού του αριθμού κατά 16. Ομοίως, εκπομπή 6 σωματιδίων β σημαίνει εκπομπή 6 ηλεκτρονίων από τον πυρήνα του, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ατομικού αριθμού κατά 6 χωρίς να μεταβάλλεται ο μαζικός αριθμός. Έχουμε δηλαδή συνολικά μείωση του μαζικού



Σχήμα 2.8 Σειρά ραδιενεργού διάσπασης στο πιο κοινό ισότοπο του ουρανίου (^{238}U). Πριν τη δημιουργία του τελικού προϊόντος της διάσπασης (^{206}Pb) δημιουργούνται διάφορα ισότοπα ως ενδιάμεσα προϊόντα.

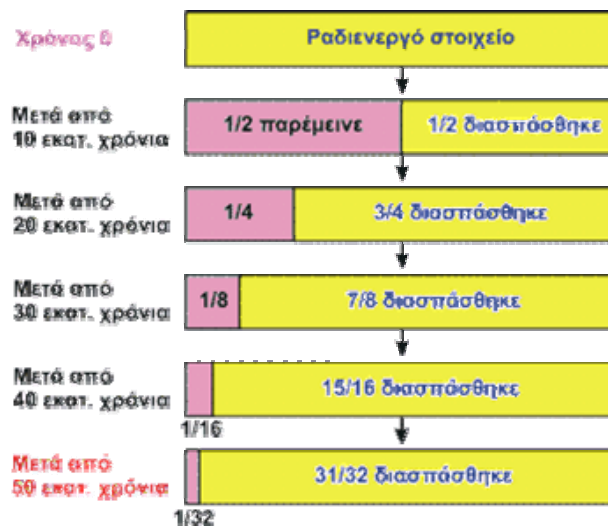
αριθμού κατά 32 ($238 \Rightarrow 206$) και του ατομικού αριθμού κατά 10 ($-16+6=10$, $92 \Rightarrow 82$).

Ας δούμε ένα πιο πρακτικό παράδειγμα ραδιοχρονολόγησης. Εάν θεωρήσουμε ότι αρχίζει η διάσπαση ενός ραδιενεργού υλικού βάρους ενός κιλού, η διάσπαση του μισού κιλού θα συντελεστή σε μία ημιπερίοδο ζωής, το μισό του υπολοίπου υλικού, δηλαδή το ένα τέταρτο, θα διασπαστεί σε μία άλλη ημιπερίοδο ζωής, το μισό του υπολοίπου, δηλαδή το ένα όγδοο, σε μία άλλη, κ.ο.κ.

Η αρχή της ραδιοχρονολόγησης μπορεί να εκφραστεί με το Σχήμα 3.8 όπου χρησιμοποιείται ένα υποθετικό ραδιενεργό μητρικό υλικό, με ημιπερίοδο ζωής 10 εκ. χρόνων, το οποίο διασπάται κατευθείαν στο σταθερό θυγατρικό προϊόν. Υπολογίζοντας τα ποσοστά του ραδιενεργού μητρικού και του σταθερού θυγατρικού μπορούμε να προσδιορίσουμε την ηλικία του δείγματος.

Στο παράδειγμα του σχήματος, όταν οι ποσότητες του μητρικού και του θυγατρικού είναι ίσες (αναλογία 1:1), γνωρίζουμε ότι έχει παρέλθει μία ημιπερίοδος ζωής και ότι η ηλικία του δείγματος είναι 10 εκ. χρόνια. Όταν η αναλογία είναι 1:3

σημαίνει ότι έχουν παρέλθει δύο ημιπερίοδοι ζωής και η ηλικία του δείγματος είναι 20 εκ. χρόνια ενώ όταν η αναλογία είναι 1:31 η ηλικία του δείγματος είναι 50 εκ. χρόνια αφού η αναλογία αυτή δείχνει παρέλευση πέντε ημιπεριόδων ζωής.



Σχήμα 2.9 Διάσπαση ενός υποθετικού ραδιενεργού ισότοπου με ημιπερίοδο ζωής 10 εκατομμύρια χρόνια.

Από τα διάφορα ραδιενεργά ισότοπα τα οποία βρίσκονται στη φύση, πέντε έχουν αποδειχθεί σημαντικά για την αξιόπιστη ραδιοχρονολόγηση των πετρωμάτων. Τα ισότοπα αυτά με τα αντίστοιχα σταθερά θυγατρικά τους και τις ημιπεριόδους ζωής τους απεικονίζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακα 2.3. Συνήθη ισότοπα που χρησιμοποιούνται στη γεωχρονολόγηση

Ραδιενεργό στοιχείο		Σταθερό ισότοπο (προϊόν διάσπασης)		Ημιπερίοδος ζωής
Ουράνιο-238	^{238}U	Μόλυβδος-206	^{206}Pb	4,5 δισεκατ. έτη
Ουράνιο-235	^{235}U	Μόλυβδος-207	^{207}Pb	713 εκατ. έτη
Θόριο-232	^{232}Th	Μόλυβδος-208	^{208}Pb	14,1 δισεκατ. έτη
Ρουβίδιο-87	^{87}Rb	Στρόντιο-87	^{87}Sr	47 δισεκατ. έτη
Κάλιο-40	^{40}K	Αργό-40	^{40}Ar	1,3 δισεκατ. έτη

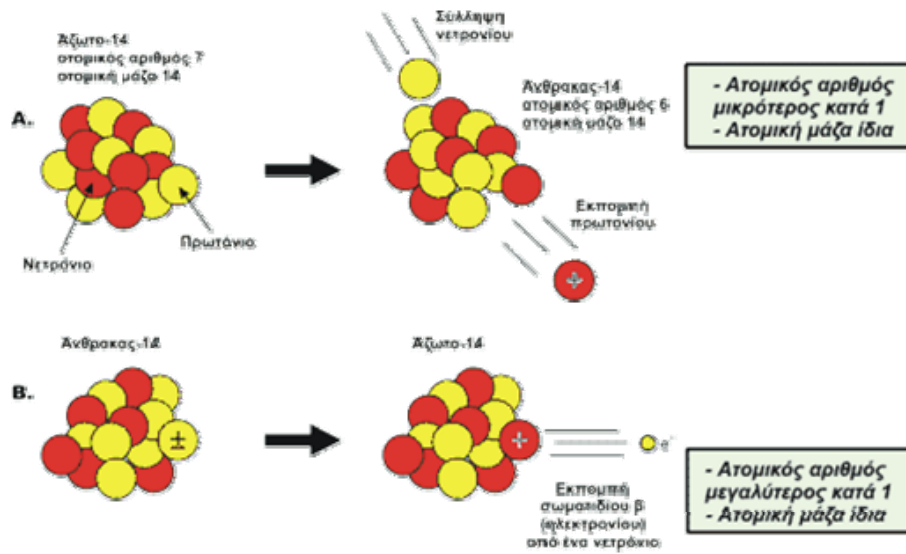
Παρόλο που η βασική αρχή της ραδιοχρονολόγησης είναι σχετικά απλή, η όλη διαδικασία είναι αρκετά πολύπλοκη και απαιτεί τη χρήση ακριβών και εξειδικευμένων οργάνων, των φασματογράφων μάζας. Οι αναλύσεις με τις οποίες προσδιορίζονται οι ποσότητες των μητρικών και θυγατρικών στοιχείων πρέπει να είναι μεγάλης ακρίβειας και γίνονται σε ειδικά εργαστήρια κάτω από συνθήκες μεγάλης καθαριότητας. Εκτός από αυτό, μερικά ραδιενεργά ισότοπα δεν διασπώνται κατευθείαν στο θυγατρικό τους προϊόν, όπως ήταν η περίπτωση του υποθετικού παραδείγματος που δώσαμε, γεγονός που κάνει την ανάλυση ακόμη πιο δύσκολη. Στην περίπτωση του ^{238}U , σχηματίζονται δεκατρία ενδιάμεσα ασταθή προϊόντα, πριν από το σχηματισμό του τελικού σταθερού ισότοπου ^{206}Pb (Πίνακας 3.3).

2.13 Ραδιοχρονολόγηση με τη χρήση του ^{14}C

Για χρονολόγηση πρόσφατων γεγονότων χρησιμοποιείται το ραδιενεργό ισότοπο του άνθρακα, ο ^{14}C , γνωστός και ως ραδιοάνθρακας. Επειδή η ημιπερίοδος ζωής του είναι μόλις 5730 χρόνια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χρονολόγηση γεγονότων από τους ιστορικούς χρόνους αλλά και για γεγονότα της πρόσφατης γεωλογικής ιστορίας, μέχρι και 75.000 χρόνων.

Ο ραδιοάνθρακας σχηματίζεται συνεχώς στην ανώτερη ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα βομβαρδισμού κοσμικής ακτινοβολίας, κατά τον οποίο κοσμική ακτινοβολία (πυρηνικά σωματίδια υψηλής ενέργειας) διασπά τους πυρήνες αερίων και απελευθερώνει νετρόνια. Τα νετρόνια στη συνέχεια απορροφούνται από άζωτο (N, ατομικός αριθμός 7, μαζικός αριθμός 14) αναγκάζοντας τον πυρήνα του να εκπέμπει ένα πρωτόνιο. Έτσι, ο ατομικός αριθμός του αζώτου μειώνεται κατά ένα - γίνεται 6 - με συνέπεια τη δημιουργία ενός νέου στοιχείου του ^{14}C (Σχήμα 3.9). Το ισότοπο αυτό του άνθρακα ενώνεται με οξυγόνο προς σχηματισμό διοξειδίου του άνθρακα, κυκλοφορεί στην ατμόσφαιρα και απορροφάται από τους ζώντες οργανισμούς. Ως αποτέλεσμα αυτού όλοι οι οργανισμοί περιέχουν ένα μικρό ποσοστό ραδιοάνθρακα.

Όσο ο οργανισμός είναι ζωντανός, ο διασπώμενος ραδιοάνθρακας αντικαθίσταται συνεχώς και έτσι η αναλογία του ^{14}C προς το πιο κοινό ισότοπο του άνθρακα, τον ^{12}C , παραμένει σταθερή. Όταν όμως ο οργανισμός πεθάνει, παύει να απορροφά διοξείδιο του άνθρακα και συνεπώς δεν παίρνει ραδιοάνθρακα για να αντικαταστήσει τον διασπώμενο. Αντίθετα, το ποσοστό του ραδιοάνθρακα εντός του



Σχήμα 2.10 (α) σχηματισμός και (β) διάσπαση του άνθρακα.

νεκρού οργανισμού μειώνεται βαθμιαία καθώς αυτός διασπάται προς σχηματισμό ^{14}N με εκπομπή β-σωματιδίων.

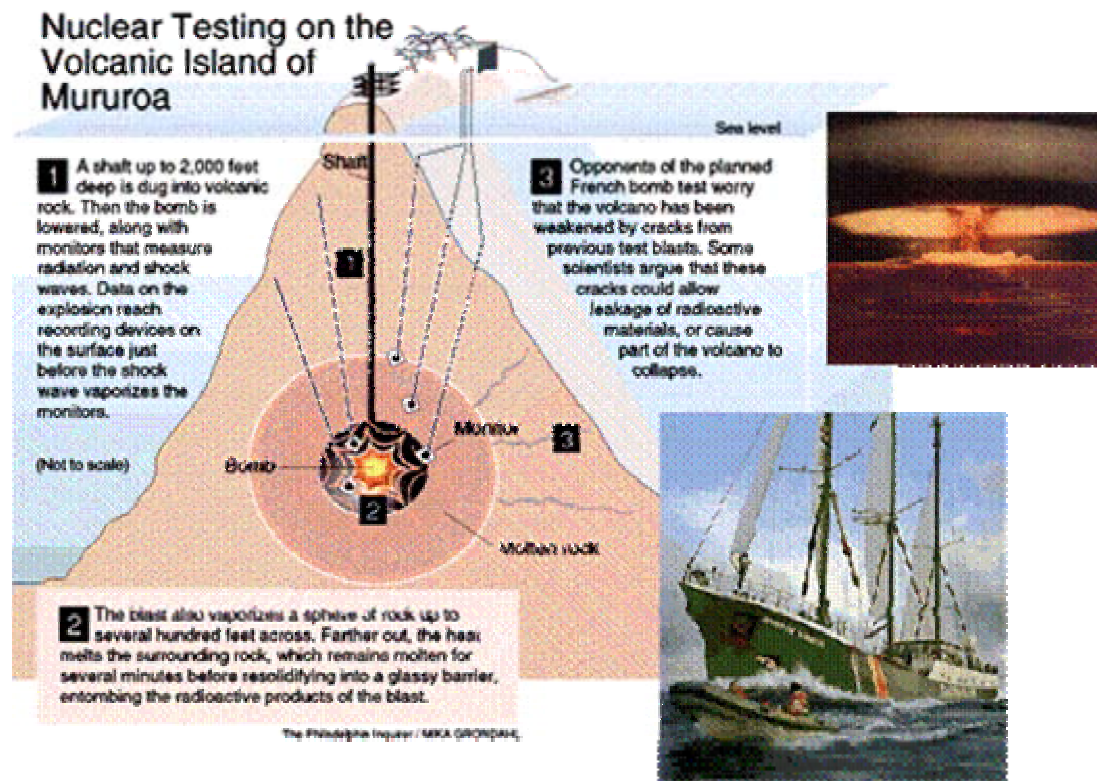
Συγκρίνοντας λοιπόν τις αναλογίες του ^{14}C και του ^{12}C σε ένα δείγμα, μπορούμε να προσδιορίσουμε την ηλικία του. Αν και ο ραδιοάνθρακας είναι χρήσιμος μόνο για τη χρονολόγηση του τελευταίου μικρού κλάσματος του γεωλογικού χρόνου, έχει καταστεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τους ανθρωπολόγους, τους αρχαιολόγους, καθώς και για τους γεωλόγους οι οποίοι μελετούν την πολύ πρόσφατη ιστορία της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Τεχνητές πηγές ραδιενέργειας

3.1 Γενικά

Ενώ στη φύση υπάρχουν μερικές δεκάδες ασταθή ισότοπα (ραδιοϊσότοπα), ο άνθρωπος μετά την ανακάλυψη και μελέτη της δομής του πυρήνα, κατόρθωσε να παράγει με κατάλληλο βομβαρδισμό των 100 στοιχείων της φύσης, πάνω από 2000 τεχνητά ραδιοϊσότοπα. Ο βομβαρδισμός γίνεται με νετρόνια μέσα σε ατομικούς αντιδραστήρες, ή με άλλα στοιχειώδη σωμάτια ή πυρήνες με τη βοήθεια επιταχυντών. Τα βαριά στοιχεία παράγουν περισσότερα ραδιοϊσότοπα απ' ό,τι τα ελαφριά. Για παράδειγμα, το Ιώδιο έχει 20 γνωστά ραδιοϊσότοπα, ενώ το Υδρογόνο έχει μόνον ένα. Επιπλέον, μεγάλες ποσότητες από ραδιοϊσότοπα παράγονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων και κατά την έκρηξη μιας πυρηνικής βόμβας.

