

ΑΝΘΡΩΠΟΣ ΚΑΙ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

Μιά Ιοντίζουσα Αλληλεπίδραση

● Του Δρος Ιωάννη Πασχαλίδη
Αναπληρωτή Καθηγητή
Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Περίληψη

Η Ραδιενέργεια είναι ένα αρχέγονο φυσικό φαινόμενο και η δημιουργία και εξέλιξη της ζωής έλαβε χώρα κάτω από την επήρειά της. Εντούτοις, έκθεση του ανθρώπου, όπως και κάθε ζωντανού οργανισμού, σε σχετικά ψηλά επίπεδα ραδιενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα υγείας ακόμη και το θάνατο. Ο ραδιολογικός κίνδυνος εξαρτάται από το βαθμό της ραδιενεργού ρύπανσης, τον τύπο της ραδιενέργειας, τον τρόπο/μονοπάτια έκθεσης και την ευαισθησία των κυττάρων/οργανισμών στις ραδιολογικές επιπτώσεις. Οι επιπτώσεις της ραδιενέργειας στην ανθρώπινη υγεία μπορούν να εκτιμηθούν από τη (σωματική) κατάσταση ανθρώπων που έχουν εκτεθεί σε διάφορα επίπεδα ραδιενεργού ακτινοβολίας, λόγω εργασιακού περιβάλλοντος, πυρηνικών ατυχημάτων και δοκιμών. Τη μεγαλύτερη έκθεση σε ραδιενέργεια υπέστησαν τα θύματα των πυρηνικών εκρήξεων της Hiroshima και Nagasaki στο 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες, για εξωτερική δόση κάτω από 0.2 Gy (20 rad) δεν παρατηρήθηκε αύξηση στη συχνότητα κρουσμάτων καρκίνου σε επιζώντες των δύο πυρηνικών επιθέσεων, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για καθορισμό ενός κατώτατου ορίου



για την εμφάνιση ραδιενεργών επιπτώσεων στον άνθρωπο. Από την άλλη πλευρά, τα πρότυπα προστασίας από τη ραδιενέργεια, τα οποία βασίζονται σε προσεγγίσεις γραμμικής σχέσης (μέχρι και για μηδενικά επίπεδα ραδιενέργειας) μεταξύ της ραδιενεργού δόσης και των επιπτώσεων, έχουν θέσει σαν ανώτατο όριο για το ευρύτερο κοινό το 1 mSv/y (0.1 rem/y). Στο παρόν άρθρο συνοψίζονται βασικές πληροφορίες που αφορούν τη ραδιενέργεια, τη ραδιενεργό ρύπανση του περιβάλλοντος και τις επιπτώσεις της στην ανθρώπινη υγεία.

1. Πηγές Ραδιενέργειας

Πυρήνες ατόμων, οι οποίοι δεν έχουν ισορροπημένη αναλογία πρωτονίων και νετρονίων, είναι ασταθείς και διασπώνται αυθόρμητα, εκπέμποντας ραδιενεργό ακτινοβολία. Για σχετικά μικρούς ατομικούς αριθμούς ($Z < 20$), η ιδανική αναλογία που οδηγεί σε σταθερούς πυρήνες, είναι όταν ο αριθμός των πρωτονίων ισούται με τον αριθμό των νετρονίων. Για μεγαλύτερους ατομικούς αριθμούς ο αριθμός των νετρονίων πρέπει να είναι μεγαλύτερος για να είναι οι πυρήνες σταθεροί. Με την εκπομπή ραδιενεργού ακτινοβολίας, η οποία μπορεί να είναι σωματιδιακή ή/και ηλεκτρομαγνητική, αλλάζει ο ατομικός ή ο μαζικός αριθμός των πυρήνων/ατόμων και μεταστοιχειώνεται το άτομο του οποίου ο πυρήνας έχει διασπαθεί.