Η έντονη έρευνα για τις πυρηνικές αντιδράσεις και η αναζήτηση νέων τεχνητών ραδιενεργειών, ειδικά μεταξύ των βαρύτερων στοιχείων, ήταν υπεύθυνες για την ανακάλυψη της πυρηνικής διάσπασης και επομένως της ανάπτυξης της ατομικής βόμβας. Οι έρευνες έχουν οδηγήσει επίσης στην ανακάλυψη διάφορων νέων στοιχείων που δεν υπάρχουν στη φύση. Η ανάπτυξη των πυρηνικών αντιδραστήρων έχει καταστήσει πιθανή την παραγωγή σε μια μεγάλη κλίμακα των ραδιενεργών ισωτόπων σχεδόν όλων των στοιχείων του περιοδικού πίνακα, και η διαθεσιμότητα αυτών των ισωτόπων αποτελεί μια ανυπολόγιστη ενίσχυση στην χημική, στην βιολογική και τέλος στην ιατρική έρευνα. Από αυτά με τη μεγάλη σημασία μεταξύ των τεχνητά παραχθέντων ραδιενεργών ισωτόπων είναι ο άνθρακας-14, ο οποίος έχει χρόνο ημιζωής 5730 ± 40 έτη. Η διαθεσιμότητα αυτής της ουσίας έχει



Σχήμα 3.1 Νησιά MURUROA, Γαλλικές πυρηνικές δοκιμές

καταστήσει πιθανή την έρευνα πολυάριθμων πτυχών των διαδικασιών της ζωής, όπως είναι η φωτοσύνθεση με ένα πιο θεμελιώδη τρόπο από αυτόν που έως τώρα θεωρείτο πιθανόν.

Όλα τα ραδιενεργά υλικά μαυρίζουν τα φωτογραφικά φιλμ, προκαλούν φθορισμό, ιονίζουν τα αέρια, εκπέμπουν θερμότητα και έχουν βιολογικές επιδράσεις. Από τις ιδιότητες αυτές πολλές χρησιμοποιούνται σε τεχνικές και θεραπευτικές εφαρμογές αλλά αρκετές έχουν βλαβερές συνέπειες για τους ζωντανούς οργανισμούς. Η πιο βασική επίδραση είναι στα γονίδια των χρωμοσωμάτων, όπου λόγω μεταλλάξεων παρουσιάζονται μεταβολές αυτόματες και απόγονοι με ψυχοσωματικές ανωμαλίες οι οποίες είναι κληρονομικές. Για την προστασία των εργαζομένων σε θεραπευτικές ή βιομηχανικές μονάδες καθιερώθηκαν διεθνώς μέγιστα επιτρεπτά όρια δόσης ακτινοβολίας για τα διάφορα μέρη του σώματος. Θύματα του αόρατου θανάτου που φέρουν οι ραδιενεργές ακτινοβολίες ήταν η Μαρία Κιουρί, καθώς και η κόρη της Ειρήνη με το σύζυγο της Φ. Ζολιό. Στη σύγχρονη εποχή στα κέντρα ατομικών ερευνών χρησιμοποιούνται προστατευτικές στολές και λαβίδες, ανιχνευτές που προειδοποιούν ότι η ραδιενέργεια ξεπέρασε το μέγιστο επιτρεπτό όριο και

ρομπότ για το χειρισμό των επικίνδυνων υλικών. Το πρόβλημα όμως της αντιμετώπισης των κινδύνων που προέρχονται από τη ραδιενέργεια γίνεται περισσότερο δύσκολο, καθώς η ατομική ενέργεια παίρνει ρυθμιστική ενεργειακή θέση μετά την κρίση πετρελαίου που άρχισε μετά το 1974-1975 και ανάγκασε τους επιστήμονες να αναζητήσουν άλλες πηγές ενέργειας. Τα υποπροϊόντα ή ραδιενεργά κατάλοιπα τόσο των ειρηνικών όσο και των πολεμικών εφαρμογών της ατομικής ενέργειας αποτελούν ένα οξύ πρόβλημα, γιατί πρέπει να δεσμευτούν και να απομακρυνθούν χωρίς να αποτελέσουν πηγές κινδύνου. Κύριες μέθοδοι απομάκρυνσης των ραδιενεργών αποβλήτων ή σκουπιδιών είναι η ταφή, η καταβύθιση και η σπογγώδης σταθεροποίηση. Όσο για τα ραδιενεργά κατάλοιπα, έμμεσα και άμεσα των πολεμικών εφαρμογών, αρκεί να φέρει κανείς στο μυαλό του τα αποτελέσματα της έκρηξης της ατομικής βόμβας στη Χιροσίμα.

Το 1963 οι ΗΠΑ, η τότε ΕΣΣΔ και η Μ. Βρετανία υπέγραψαν συμφωνία που απαγόρευε όλες τις πυρηνικές δοκιμές, εκτός από τις υπόγειες. Από το 1959, οπότε εγκαινιάστηκε το πρώτο σκάφος που κινείται με ατομική ενέργεια, ήταν ορατός και ο κίνδυνος μόλυνσης των ωκεανών του πλανήτη από ραδιενέργεια. Ο κίνδυνος από τη ραδιενέργεια έγινε πιο ορατός με το ατύχημα του Τσερνομπίλ το 1986.

3.2 Πυρηνικοί Αντιδραστήρες

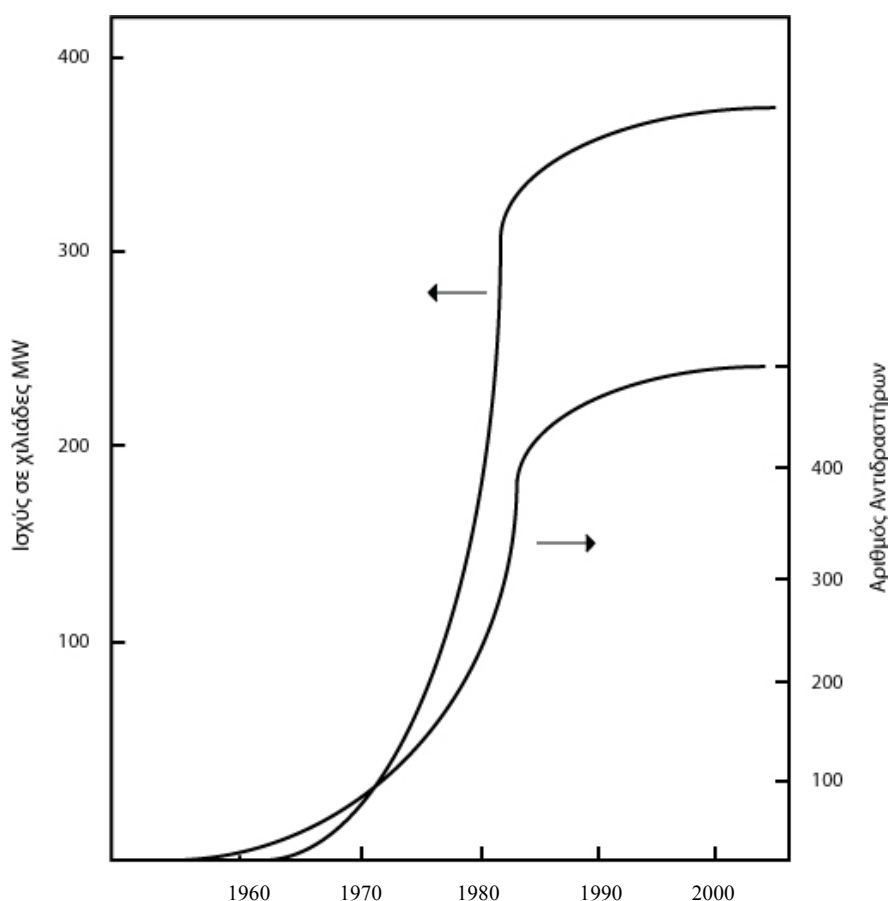
3.2.1 Κύκλος πυρηνικού καυσίμου

Η επινόηση από τον άνθρωπο των τεχνητών τρόπων απελευθέρωσης της τεράστιας ενέργειας που περικλείεται στον πυρήνα, οδήγησε στην κατασκευή των πυρηνικών αντιδραστήρων και των πυρηνικών όπλων. Στις 2 Δεκεμβρίου του 1942 μια ομάδα επιστημόνων με επικεφαλής τον Ενρίκο Φέρμι πέτυχε την πρώτη αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση στο πανεπιστήμιο του Σικάγου. Η ημερομηνία αυτή αναφέρεται ως «η Έναρξη της Πυρηνικής Εποχής».

Οι πρώτοι αντιδραστήρες που κατασκευάστηκαν μετά την επιτυχία του πειράματος στο Σικάγο, είχαν καθαρά ερευνητικό χαρακτήρα. Το κύριο προϊόν τους είναι δέσμες νετρονίων που χρησιμοποιούνται για έρευνα στην Πυρηνική Φυσική και στη μελέτη των ιδιοτήτων των υλικών. Πολύ σύντομα άρχισε και η παραγωγή ραδιοϊσοτόπων μέσα στους αντιδραστήρες για ιατρικές εφαρμογές. Ένας μεγάλος αριθμός ερευνητικών αντιδραστήρων λειτουργεί σήμερα στα διάφορα ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια. Η ισχύς τους είναι μικρή και κυμαίνεται από 1-10 MW.

Ο πυρηνικός αντιδραστήρας του «Δημόκριτου» άρχισε να λειτουργεί το 1962 με ισχύ 1 MW, η οποία αργότερα αυξήθηκε στα 5 MW. Η κύρια του χρήση σήμερα είναι η παραγωγή ραδιοϊσοτόπων για τις ανάγκες των νοσοκομείων.

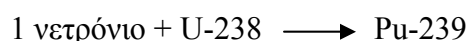
Οι πρώτοι αντιδραστήρες για παραγωγή ενέργειας άρχισαν να λειτουργούν το 1956 με ισχύ 50 MW. Στο σχήμα 3.2 φαίνεται η ανάπτυξη παραγωγής πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος τα τελευταία 50 χρόνια, με βάση τις παραγγελίες που είχαν γίνει μέχρι το 1984. Πρέπει να σημειωθεί ότι μετά το ατύχημα που έγινε στο Three Miles Island της Αμερικής το 1979 σταμάτησαν οι παραγγελίες στα αμερικανικά εργοστάσια κατασκευής αντιδραστήρων. Σ' αυτό το λόγο οφείλεται και η διακοπή της αύξησης του αριθμού αντιδραστήρων μετά το 1990. (Χρειάζονται περίπου 10 χρόνια από την ημερομηνία παραγγελίας μέχρι την πρώτη λειτουργία ενός νέου πυρηνικού αντιδραστήρα).



Σχήμα 3.2 Χρονική εξέλιξη του συνολικού αριθμού των εγκατεστημένων πυρηνικών αντιδραστήρων και της συνολικής ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδουν.

Το καύσιμο υλικό των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι το ισότοπο Ουράνιο-235. Το ισότοπο αυτό συνοδεύει σε ποσοστό 0,7% το φυσικό Ουράνιο, όπως εξορύσσεται από τη Γη, ενώ δεν είναι κατάλληλο για να συντηρήσει την πυρηνική σχάση, άλλα είναι χρήσιμο για την παραγωγή του Πλουτωνίου-239. Η αναλογία των δύο ισωτόπων του Ουρανίου στη φύση δεν είναι αρκετή για τη δημιουργία συνθηκών κρίσιμης μάζας με φυσικό Ουράνιο, για αυτό το λόγο είναι απαραίτητος ο εμπλουτισμός του Ουρανίου-238 με Ουράνιο-235 (μόνο στον Καναδά λειτουργεί ένας τύπος αντιδραστήρα – CANDU – που λειτουργεί με φυσικό Ουράνιο). Ο διαχωρισμός του Ουρανίου-235 από το Ουράνιο-238 γίνεται με φυσικές μεθόδους διάχυσης ή φυγοκέντρωσης. Ο εμπλουτισμός που συνήθως χρησιμοποιείται είναι 2-4%. Το προϊόν αυτής της επεξεργασίας είναι υπό τη μορφή οξειδίου του Ουρανίου σε σχήμα μικρών δισκίων. Τα δισκία τοποθετούνται σε μεταλλικούς σωλήνες με λεπτά τοιχώματα που σχηματίζουν τις «σχάσιμες ράβδους». Ένας αριθμός από αυτές τις ράβδους (40-60) τοποθετούνται σε μακριά μεταλλικά δοχεία που αποτελούν τα σχάσιμα στοιχεία. Τα σχάσιμα στοιχεία τοποθετούνται κατακόρυφα σε μεταλλικό κριώμα με κατάλληλες υποδοχές και το σύστημα αυτό αποτελεί την καρδιά του αντιδραστήρα. Ένας αντιδραστήρας ηλεκτρικής ισχύος 1000MW (η αντίστοιχη θερμική ισχύς του είναι 3000MW) φορτίζεται αρχικά με 100 περίπου τόννους Ουρανίου που είναι κατανεμημένο σε 40000 περίπου σχάσιμες ράβδους.

Ένα άλλο ισότοπο που χρησιμοποιείται ως σχάσιμο υλικό είναι το Πλουτώνιο-239 Το ισότοπο αυτό δεν απαντάται στη φύση, άλλα δημιουργείται τεχνητά μέσα στους αντιδραστήρες Ουρανίου με την ακόλουθη αντίδραση:



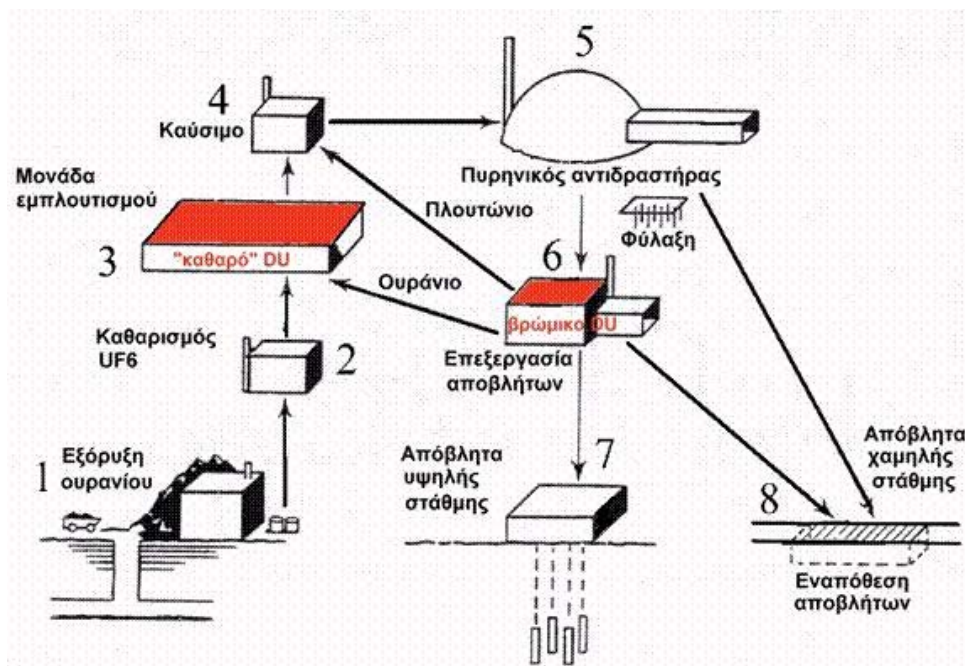
Εδώ ακριβώς βρίσκεται και η αρχή των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων. Το Ουράνιο-238 που αποτελεί το 97% περίπου του Ουρανίου του αντιδραστήρα δίνει ως παραπροϊόν της λειτουργίας του το σχάσιμο υλικό Πλουτώνιο. Αυτό, στη συνέχεια με κατάλληλο διαχωρισμό, χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του ίδιου ή άλλου αντιδραστήρα (άλλα και για τη κατασκευή των ατομικών όπλων).

Σε ένα ατομικό εργοστάσιο, η καρδιά του αντιδραστήρα τοποθετείται σε ένα χαλύβδινο δοχείο μέσα από το οποίο περνάει το ψυκτικό υλικό. Η εκλυόμενη ενέργεια από την πυρηνική σχάση μεταφέρεται υπό τη μορφή θερμικής ενέργειας μέσω του ψυκτικού υλικού και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια όπως σε ένα τυπικό ατμοηλεκτρικό εργοστάσιο.

Μετά από ένα χρονικό διάστημα λειτουργίας του αντιδραστήρα, ένα ποσοστό του σχάσιμου υλικού έχει διασπαστεί και απαιτείται η ανανέωση του. Η ανανέωση είναι αναγκαία αφ' ενός γιατί το σχάσιμο υλικό δεν επαρκεί για την διατήρηση της σχέσης κρισιμότητας, αφ' ετέρου γιατί μερικά από τα προϊόντα σχάσης (όπως είναι το Ξένο π.χ.) παρουσιάζουν μεγάλη απορροφητικότητα στα νετρόνια δημιουργώντας έτσι την πρόσθετη απόκλιση από την κρισιμότητα. Η διαδικασία της ανανέωσης των σχάσιμων στοιχείων γίνεται συνήθως μια φορά το χρόνο. Σε ορισμένους τύπους αντιδραστήρων η ανανέωση γίνεται συνεχώς με τον αντιδραστήρα σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

Επειδή τα σχάσιμα στοιχεία που αντικαθίστανται έχουν ακόμη σημαντικές ποσότητες σχάσιμου υλικού (καθώς και Πλουτώνιο-239) επακολουθεί η διαδικασία της επανάκτησης. Αυτή ονομάζεται φάση «επανεπεξεργασίας», όπου σε ειδικά εργοστάσια γίνεται ο διαχωρισμός του Ουρανίου-235 και του Πλουτωνίου-239 από το Ουράνιο-238 και από τα άλλα προϊόντα της σχάσης. Τα τελευταία αποτελούν τον κύριο όγκο των ραδιενεργών καταλοίπων και η ασφαλής αποθήκευσή τους αποτελεί την τελευταία φάση (και πιο προβληματική) της λειτουργίας ενός πυρηνικού εργοστασίου.

Οι διάφορες φάσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω και συνδέονται με τη λειτουργία ενός πυρηνικού εργοστασίου αποτελούν τον “κύκλο του πυρηνικού καυσίμου” (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Πυρηνικός κύκλος καυσίμου

3.2.2 Κίνδυνοι από ραδιενέργεια στον κύκλο του πυρηνικού καυσίμου

Μέσα στην καρδιά του αντιδραστήρα, άλλα και στα διάφορα στάδια του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου, συγκεντρώνονται τεράστια ποσά ραδιενέργειας. Η ραδιενέργεια ενός ατομικού εργοστασίου 1000MW φτάνει τα 17 δισεκατομμύρια Ci πριν την ανανέωση των στοιχείων του. Σ' ένα εργοστάσιο επανεπεξεργασίας το επίπεδο ραδιενέργειας φτάνει τα 500 εκατομμύρια Ci. Τεράστια και πολυέξοδα μέτρα ασφαλείας έχουν ληφθεί για την αποφυγή διαρροής ραδιενέργειας στα διάφορα στάδια του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι από τις μικρές (φυσιολογικές) διαρροές αυτού του κύκλου η συνολική ετήσια δόση είναι μόνο 0.00003mSv ανά κάτοικο στον πλανήτη μας (τιμές 1970) από το σύνολο του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου. Η τιμή αυτή που δίνεται στη βιβλιογραφία είναι κάπως παραπλανητική. Από το 1970 μέχρι σήμερα έχει δεκαπλασιαστεί ο αριθμός των ατομικών εργοστασίων και έχουν γίνει ήδη δύο σοβαρά ατυχήματα από τα οποία αυτό του Τσερνομπίλ μόλυνε το περιβάλλον με εκατομμύρια Ci. Είναι προφανές ότι μια συχνή επανάληψη τέτοιων ατυχημάτων θα έχει ως συνέπεια την αύξηση της δόσης από την πυρηνική ενέργεια σε επίπεδα συγκρίσιμα με τις ετήσιες δόσεις από τη φυσική ραδιενέργεια και από τις ιατρικές εφαρμογές.

Κίνδυνοι από ραδιενέργεια εμφανίζονται σε όλα τα στάδια του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου. Οι σημαντικότεροι κίνδυνοι που αφορούν το κοινωνικό σύνολο εντοπίζονται στο στάδιο λειτουργίας του αντιδραστήρα, στο στάδιο της επανεπεξεργασίας, καθώς και στην αποθήκευση των ραδιενεργών καταλοίπων. Σκοπός των εργοστασίων επανεπεξεργασίας είναι η επανάκτηση του Ουρανίου-235 και του Πλουτωνίου-239 που βρίσκονται στα σχάσιμα στοιχεία μετά την απομάκρυνσή τους από τον αντιδραστήρα. Υπολογίζεται ότι το καύσιμο των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων ανακυκλώνεται έξι φορές πριν εγκαταλειφθεί η παραπέρα ανακύκλωσή του για λόγους οικονομίας.

Αρχικά, τα στοιχεία που απομακρύνονται από την καρδιά του αντιδραστήρα αποθηκεύονται σε κατάλληλους χώρους για ένα διάστημα έξι περίπου μηνών, για να μειωθεί η ραδιενέργεια τους από τα βραχύβια ισότοπα. Στη συνέχεια, τοποθετούνται σε ειδικά θωρακισμένα δοχεία, στα οποία υπάρχει και πρόβλεψη ψύξης για τη μεταφορά τους στο εργοστάσιο επανεπεξεργασίας. Είναι προφανείς οι κίνδυνοι κατά τη μεταφορά ενός «τέτοιου φορτίου», για αυτό και αποδίδεται μεγάλη σημασία στα μέσα της ασφαλούς μετακίνησης.

Η εκφόρτωση των στοιχείων γίνεται μέσα σε μεγάλες δεξαμενές νερού, όπου παραμένουν μέχρις ότου αρχίσει η επανεπεξεργασία τους. Σε πρώτη φάση, τα στοιχεία κόβονται με ειδικά υδραυλικά ψαλίδια σε μικρότερα κομμάτια και στη συνέχεια τοποθετούνται σε δοχεία που περιέχουν ισχυρά οξέα, όπου και διαλύονται. Το ραδιενεργό υγρό που προκύπτει μεταφέρεται και σε διαδοχικά στάδια διαχωρίζεται στα τελικά προϊόντα Ουρανίου, Πλουτωνίου και προϊόντα σχάσης. Ένας σοβαρός κίνδυνος που δημιουργείται από την παραπάνω διαδικασία είναι η συγκέντρωση ραδιενεργών πτητικών ουσιών, η κατακράτηση των οποίων είναι δύσκολη και αυξάνει σημαντικά το κόστος της επανεπεξεργασίας. Τέτοιες ουσίες είναι το Τρίτιο (H-3), ο Άνθρακας-14, το Κρυπτό-85 και το Ξένο-133. Τα δύο τελευταία είναι ευγενή αέρια και η κατακράτησή τους γίνεται με πολύπλοκες φυσικές μεθόδους.

Το υψηλό κόστος και οι κίνδυνοι που δημιουργούνται στα εργοστάσια επανεπεξεργασίας έχουν κάνει περιορισμένη τη χρήση τους. Σήμερα τέτοια εργοστάσια υπάρχουν μόνο στη Γαλλία και στη Μ. Βρετανία, τα οποία κάνουν επανεπεξεργασία για λογαριασμό άλλων χωρών.

3.2.3 Αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων

Το μεγάλο πρόβλημα των ραδιενεργών αποβλήτων είναι η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή τους και η «ραδιενεργός παρουσία» τους για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια. Η παγκόσμια παραγωγή αποβλήτων το έτος 2000 έχει φτάσει τους 172000 μετρικούς τόνους.

Οι μέθοδοι αποθήκευσης που έχουν προταθεί κατά καιρούς είναι:

- (α) Αποθήκευση σε τρύπες που θα ανοιχτούν στον πυθμένα ωκεανών
- (β) Αποστολή στο διάστημα με πυραύλους
- (γ) Αποθήκευση σε κοιλάματα αλατωρυχείων ή άλλων ανθεκτικών γεωλογικών σχηματισμών.

Από τις τρεις μεθόδους, αυτή που κερδίζει συνεχώς έδαφος είναι η Τρίτη. Ήδη υπάρχει επίσημη πρόταση από τις Σουηδικές εταιρείες αντιδραστήρων, γνωστή ως KBS-3. Σε αυτήν προτείνεται αποθήκευση των αποβλήτων για 40 χρόνια σε υπόγειες δεξαμενές νερού και στη συνέχεια συμπύκνωση σε χάλκινα δοχεία και τοποθέτηση σε κοιλάτητες βράχων 500 μέτρα κάτω από το έδαφος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη Σουηδία καθώς και σε άλλες χώρες ο νόμος προβλέπει την υποβολή συγκεκριμένων λύσεων για την αποθήκευση των ραδιενεργών αποβλήτων

προκειμένου να δοθεί άδεια λειτουργίας ατομικών εργοστασίων. Άλλες λύσεις αποβλέπουν στη συμπίκνωση των αποβλήτων και στη σύντηξη με γυαλί και εν τη συνέχεια αποθήκευσή τους σε αλατωρυχεία (ΗΠΑ).

Όλες οι λύσεις που έχουν προταθεί έχουν επικριθεί από οικολόγους και ειδικούς επιστήμονες όσον αφορά τις δυνατότητες διαρροής. Η συζήτηση γύρω από αυτό το θέμα κάθε άλλο παρά αντικειμενική μπορεί να θεωρηθεί και πολλές φορές επηρεάζεται από πολιτικούς λόγους. Δεδομένου ότι η οριστική λύση της αποθήκευσης απαιτεί πολυέξοδα και πολύχρονα πειράματα, έχει ακόμη προταθεί σαν εναλλακτική λύση η προσωρινή αποθήκευσή στους χώρους παραγωγής των αποβλήτων μέχρις ότου βρεθεί μια γενικά αποδεκτή λύση.