Οι πύο σημαντικοί τύποι ραδιενεργού ακτινοβολίας (βλ. Σχήμα 1) είναι η:

- β^- ακτινοβολία: όταν ένα αρνητικά φορτισμένο βήτα σωματίδιο (ηλεκτρόνιο) εκπέμπεται από τον πυρήνα ενός ατόμου και ένα νετρόνιο μετατρέπεται σε ένα πρωτόνιο, με αποτέλεσμα ο ατομικός αριθμός (αριθμός πρωτονίων) να αυξηθεί και ο αριθμός των νετρονίων να μειωθεί κατά μία μονάδα.
- β^+ ακτινοβολία: όταν ένα θετικά φορτισμένο

βήτα σωματίδιο (ποσιτρόνιο) εκπέμπεται από τον πυρήνα ενός ατόμου και ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σε ένα νετρόνιο, με αποτέλεσμα ο ατομικός αριθμός (αριθμός πρωτονίων) να μειωθεί και ο αριθμός των νετρονίων να αυξηθεί κατά μία μονάδα.

- Σύλληψη ηλεκτρονίου: όταν ένας ασταθής πυρήνας συλλαμβάνει ένα ηλεκτρόνιο από την Κ ηλεκτρονιακή στοιβάδα του ατόμου και μετατρέποντας ένα πρωτόνιο του πυρήνα σε ένα νετρόνιο, με αποτέλεσμα ο ατομικός αριθμός (αριθμός πρωτονίων) να μειωθεί και ο αριθμός των νετρονίων να αυξηθεί κατά μία μονάδα.

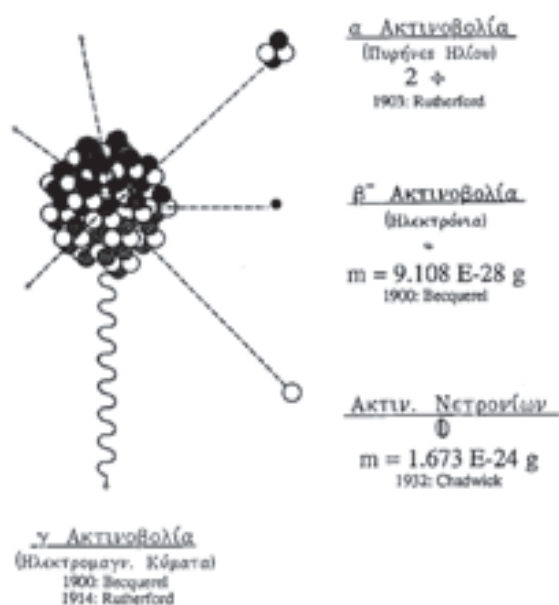
- α -ακτινοβολία: όταν (συνήθως) ένας βαρύς ασταθής πυρήνας διασπάται με εκπομπή πυρήνων ηλίου (δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια), με αποτέλεσμα ο ατομικός αριθμός (αριθμός πρωτονίων) και ο αριθμός των νετρονίων να μειωθεί κατά δύο μονάδες (ο καθένας) και ο μαζικός αριθμός κατά τέσσερις μονάδες.

- n -ακτινοβολία: όταν ένα ή περισσότερα ουδέτερα σωματίδια (νετρόνια) εκπέμπονται από τον πυρήνα ενός ατόμου, με αποτέλεσμα ο μαζικός αριθμός να μειωθεί κατά μία μονάδα. Η εκπομπή νετρονίων σχετίζεται (συνήθως) με πυρηνικές αντιδράσεις

- Σχάση πυρήνων: όταν ένας ασταθής βαρύς πυρήνας διασπάται (συνήθως) ασύμμετρα σε δύο μικρότερους πυρήνες. Οι θυγατρικοί πυρήνες είναι (κατά κανόνα) ασταθείς λόγω της περίσσειας νετρονίων στον πυρήνα τους και διασπώνται με διαδοχικές β^- -διασπάσεις μέχρι να καταλήξουν σε σταθερό θυγατρικό πυρήνα.

- Στις πυρηνικές διασπάσεις (συνήθως) ο θυγατρικός πυρήνας βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση και μεταπίπτει στη βασική του (μη διεγερμένη) κατάσταση με εκπομπή γ -ακτινοβολίας. Η ραδιενεργός διάσπαση με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής γ -ακτινοβολίας δεν οδηγεί σε αλλαγές στον ατομικό ή μαζικό αριθμό του ατόμου και ως εκτούτου καλείται και ισομερική μετάβαση. Ας σημειωθεί ότι εάν η γ -ακτινοβολία που (βασικά) συνοδεύει μία άλλη πυρηνική διάσπαση εμφανισθεί με κάποια χρονική καθυστέρηση καταγράφεται σαν ξεχωριστό γεγονός.