Ένας από τους λόγους που καθυστέρησε η αντιμετώπιση του προβλήματος της αποθήκευσης των καταλοίπων ήταν και το πρόβλημα της επανεπεξεργασίας. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980 υπήρχε διάχυτη η εντύπωση ότι οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες θα χρησιμοποιούνταν σχετικά γρήγορα (μέσα στα επόμενα 20 χρόνια). Η προοπτική αυτή ανέβαζε την αξία του Πλουτωνίου που χρησιμοποιείται ως καύσιμο στους αντιδραστήρες αυτούς και έκανε την επανεπεξεργασία του ακτινοβολούμενου (σε κοινούς αντιδραστήρες) καυσίμου οικονομικά ελκυστική, αν όχι απαραίτητη για την ανάκτηση του Πλουτωνίου που περιέχεται σ' αυτό. Από τις αρχές μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980 φάνηκε οριστικά ότι η σε μεγάλη κλίμακα εισαγωγή των ταχέων αναπαραγωγικών αντιδραστήρων και κατά συνέπεια του Πλουτωνίου έχει ακόμη και με τις πιο αισιόδοξες προβλέψεις απομακρυνθεί για το 2010 και μετά. Επιπροσθέτως η οικονομική σημασία του Πλουτωνίου στο ακτινοβολούμενο σε κοινούς αντιδραστήρες καύσιμο έχει αναθεωρηθεί προς τα κάτω. Κατά συνέπεια η τελική διάθεση των καταλοίπων μπορεί να προχωρήσει χωρίς προβλήματα ή ερωτηματικά για το αν θα γίνει επανεπεξεργασία για το διαχωρισμό του Πλουτωνίου.

3.3 Το απεμπλουτισμένο Ουράνιο

3.3.1 Προέλευση

Το φυσικό ουράνιο είναι στοιχείο των πετρωμάτων του στερεού φλοιού της γης. Χρησιμοποιείται, μεταξύ άλλων και στην παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Το φυσικό ουράνιο εμπεριέχει τρία βασικά ραδιενεργά ισότοπα, το U-238, το U-235 και τοU-234.

Το απεμπλουτισμένο ουράνιο (Depleted Uranium– DU) είναι παραπροϊόν της διαδικασίας του εμπλουτισμού του ουρανίου που εφαρμόζεται στη βιομηχανία της πυρηνικής ενέργειας. Κατά την διαδικασία αυτή αποχωρίζεται από το φυσικό ουράνιο για μετέπειτα επεξεργασία σχεδόν όλη η ποσότητα του U-234 και περίπου τα 2/3 της αντίστοιχης του U-235. Το εναπομένον προϊόν είναι το λεγόμενο απεμπλουτισμένο ουράνιο (DU) και αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από U-238. Η ραδιενέργειά του DU είναι σχετικά χαμηλή και αντιστοιχεί ανά μονάδα μάζας στο 40% περίπου της αντίστοιχης του φυσικού ουρανίου. Χημικά, φυσικά και τοξικολογικά, η μεταλλική μορφή του απεμπλουτισμένου ουρανίου συμπεριφέρεται κατά τον ίδιο τρόπο όπως η μεταλλική μορφή του φυσικού ουρανίου. Μικρά σωματίδια του μετάλλου κάτω από ορισμένες συνθήκες, αυταναφλέγονται εύκολα (φαινόμενο πυροφορίας), παράγοντας οξείδια του ουρανίου.

Λόγω της υψηλής πυκνότητας και της διαθεσιμότητάς του ως παραπροϊόν της βιομηχανίας, το DU χρησιμοποιείται στη πολεμική βιομηχανία ως βαριά θωράκιση σε άρματα, σε αντιαρματικά βλήματα και σε πύραυλους. Τα όπλα απεμπλουτισμένου ουρανίου θεωρούνται συμβατικά και μπορούν ελεύθερα να χρησιμοποιηθούν από τις ένοπλες δυνάμεις. Ανάλογα με τις συνθήκες πρόσκρουσης, μέρος του απεμπλουτισμένου ουρανίου μπορεί να απελευθερωθεί με την μορφή σχετικά μικρών διαλυτών σωματιδίων οξειδίων ουρανίου καθώς επίσης και σε σχετικά μεγαλύτερα κομμάτια μεταλλικού ουρανίου.

Στις ειρηνικές εφαρμογές το απεμπλουτισμένο ουράνιο χρησιμοποιείται ως αντίβαρο στα αεροπλάνα, έρμα στα σκάφη και ως θωράκιση στα μηχανήματα ακτινοθεραπείας και στην μεταφορά ραδιενεργών πηγών.

Κατά τη χρήση των πυρομαχικών με απεμπλουτισμένο ουράνιο, απελευθερώνεται ποσότητα οξειδίων DU με την μορφή μικρών σωματιδίων που μπορούν να προσληφθούν από τον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της εισπνοής ή της κατάποσης ή να παραμείνουν και να ραδιορυπάνουν το περιβάλλον. Η χρήση απεμπλουτισμένου ουρανίου στην περιοχή του κόλπου και πρόσφατα σε αυτήν της πρώην Γιουγκοσλαβίας, έχει προκαλέσει ανησυχία για τις επιπτώσεις του στην υγεία του πληθυσμού που ζει στις προσβληθείσες περιοχές. Υπάρχουν υποψίες ότι το λεγόμενο "Σύνδρομο του Κόλπου" σχετίζεται με την παρουσία του απεμπλουτισμένου ουρανίου αλλά κάτι τέτοιο δεν επιβεβαιώνεται επιστημονικά.

3.3.2 Επιδράσεις του DU στην ανθρώπινη υγεία

Οι επιπτώσεις του DU στην ανθρώπινη υγεία είναι σύνθετες οφειλόμενες στις χημικές, ραδιολογικές και φυσικές ιδιότητές του. Επακριβείς επιστημονικές πληροφορίες για τις επιπτώσεις του στην υγεία και στο περιβάλλον είναι περιορισμένες διότι ως επί τω πλείστον αναφέρονται στις αντίστοιχες επιπτώσεις του φυσικού ουρανίου. Παρόλα αυτά, αφού το απεμπλουτισμένο ουράνιο και το φυσικό ουράνιο διαφέρουν μόνο στη σύνθεση των ραδιενεργών των συνιστωσών, οι επιστημονικές μελέτες με θέμα το μεταλλικό ουράνιο είναι εφαρμόσιμες και στο απεμπλουτισμένο ουράνιο.

Οι επιδράσεις στην υγεία εξαρτώνται από το είδος της έκθεσης (εσωτερική ή εξωτερική), την οδό της ραδιορύπανσης (κατάποση, εισπνοή, τραύμα), τα χαρακτηριστικά του απεμπλουτισμένου ουρανίου (διαλυτά ή αδιάλυτα σωματίδια), το σκηνικό (στρατιωτικό, πολιτικό, επαγγελματικό).

Εξωτερική έκθεση έχουμε κατά τον φυσικό χειρισμό υλικού με DU (πχ εργασία σε αποθήκη πυρομαχικών με DU, σε όχημα που μεταφέρει πυρομαχικά με DU ή είναι θωρακισμένο με DU) ή μέσω επαφής με σκόνη που συνοδεύει την έκρηξη ή την πρόσκρουση βλημάτων με απεμπλουτισμένο ουράνιο. Οι επιπτώσεις λόγω εξωτερικής έκθεσης και μόνον (χωρίς εισπνοή ή κατάποση), περιορίζονται στη ραδιολογική δράση του DU.

Εσωτερική έκθεση έχουμε από κατάποση, εισπνοή, τραύματα. Οι επιπτώσεις οφείλονται στη χημική και τη ραδιολογική δράση του DU.

Κατάποση ή εισπνοή μεγάλων ποσοτήτων διαλυτών ενώσεων απεμπλουτισμένου ουρανίου μπορεί να προκαλέσει οξεία νεφρική βλάβη. Κατά την κατάποση ακόμα και για τις διαλυτές μορφές, μόνο ένα μικρό ποσοστό του ουρανίου απορροφάται στο αίμα [ICRP Publication 69]. Από αυτό περίπου 10% προσλαμβάνεται από τα οστά, τους νεφρούς και τους άλλους ιστούς, προκαλώντας έτσι την πιθανότητα εμφάνισης απώτερων επιδράσεων, συμπεριλαμβανομένου και του καρκίνου. Παρόλα αυτά, σε χαμηλές δόσεις η πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου είναι ελάχιστη. Μακροχρόνια έκθεση έχει δείξει ότι προκαλεί καταστροφή της νεφρικής λειτουργίας. Κατά την κατάποση μη διαλυτών σωματιδίων απεμπλουτισμένου ουρανίου ο χημικός κίνδυνος για την υγεία είναι σχετικά πολύ μικρότερος, καθώς το ποσοστό που απορροφάται από τον οργανισμό είναι ακόμα μικρότερο δεδομένου ότι σχεδόν όλο το υλικό αποβάλλεται μέσω του γαστρεντερικού σωλήνα.

Η απορρόφηση μέσω εισπνοής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος και τη διαλυτότητα των σωματιδίων. Γενικώς, οξείδια ουρανίου διαμέτρου μεγαλύτερης λίγων μm, εισπνεόμενα θα επικαθίσουν κυρίως στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (μύτη, στόμα και μεγαλύτεροι αεροφόροι οδοί), από όπου θα περάσουν γρήγορα στο πεπτικό σύστημα. Για εισπνεόμενα σωματίδια μικρότερης της προαναφερθείσας διαμέτρου, το ποσοστό από αυτά που θα επικαθίσει στους πνεύμονες είναι σχετικά μεγαλύτερο, και θα παραμείνουν εκεί για μήνες ή και χρόνια μέχρι να διαλυθούν. Πολύ μικρές ποσότητες των σωματιδίων θα κατακρατηθούν επίσης από το λεμφικό σύστημα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Για διαλυτές ενώσεις που επικάθονται στους πνεύμονες, το ποσοστό που μεταφέρεται στο αίμα είναι γενικά υψηλότερο (μέχρι και πάνω από 50%) από αυτό μετά από κατάποση. Τα εισπνεόμενα αδιάλυτα σωματίδια ενέχουν μεγαλύτερο ραδιολογικό κίνδυνο που οφείλεται στην μεγαλύτερη διάρκεια παραμονής τους στους πνεύμονες.

Στο στρατιωτικό περιβάλλον, τα τραύματα εκπροσωπούν μια πρόσθετη δίοδο έκθεσης εάν αυτά είναι αποτέλεσμα έκρηξης βλημάτων ή καταστροφής της θωράκισης αρμάτων απεμπλουτισμένου ουρανίου. Το στρατιωτικό προσωπικό είναι εκτεθειμένο σε θραύσματα DU αλλά και σε αιωρούμενα σωματίδια σκόνης που μπορούν να εισπνευστούν, να καταποθούν ή να επικαθίσουν σε ανοικτές πληγές. Ατυχήματα με πτώσεις αεροπλάνων στα οποία χρησιμοποιείτο απεμπλουτισμένο ουράνιο ως αντίβαρο (πχ Άμστερνταμ 1992, Στανστεντ, Αγγλία 2000), προκάλεσαν την ανησυχία κυβερνήσεων αλλά και μη-κυβερνητικών οργανισμών. Η σχετική αναφορά της Ολλανδικής διερευνητικής επιτροπής συμπεραίνει ότι μέρος του απεμπλουτισμένου ουρανίου που δεν αναβρέθηκε, είχε διασπαρθεί με την μορφή μικρών σωματιδίων τα οποία ενδεχομένως να έχουν ραδιορυπάνει μέσω της εισπνοής τον ντόπιο πληθυσμό και τα μέλη των διασωστικών συνεργείων.

3.3.3 Ραδιολογική τοξικότητα και εκθέσεις

Το απεμπλουτισμένο ουράνιο διασπάται κυρίως μέσω της εκπομπής α-σωματιδίων, τα οποία δεν μπορούν να διαπεράσουν τα εξωτερικά στρώματα του δέρματος, αλλά όταν το DU εισέλθει στον οργανισμό μέσω της εισπνοής ή της κατάποσης μπορούν να επηρεάσουν εσωτερικά σωματικά κύτταρα, ευαίσθητα στην ιοντίζουσα ακτινοβολία. Εξάλλου από μελέτες που έγιναν σε εργαζόμενους με ουράνιο, μετά από εσωτερική έκθεση σε ακτινοβολία DU μέσω κατάποσης και

εισπνοής ή μέσω αμυχών του δέρματος που ρυπάνθηκαν με DU, δεν παρατηρήθηκαν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία.

θεωρητικά η έκθεση σε α και β ακτινοβολία από εισπνεόμενα αδιάλυτα σωματίδια DU ενέχει την πιθανότητα πρόκλησης βλάβης των πνευμονικών ιστών και την αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα. Η παρουσία του DU στο αίμα καθώς και η πρόσληψή του από άλλα όργανα, όπως ο σκελετός, θεωρείται ότι ενέχει πρόσθετο κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου, που σχετίζεται με το επίπεδο της ακτινοβολίας.

3.3.4 Το απεμπλουτισμένο ουράνιο στο περιβάλλον

Σε ξηρές περιοχές το μεγαλύτερο ποσοστό του απεμπλουτισμένου ουρανίου μένει στην επιφάνεια της γης με την μορφή σκόνης. Διαλύεται στο χώμα εύκολα, ειδικά σε περιοχές με υψηλότερη βροχόπτωση. Καλλιέργεια μολυσμένης με απεμπλουτισμένο ουράνιο γης και χρήση μολυσμένου νερού και φαγητού μπορεί να έχει περιορισμένες επιπτώσεις στην υγεία. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος για την υγεία οφείλεται κατά κύριο λόγο στη χημική τοξικότητα του DU και όχι στην αντίστοιχη ραδιολογική.

Τα παιδιά σε σχέση με τους ενήλικες θεωρείται ότι διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο έκθεσης σε απεμπλουτισμένο ουράνιο, μετά την επιστροφή τους στις κανονικές τους δραστηριότητες σε πρώην εμπόλεμη ζώνη, μέσω ρυπασμένης τροφής και νερού, δεδομένου ότι παίζοντας στο συγκεκριμένο χώρο μπορούν να μεταφέρουν με τα χέρια στο στόμα τους ρυπασμένο χώμα, που ενδεχόμενα να οδηγήσει σε κατάποση μεγάλης ποσότητας DU.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Μετρήσεις ραδιενέργειας στην ευρύτερη περιοχή των Χανίων

4.1 Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ)

Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ), ιδρύθηκε τον Φεβρουάριο του 1954 μετά από ειδικό νόμο. Ανασυστάθηκε το 1987 κι έκτοτε λειτουργεί σαν ανεξάρτητη αποκεντρωμένη δημόσια υπηρεσία. Η ΕΕΑΕ συστεγάζεται με το ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» στην Αγία Παρασκευή Αττικής. Διοικείται από επταμελές συμβούλιο και το προσωπικό της αποτελείται από 67 υπαλλήλους και εξωτερικούς συνεργάτες. Η ΕΕΑΕ συγκροτείται από τέσσερις διευθύνσεις, τέσσερα γραφεία, και ένα εργαστήριο τα οποία υπάγονται αμέσως στο Δ.Σ. Η ΕΕΑΕ υπάγεται στο υπουργείο ανάπτυξης και εποπτεύεται από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας. Είναι αρμόδια για θέματα πυρηνικής ενέργειας και πυρηνικής τεχνολογίας, όπως επίσης και προστασίας πληθυσμού από τις ιοντίζουσες (ΙΑ) και τις τεχνητά παραγόμενες μη ιοντίζουσες (ΜΙΑ) ακτινοβολίες.

Τα βασικά αντικείμενα στα οποία δραστηριοποιείται η ΕΕΑΕ είναι τα ακόλουθα:

- Προστασία του πληθυσμού από τις ιοντίζουσες και μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες, η οποία πραγματοποιείται με την παρακολούθηση της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος με μετρήσεις σε παντός είδους δείγματα, την δοσιμέτρηση των εργαζομένων σε όλες τις εφαρμογές ΙΑ, την έκδοση αδειών εισαγωγής, εξαγωγής, κατοχής, χρήσης και διακίνησης για ραδιενέργεια και σχάσιμα υλικά, την έκδοση αδειών για μηχανήματα ΙΑ, γνωμάτευση ακτινοπροστασίας για

ιατρικά μηχανήματα παραγωγής ακτινοβολιών (ιατρική, έρευνα, βιομηχανία, εκπαίδευση κλπ) και την έκδοση σχετικών πιστοποιητικών καταλληλότητας, τη χορήγηση σχετικών αδειών λειτουργίας σε εργαστήρια ΙΑ (εκτός ιατρικών).

- Αντιμετώπιση αυξημένης ραδιορρύπανσης, εισηγήσεις μέτρων σε περίπτωση πυρηνικού ή ραδιολογικού ατυχήματος ή συμβάντος .
- Συμμετοχή στα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης ENATOM του ΔΟΑΕ και ECURIE της Ε.Ε.
- Έλεγχος της διακίνησης ραδιοφαρμάκων και ραδιενεργών πηγών.
- Εισήγηση για την αποδοχή ή μη νέων εφαρμογών ΙΑ ή/και ΜΙΑ.
- Προώθηση γενικά των ειρηνικών εφαρμογών των Ιοντίζουσων ακτινοβολιών.
- Εκπαίδευση, επιμόρφωση και ενημέρωση σε θέματα ακτινοπροστασίας
- Συμμετοχή στο Εθνικό στάδιο Έκτακτης Ανάγκης.
- Διεθνής εκπροσώπηση της χώρας για θέματα της αρμοδιότητάς της .

Πέραν του λειτουργικού και εκπαιδευτικού έργου, οι επιστήμονες της ΕΕΑΕ απασχολούνται και με ερευνητικό έργο στο αντικείμενό τους.

4.2 Δίκτυο Σταθμών Μέτρησης Ραδιενέργειας της ΕΕΑΕ

4.2.1 Περιγραφή του Δικτύου

Το τηλεμετρικό δίκτυο ελέγχου ραδιενέργειας περιβάλλοντος στην Ελλάδα αποτελείται συνολικά από 31 σταθμούς μέτρησης. 24 σταθμοί περιλαμβάνουν ανιχνευτές μέτρησης του ρυθμού δόσης της γ-ακτινοβολίας στον αέρα, 4 είναι οι σταθμοί μέτρησης ραδιενέργειας υδάτων στα ποτάμια της Βόρειας Ελλάδας και 3 είναι τα ανιχνευτικά συστήματα ραδιενέργειας του αεροζόλ της ατμόσφαιρας.



(α)

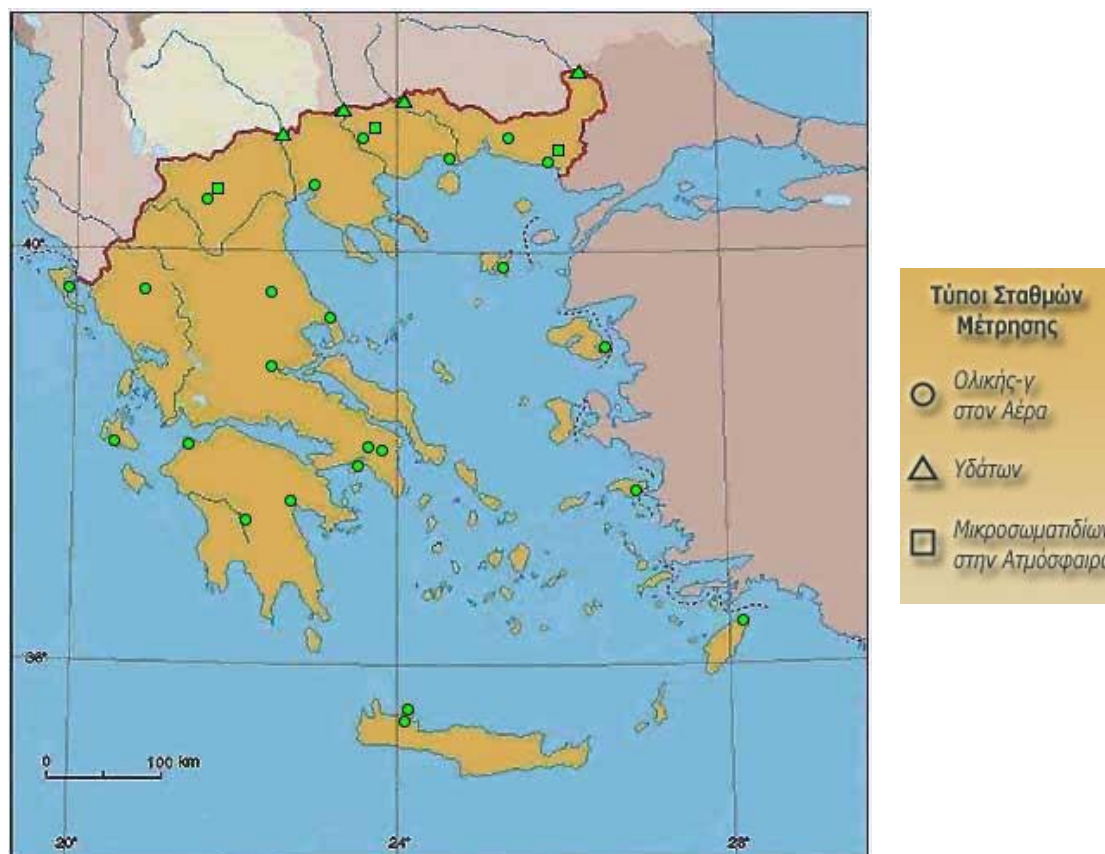


(β)



(γ)

Σχήμα 4.1 Σταθμοί μέτρησης ραδιενέργειας της ΕΕΑΕ (α) αέρα (β) υδάτων σε ποτάμια και (γ) αεροζόλ της ατμόσφαιρας.



Σχήμα 4.2 Κατανομή δικτύου σταθμών μέτρησης της ραδιενέργειας στον Ελλαδικό χώρο.

Το τηλεμετρικό δίκτυο χρησιμοποιείται για τη συνεχή καταγραφή των μετρήσεων, αλλά και ως σύστημα συναγερμού σε περίπτωση υπέρβασης των προκαθορισμένων φυσιολογικών επιπέδων.

Η κατανομή των σταθμών του τηλεμετρικού δικτύου μέτρησης ραδιενέργειας περιβάλλοντος έγινε κατά τρόπο που εξασφαλίζει τη συνεχή επόπτευση των επιπέδων ραδιενέργειας στην Ελλάδα, την έγκαιρη ειδοποίηση σε περίπτωση ραδιενεργού ρύπανσης στο περιβάλλον και τη δυνατότητα εκτίμησης της εναπόθεσης ραδιενεργών ρύπων. Η μέση απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σταθμών στην κατεύθυνση Ανατολή-Δύση είναι περίπου 60 km. Για κάθε ένα από τα τρία επιμέρους συστήματα κατάλληλο λογισμικό συλλέγει μετρήσεις κάθε 10 λεπτά και τις καταχωρεί σε βάση δεδομένων. Η βάση αυτή είναι συνδεδεμένη με την ιστοσελίδα της ΕΕΑΕ, όπου δημοσιεύονται οι μέσες ημερήσιες τιμές σε πίνακες τιμών. Μετά την καταχώρησή τους στην κεντρική βάση δεδομένων μετρήσεων ραδιενέργειας της ΕΕΑΕ, οι μέσες

μηνιαίες τιμές της ολικής γ-ακτινοβολίας στον αέρα ανά σταθμό δημοσιεύονται και στα Δελτία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας.

4.2.2 Σταθμοί μέτρησης ραδιενέργειας υδάτων ποταμών και αεροζόλ της ατμόσφαιρας

Σταθμοί μέτρησης ραδιενέργειας υδάτων είναι τοποθετημένοι στα ποτάμια Αξιός, Στρυμόνας, Νέστος και Έβρος. Ο κάθε σταθμός είναι συνδυασμός ενός ανιχνευτή μέτρησης ραδιενέργειας υδάτων με ένα ανιχνευτή μέτρησης του ρυθμού ολικής-γ ακτινοβολίας στον αέρα. Επιπλέον, έχουν τοποθετηθεί και λειτουργούν τρεις αυτόματοι σταθμοί μέτρησης ραδιενέργειας του αεροζόλ της ατμόσφαιρας στην Αλεξανδρούπολη, τις Σέρρες και την Πτολεμαίδα.

Για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας έγινε διάθεση δεδομένων μετρήσεως ραδιενέργειας της ολικής γ-ακτινοβολίας στον αέρα από τους δύο σταθμούς που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή των Χανίων και συγκεκριμένα στη Σούδα και σε χώρο του Πεδίου Βολής. Ακολουθεί περιγραφή της οργανολογίας που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό.

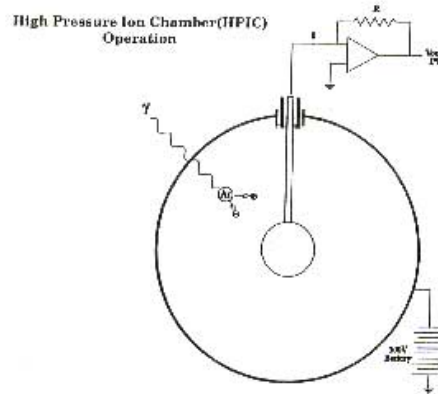
4.2.3 Ανιχνευτές ρυθμού ολικής-γ δόσης στον αέρα

Για την μέτρηση της ολικής-γ ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται θάλαμοι ιονισμού υψηλής πίεσης (High Pressure Ionization Chambers - HPIC). Έχουν όγκο 8.5 lt και περιέχουν αέριο αργόν σε πίεση 25 Atm. Είναι ευαίσθητοι στην ενεργειακή περιοχή από 50 keV έως 10 MeV, μετρούν με ακρίβεια $\pm 4\%$ για εύρος μετρήσεων του ρυθμού δόσης από 10 nSv/h έως 1 mSv/h.

Το κάθε ανιχνευτικό σύστημα αποτελείται από τρία υποσυστήματα, το θάλαμο ιονισμού υψηλής πίεσης (HPIC), το ηλεκτρόμετρο και έναν μικροεπεξεργαστή.

Το σύστημα λήψης δεδομένων έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται συνολικά επτά αναλογικά σήματα και επιπλέον ένα εξωτερικά συνδεδεμένο βροχόμετρο. Ο χρόνος δειγματοληψίας για κάθε αναλογικό σήμα είναι 1 s. Η τιμή, όμως, η οποία τελικά καταχωρείται στη μνήμη, είναι η μέση τιμή για δειγματοληψία 10 min. Συνολικά υπάρχει χώρος στη μνήμη για την καταχώρηση τέτοιων 20,000 τιμών.

Στους συγκεκριμένους σταθμούς του Ελληνικού δικτύου, χρησιμοποιούνται μόνο πέντε αναλογικά σήματα: η τιμή του ρυθμού δόσης (HPIC), η εφαρμοζόμενη

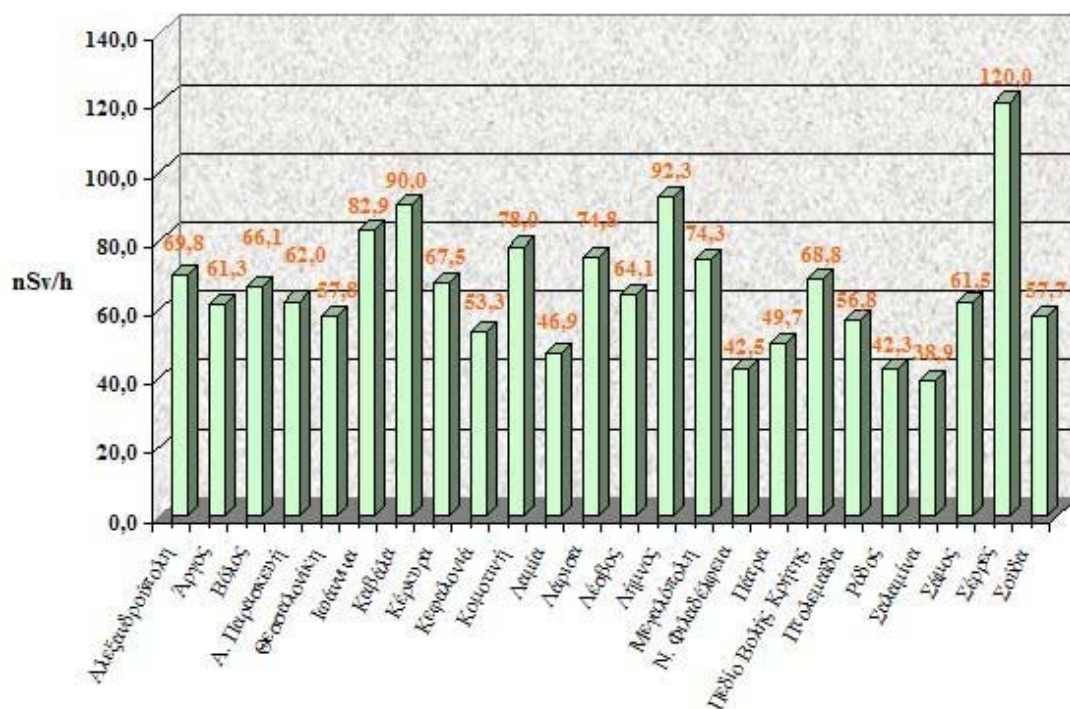


Σχήμα 4.3 Θάλαμος ιονισμού υψηλής πίεσης

υψηλή τάση του ανιχνευτή, η τιμή της μπαταρίας back-up, η θερμοκρασία του ανιχνευτή και η ένδειξη του βροχόμετρου.