Η μονάδα μέτρησης της ραδιενέργειας είναι το becquerel (Bq) και έχει ορισθεί σαν μία διάσπαση το δευτερόλεπτο. Το curie (Ci) είναι η παλιά μονάδα μέτρησης ραδιενέργειας, και αντιστοιχεί στη ραδιενέργεια 1 g ^{226}Ra και είναι ισοδύμανη με $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq.



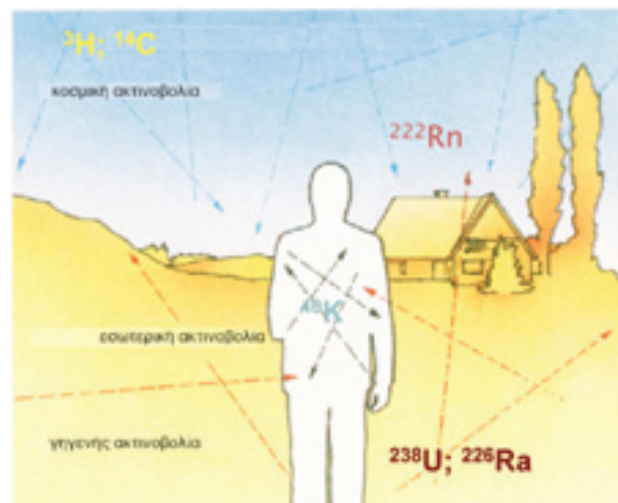
Σχήμα 1: Τύποι ραδιενεργού ακτινοβολίας. Δίνονται το φορτίο, η μάζα και το όνομα του επιστήμονα που τις ανακάλυψε

1.1 Φυσικές Πηγές Ραδιενέργειας

Τα φυσικά ραδιονουκλίδια είναι περίπου 75 και διακρίνονται στα αρχέγονα, δηλ. τα ραδιενεργά νουκλίδια, τα οποία βρίσκονται στη γη από τη δημιουργία της (περίπου πριν 4.5×10^9), και τα κοσμογενή ραδιονουκλίδια, δηλ. εκείνα τα οποία παράγονται στην ανώτερη ατμόσφαιρα σαν αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας με πυρήνες των στοιχείων της ατμόσφαιρας. Οι αρχέγονοι ραδιενεργοί πυρήνες/στοιχεία συμβάλλουν με τη θερμότητα που παράγουν στη διεξαγωγή βασικών διεργασιών του ενδογενούς γεωλογικού κύκλου (π.χ. ηφαίστεια, σεισμοί κ.α.). Τα πιο άφθονα φυσικά ραδιονουκλίδια πάνω στη γη είναι το ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U και ^{235}U . Η συνολική ραδιενέργεια των ακτινίδων ουρανίου και θορίου στα ανώτερα στρώματα της λιθόσφαιρας κυμαίνεται στα $\sim 10^{22}$ Bq και είναι περίπου ισοδύναμη με τη συνολική ενεργότητα του ^{40}K στους ωκεανούς. Η μέση συγκέντρωση του γήινου φλοιού σε ουρανιο και θόριο ανέρχεται στα 2.7 ppm και 9.6 ppm, αντίστοιχα. Αυξημένες συγκεντρώσεις ουρανίου και θορίου παρατηρούνται σε πυρητικά-πυρηγενή πετρώματα (γρανίτες) με 4.4 ppm και 16 ppm, αντίστοιχα. Στα υπόγεια νερά η μέση συγκέντρωση ουρανίου κυμαίνεται από <0.1 ppb (για αναγωγικές συνθήκες) και 100 ppb (για οξειδωτικές συνθήκες), ενώ η μέση συγκέντρωση θορίου

είναι γενικά κάτω από <0.1 ppb. Στους ωκεανούς/θάλασσες οι μέσες συγκεντρώσεις ουρανίου και θορίου είναι σταθερές και είναι περίπου ίσες με 3.5 ppb και 0.2 ppb, αντίστοιχα. Τα κοσμογενή ραδιονουκλίδια μεταφέρονται στη βιόσφαιρα και ενσωματώνονται σε βιολογικά και γεωλογικά συστήματα. Αυτό δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής μεθόδων ιχνηθέτησης και ραδιοχρονολόγησης (μέθοδος ραδιοάνθρακα, C-14).