Στο ανιχνευτικό σύστημα υπάρχει ενσωματωμένο modem για την επικοινωνία του ανιχνευτή με το κεντρικό σύστημα ελέγχου. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται με τη χρήση κοινών τηλεφωνικών γραμμών του ΟΤΕ.

Ενδεικτικές τιμές της ολικής γ ακτινοβολίας (σε nSv/h) που έχουν καταγραφεί στους διάφορους σταθμούς του δικτύου της ΕΕΑΕ, φαίνονται στο σχήμα 5.4.

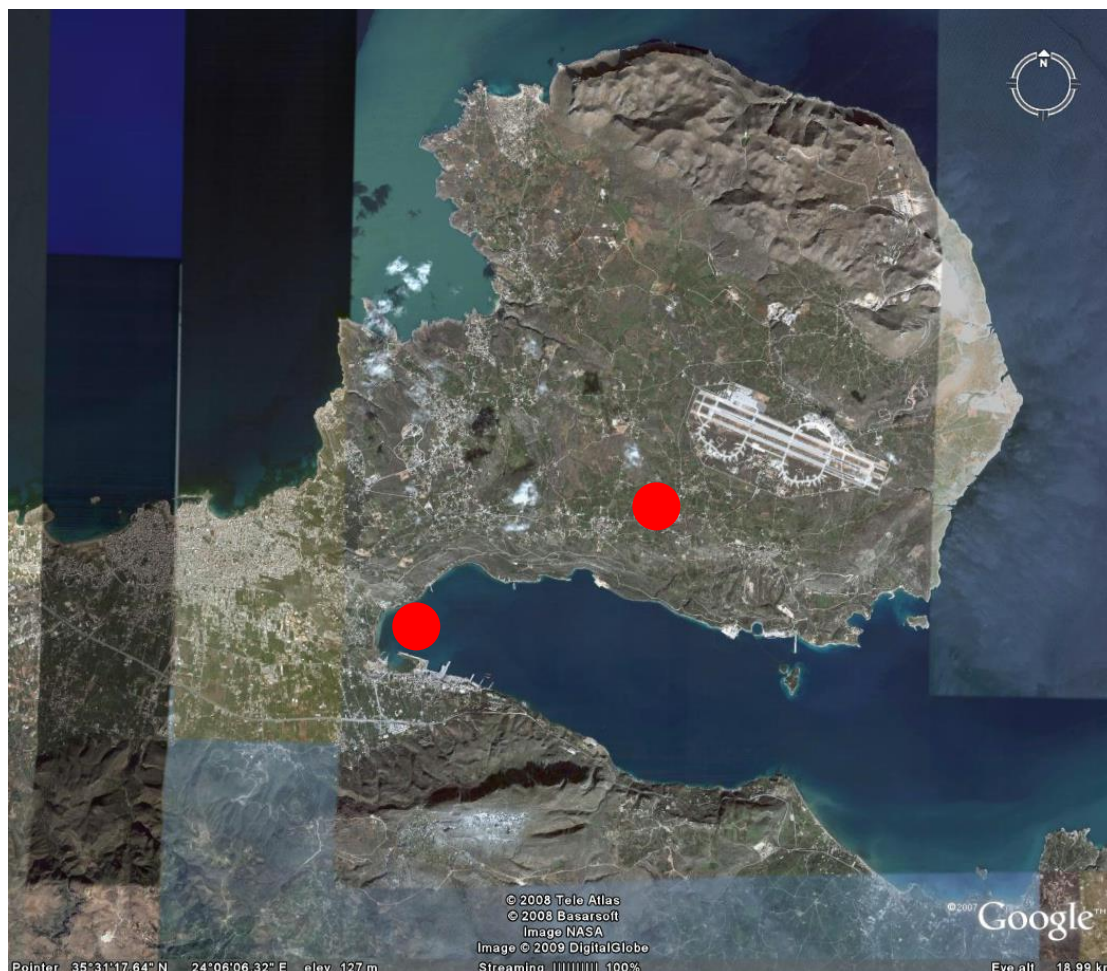


Σχήμα 4.4 Τιμές ολικής- γ στους διάφορους σταθμούς του δικτύου της ΕΕΑΕ.

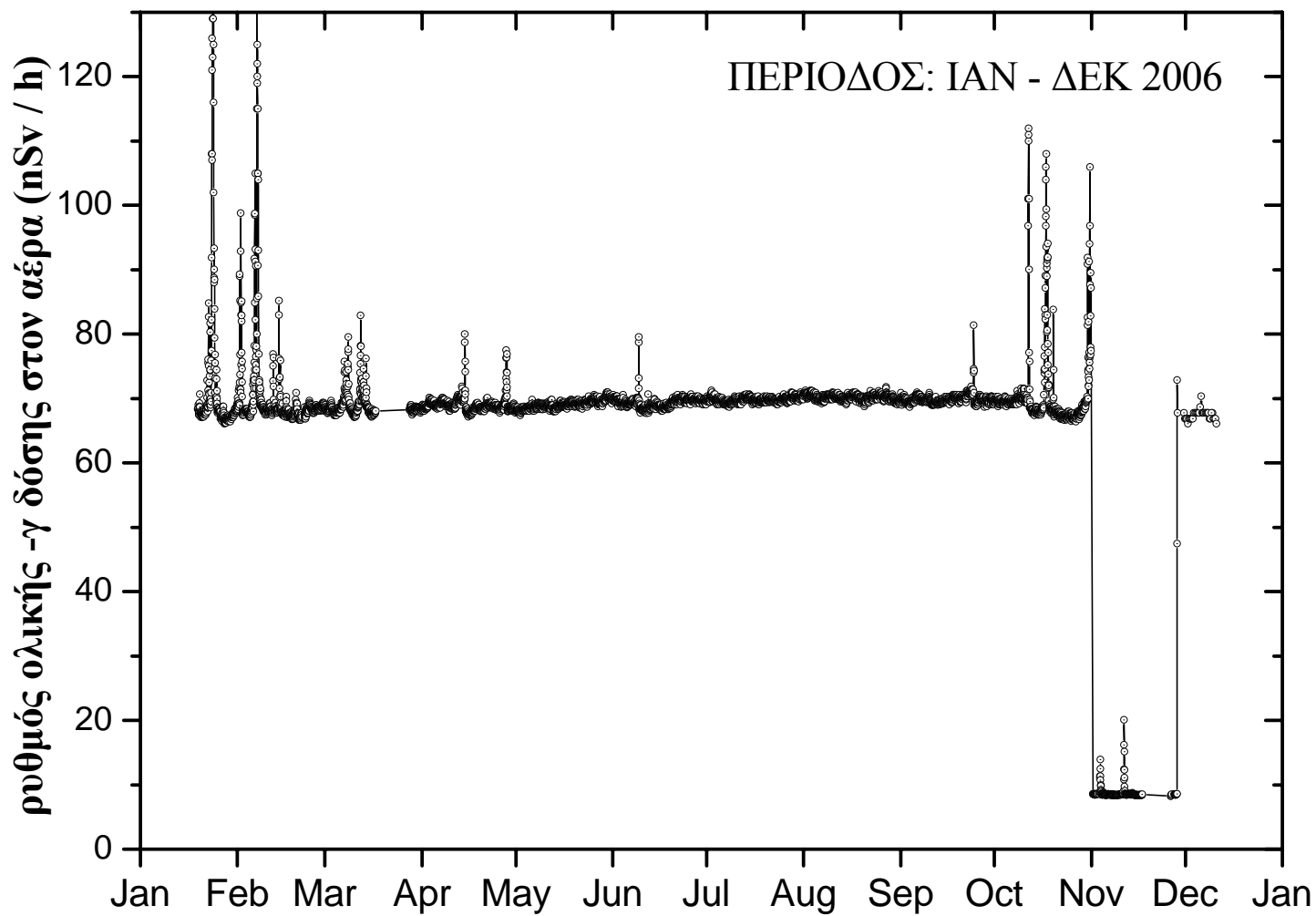
4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται παρακάτω, παραχωρήθηκαν από την ΕΕΑΕ, και αφορούν σε μετρήσεις από δύο σταθμούς που είναι εγκατεστημένοι στην ευρύτερη περιοχή των Χανίων (Σχήμα 4.5), της ολικής γ ακτινοβολίας κατά το χρονικό διάστημα Ιανουάριος 2006 – Δεκέμβριος 2006. Μαζί με τα δεδομένα αυτά, έχουν διατεθεί επιπλέον βροχομετρικά δεδομένα, εξαιτίας του γεγονότος ότι η μετρούμενη ακτινοβολία επηρεάζεται κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων.

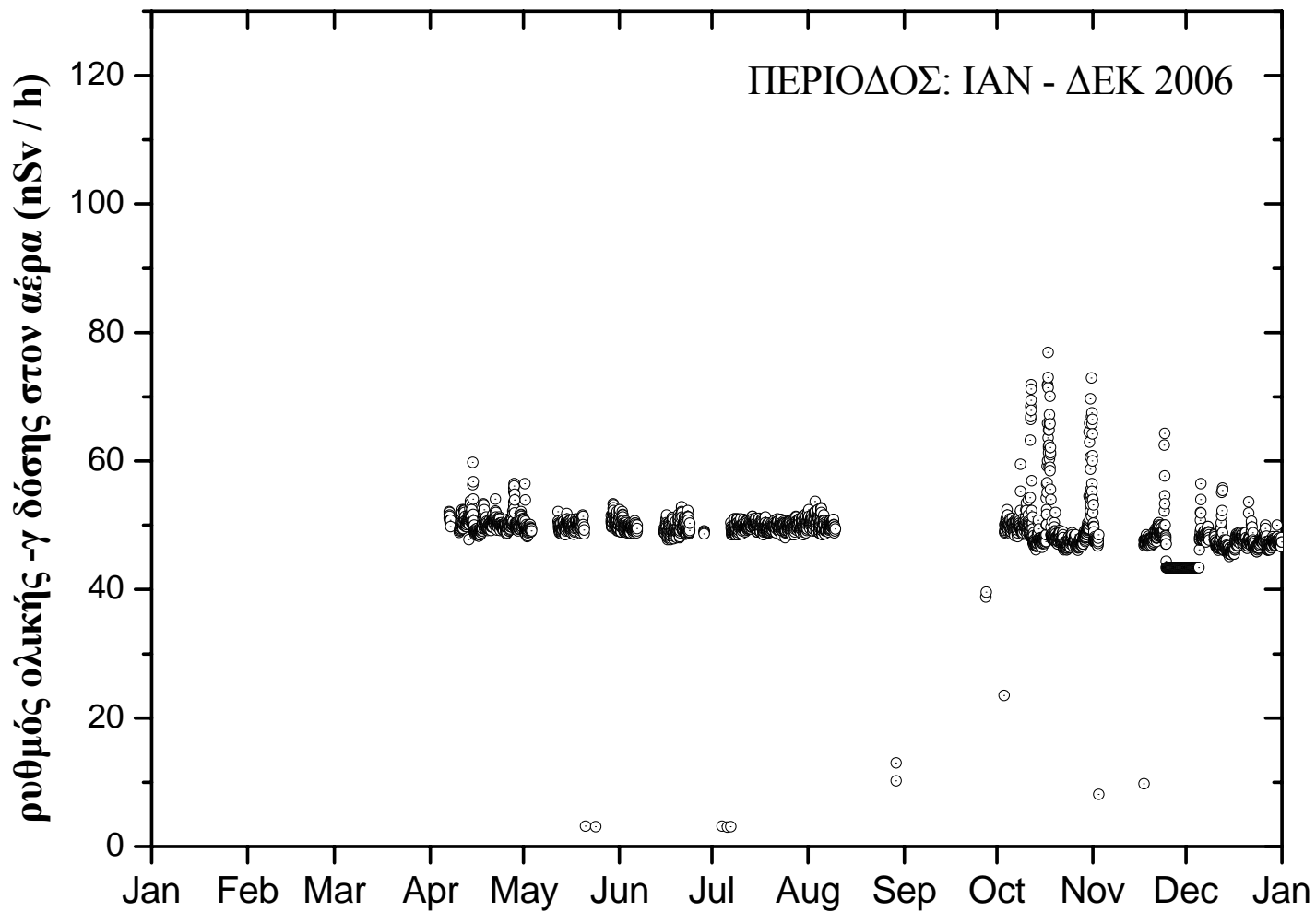
Οι μετρήσεις του ρυθμού ολικής γ δόσης στον αέρα (σε nSv/h) κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα, για το σταθμό που βρίσκεται στο Πεδίο Βολής στην περιοχή Ακρωτηρίου του νομού Χανίων, απεικονίζονται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.5 Θέσεις των δύο σταθμών μέτρησης της ολικής γ δόσης στην περιοχή Ακρωτηρίου των Χανίων (χάρτης από Google Earth).



Σχήμα 4.6 Μετρήσεις ολικής -γ δόσης από το Σταθμό των Χανίων (Πεδίο Βολής).



Σχήμα 4.7 Μετρήσεις ολικής -γ δόσης από το Σταθμό της Σούδας.

Οι αντίστοιχες μετρήσεις από το σταθμό της Σούδας, απεικονίζονται στο Σχήμα 4.7. Μετρήσεις λαμβάνονταν ανά μία ώρα και στους δύο σταθμούς, με κάποιες χρονικές περιόδους ωστόσο όπου δεν υπάρχουν δεδομένα, όπως φαίνεται και στα γραφήματα, ειδικά για το σταθμό της Σούδας. Έτσι, στο σταθμό του Πεδίου Βολής έχουν καταγραφεί συνολικά 7010 μετρήσεις, ενώ στο σταθμό της Σούδας 4584 μετρήσεις. Και στα δύο γραφήματα έχει χρησιμοποιηθεί η ίδια κατακόρυφη κλίμακα, προκειμένου να μπορούν να συγκριθούν οι μετρήσεις.

Από τις μετρήσεις του σταθμού του Πεδίου Βολής, παρατηρούμε ότι οι μετρούμενες τιμές, κατά το χρονικό διάστημα του Νοεμβρίου, παρουσιάζουν απότομη μείωση, σε σχέση με τις τιμές κατά το υπόλοιπο χρονικό διάστημα. Η μεταβολή αυτή προφανώς, δεν οφείλεται σε κάποιο φυσικό αίτιο, αλλά σε δυσλειτουργία του συστήματος μέτρησης.

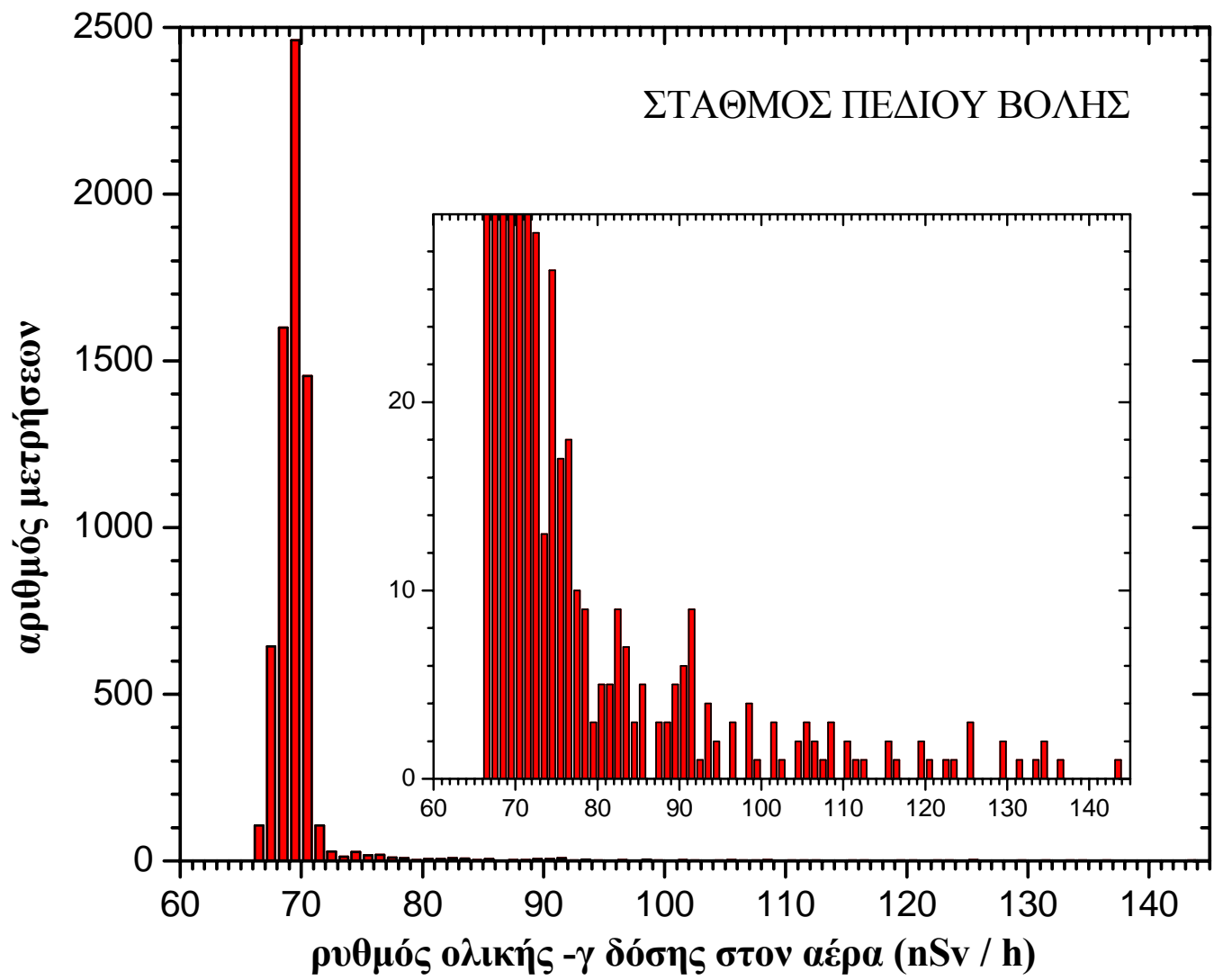
Τα ιστογράμματα των μετρήσεων των δύο σταθμών, απεικονίζονται στα Σχήματα 4.8 και 4.9. Και στις δύο περιπτώσεις έχουν εξαιρεθεί τα δεδομένα των σταθμών που παρουσιάζουν αρκετά χαμηλές τιμές της ολικής γ δόσης, προφανώς λόγω δυσλειτουργίας του συστήματος μέτρησης.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των μετρήσεων των δύο σταθμών, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.1.

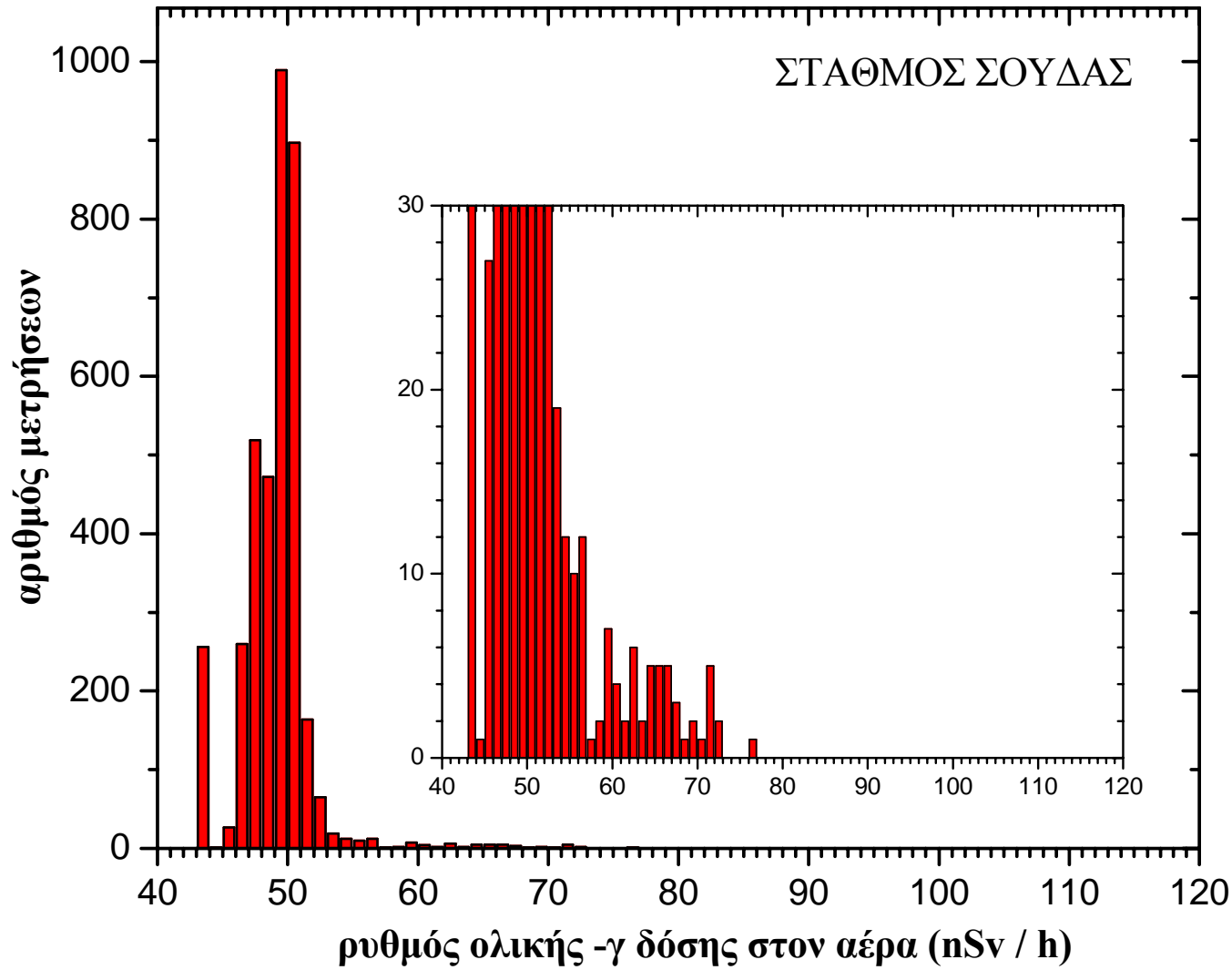
Παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις από το σταθμό του Πεδίου Βολής παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές της ολικής γ δόσης του σε σχέση με τις μετρήσεις από το σταθμό της Σούδας. Επιπλέον, για το σταθμό της Σούδας που παρουσιάζει μέση τιμή ρυθμού ολικής γ δόσης 48.9 nSv/h, η μέγιστη τιμή που καταγράφεται

Πίνακας 4.1 Στατιστική ανάλυση των δεδομένων των δύο σταθμών (Οι τιμές των μετρήσεων είναι σε nSv/h)

ΣΤΑΘΜΟΣ	δείγματα	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ελάχιστη τιμή	μέσος	μέγιστη τιμή
ΠΕΔΙΟ ΒΟΛΗΣ	6613	69,8	4,4	47,5	69,4	143
ΣΟΥΔΑ	3769	48.9	3.6	3.0	49.3	76.9



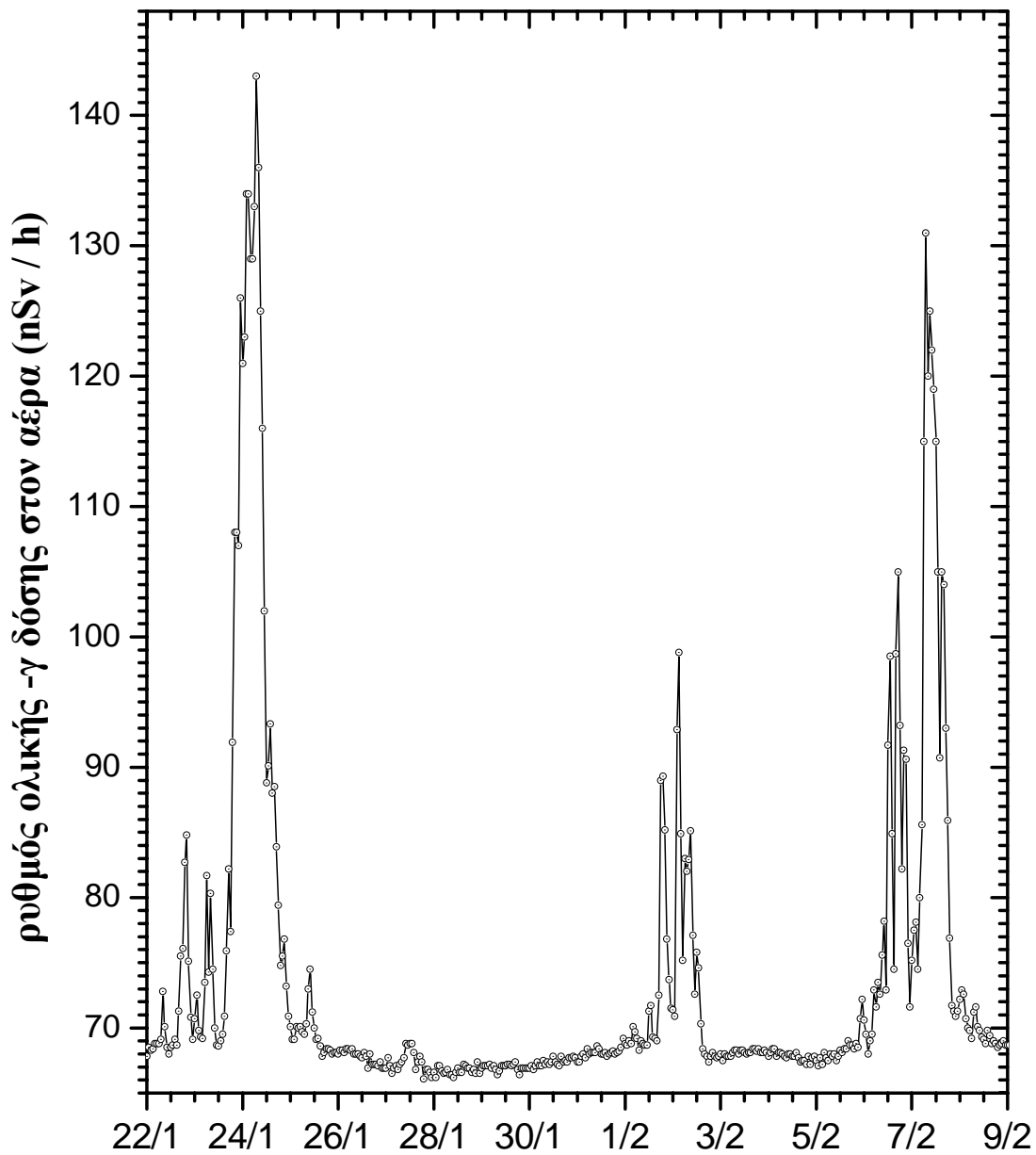
Σχήμα 4.8
Ιστόγραμμα των μετρήσεων του
σταθμού Πεδίου Βολής.
Στο ένθετο σχήμα δίνεται έμφαση
στην κατανομή των μετρήσεων με
μικρή συχνότητα εμφάνισης.



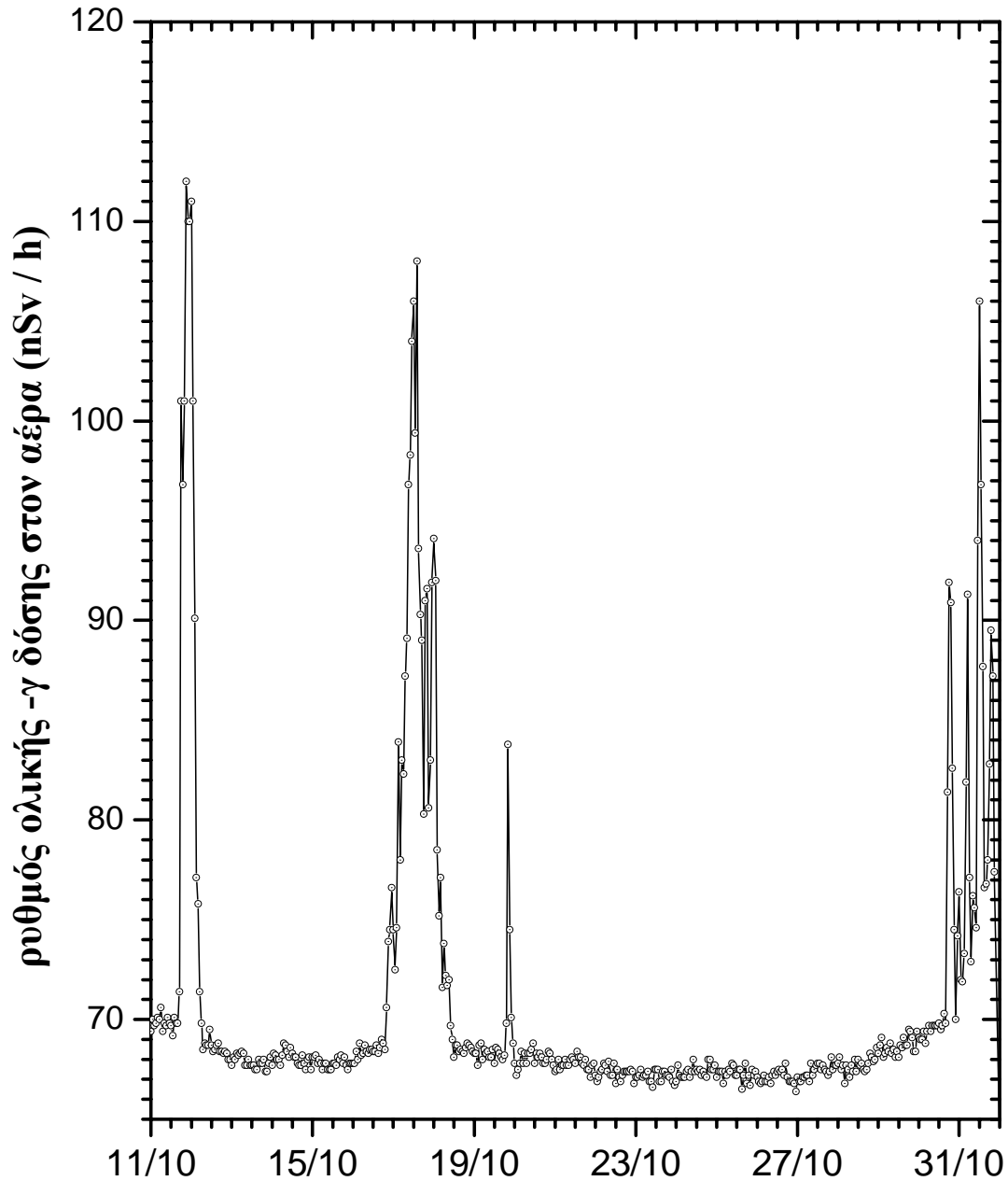
Σχήμα 4.9
 Ιστόγραμμα των μετρήσεων του
 σταθμού της Σούδας.
 Στο ένθετο σχήμα δίνεται έμφαση
 στην κατανομή των μετρήσεων με
 μικρή συχνότητα εμφάνισης.

ανέρχεται σε 76.9 nSv/h, ενώ για το σταθμό του Πεδίου Βολής, η μέγιστη τιμή είναι 143 nSv/h. Οι μέσες τιμές που μετρώνται και στους δύο σταθμούς, βρίσκονται μέσα στο εύρος των τιμών που μετρώνται στους υπόλοιπους σταθμούς της ΕΕΑΕ, στον Ελλαδικό χώρο (Σχήμα 4.4). Συγκεκριμένα, η ελάχιστη τιμή καταγράφεται στο σταθμό της Σαλαμίνας (38.9 nSv/h), ενώ η μέγιστη τιμή στο σταθμό των Σερρών (120 nSv/h).

Έντονες διακυμάνσεις, που φτάνουν μέχρι και διπλάσιο ρυθμό ολικής γ



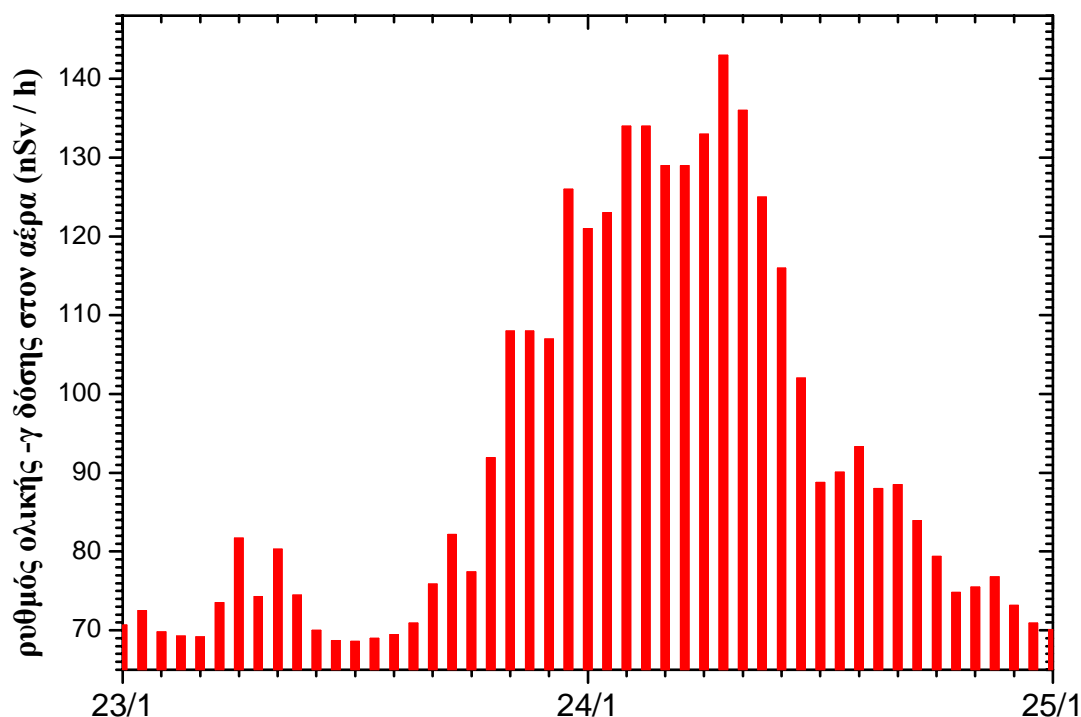
Σχήμα 4.10 Λεπτομερής απεικόνιση των μετρήσεων από το σταθμό του Πεδίου Βολής κατά το διάστημα 22/1 – 9/2.



Σχήμα 4.11 Λεπτομερής απεικόνιση των μετρήσεων από το σταθμό του Πεδίου Βολής κατά το διάστημα 11/10 – 1/11.

δόσης από τη μέση τιμή, παρουσιάζονται στο σταθμό του Πεδίου Βολής, κατά το χρονικό διάστημα 22 Ιανουαρίου έως και 9 Φεβρουαρίου, καθώς και από 11 έως 31 Νοεμβρίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11 και 4.11, αντίστοιχα. Ειδικότερα, οι μέγιστες καταγεγραμμένες τιμές που εμφανίζονται στις 21 Ιανουαρίου, παρουσιάζονται ξεχωριστά με τη μορφή ραβδογράμματος στο Σχήμα 4.12. Δυστυχώς, κατά την περίοδο αυτή, όπως και για άλλες χρονικές περιόδους, τα

δεδομένα των βροχοπτώσεων είναι ελλιπή, ώστε να μπορούν να συσχετιστούν με τα αυξημένα επίπεδα ραδιενέργειας (ολικής γ ακτινοβολίας) που έχουν καταγραφεί.



Σχήμα 4.12 Λεπτομερής παρουσίαση των μετρήσεων της ολικής γ ακτινοβολίας που εμφανίζει τη μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή κατά το έτος 2006, από το σταθμό του Πεδίου Βολής.

Πέρα από τους ανθρωπογενείς παράγοντες που μπορεί να μεταβάλουν τη μετρούμενη ραδιενέργεια, επιπλέον λόγοι που μπορεί να προκαλέσουν μεταβολές μπορεί να είναι στατιστικές διακυμάνσεις (σε μικρότερο βαθμό) καθώς και μεταβολές στις μετεωρολογικές συνθήκες (μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας, ταχύτητα ανέμου, κλπ). Το ραδόνιο καθώς και τα θυγατρικά του καθώς διαφεύγουν από το έδαφος, επικάθονται σε αιωρούμενα σωματίδια (aerosols) με αποτέλεσμα να κινούνται στην ατμόσφαιρα (λόγω κίνησης αέριων μαζών και διάχυσης) και να καταλήγουν πάλι στο έδαφος κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων. Επιπλέον, τα επίπεδα συγκέντρωσης του ραδονίου επηρεάζονται και από την εδαφική υγρασία και διαφορετικές τιμές μπορούν να καταγραφούν μεταξύ καλοκαιρινής και χειμερινής περιόδου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας παρουσιάστηκαν μετρήσεις του ρυθμού της ολικής γ δόσης (σε nSv/h) από δύο σταθμούς που η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) έχει εγκατεστημένους στην ευρύτερη περιοχή των Χανίων. Τα δεδομένα αυτά διατέθηκαν για το χρονικό διάστημα Ιανουαρίου - Δεκεμβρίου 2006, προκειμένου να συσχετιστούν μεταξύ τους αλλά και να συγκριθούν με τις αντίστοιχες τιμές που μετριώνται σε άλλες πόλεις της Ελλάδας.

Από τη ανάλυση των αποτελεσμάτων, παρατηρούμε ότι ο σταθμός του Πεδίου Βολής παρουσιάζει μεγαλύτερη μέση τιμή του ρυθμού της ολικής γ δόσης (69.8 nSv/h) σε σχέση με την τιμή του σταθμού της Σούδας (48.9 nSv/h). Επιπλέον, στο σταθμό του Πεδίου Βολής, παρατηρούνται αυξήσεις έως και δύο φορές από τη μέση τιμή του ρυθμού της ολικής γ δόσης, σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους.

Αν και στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται συσχετισμός αυξημένων επιπέδων ραδιενέργειας με τις παρατηρούμενες βροχοπτώσεις, τα ελλειπή βροχομετρικά δεδομένα που υπάρχουν δε μας επιτρέπουν να συσχετίσουμε τις σχετικά έντονες διακυμάνσεις που καταγράφονται κατά τη διάρκεια του έτους στο σταθμό του Πεδίου Βολής.

Γενικά, οι τιμές που έχουν καταγραφεί, βρίσκονται μέσα στο εύρος των τιμών που καταγράφονται στον ελλαδικό χώρο από τους υπόλοιπους σταθμούς της ΕΕΑΕ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Εμείς και η ραδιενέργεια, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.
- Τσερνομπίλ – Ένα Χρονικό Του Μέλλοντος, Σβετλάνα Αλεξίεβιτς. Εκδόσεις «Περίπλους».
- Τεχνολογία μεταφορών ενέργειας και ισχύος. Anthong E. Schwalleer.
- Ενέργεια (Πηγές – Εφαρμογές – Εναλλακτικές λύσεις). Ίδρυμα Ευγενίδου.
- Πώς να προστατευθείτε από την ραδιενέργεια – Linda Clark.
- Πηγές ενέργειας στο μέλλον – Robin Kerrod. Εκδόσεις Ρίζος.
- Άρθρα του Κ. Παπαστεφάνου, καθηγητή Πυρηνικής Φυσικής στο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης στο περιοδικό «ΓΙΑΤΙ».
- Η Ραδιενέργεια Χθες Και Σήμερα, Σεμινάριο Φυσικού Τμήματος, 27.1.2003, Θαν. Κ. Γεράνιος
- <http://www.physics4u.gr/nuclear/radio1.html>
- <http://www.geo.auth.gr/106/theory/radioactivity.htm>
- <http://gym-n-souliou.ser.sch.gr/ergasies/radio.htm>
- <http://eeae.gr> (Διαδικτυακός τόπος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας)
- Minimum Detectable Amount of Radon Progeny in Outdoor Air, Helena Ernbo, M.Sc. Thesis, Sweeden, 2006.
- Effect of rain interval on wet deposition of radon daughters, Radiation Protection Dosimetry, vol. 45 (1992) 333 – 336.
- A mathematical description of the diurnal variation of radon progeny, Applied Radiation and Isotopes 66 (2008) 75 – 79.