Από τα φυσικά ραδιονουκλίδια το ραδόνιο παρουσιάζει ραδιοπεριβαλλοντικά ξεχωριστό ενδιαφέρον. Το ραδόνιο είναι ένα φυσικό ραδιενεργό αέριο το οποίο απαντάται σε τρία φυσικά ισότοπα, που αντιστοιχούν στις τρεις ραδιενεργές σειρές. Το (περιβαλλοντικά) σημαντικότερο ισότοπο του ραδονίου είναι το Rn-222 με χρόνο ημιζωής 3.825 μέρες. Το ραδόνιο σαν αέριο διαφεύγει (σχετικά εύκολα) από το σημείο που παράγεται, μπορεί να συγκεντρωθεί σε κλειστούς χώρους και να εισπνευστεί (μαζί με τα θυγατρικά του), αποτελώντας τον κυριώτερο παράγοντα ραδιενεργού έκθεσης για τον άνθρωπο. Σύμφωνα με εκτιμήσεις της US-EPA, 15000 – 25000 θάνατοι το χρόνο στις ΗΠΑ οφείλονται στο ραδόνιο. Σύμφωνα με τον UNSCEAR (1993) η παγκόσμια μέση συγκέντρωση ραδιενέργειας ραδονίου (Rn-222; εσωτερικού χώρου) ανέρχεται σε 40 Bq/m³ και η αντίστοιχη ετήσια (effective) ραδιενεργός έκθεση σε 1.2 mSv. Όμως σε κτήρια τα οποία βρίσκονται κτισμένα σε εδάφη και πετρώματα (π.χ. γρανιτικά) με υψηλή περιεκτικότητα σε ουράνιο, οι συγκεντρώσεις ραδονίου (κλειστών χώρων) μπορεί να ανέλθει σε επικίνδυνα ψηλά επίπεδα (>200 mSv/y).



Σχήμα 2: Ο άνθρωπος εκτίθεται σε ιονίζουσα ακτινοβολία που προέρχεται από διάφορες φυσικές πηγές ραδιενέργειας

1.2 Ανθρωπογενείς Πηγές Ραδιενέργειας – Πυρηνικές Δοκιμές

Τα ραδιονουκλίδια/ραδιενέργεια, τα οποία απελευθερώθηκαν με τις πυρηνικές δοκιμές αποτελούν την κυριώτερη πηγή τεχνητής ραδιενέργειας στο εγγύς ανθρώπινο περιβάλλον. Η 1η πυρηνική δοκιμή (19-kt) ήταν δοκιμαστική και έλαβε χώρα στις ΗΠΑ στις 16 Ιουλίου 1945 και αμέσως μετά ακολούθησαν οι πυρηνικοί βομβαρδισμοί Hiroshima και Nagasaki (Japan) 6 και 9 Αυγούστου 1945, αντίστοιχα. Στη συνέχεια και κάτω από τη σκιά του «σιδηρού παραπετάσματος» άρχισε ένας οργανισμός (ατμοσφαιρικών) πυρηνικών δοκιμών (βλ. Σχήμα 3), βασικά σε δύο φάσεις από 1952 – 1958 και 1961 – 1962. Το 1963 συνήφθη μεταξύ USSR, USA και UK συνθήκη για παύση των ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών (atmospheric



Σχήμα 3: Το πυρηνικό «μανιτάρι» που σχηματίζεται αμέσως μετά την πυρηνική έκρηξη και εξαπλώνει λόγω των ασύλληπτα ψηλών θερμοκρασιών ό,τι εισέρχεται στον πυρήνα του

test ban treaty), όμως άλλες πυρηνικές δυνάμεις (France, India, Pakistan και China) συνέχισαν τις ατμοσφαιρικές/υποθαλάσσιες πυρηνικές δοκιμές μέχρι το 1980. Συνοπτικά έλαβαν χώρα 520 ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές (μαζί και 8 υποθαλάσσιες) με εκρηκτική ισχύ 542 Mt TNT και 1352 υπόγειες πυρηνικές δοκιμές με εκρηκτική ισχύ 90 Mt TNT. Τα περιβαλλοντικά πιο σημαντικά ραδιονουκλίδια που παράγονται κατά τις πυρηνι-

κές δοκιμές: C-14; Sr-90; Cs-137; ισότοπα Pu (Am-241). Με την πυρηνική έκρηξη τα ραδιονουκλίδια διασπύρονται στην ατμόσφαιρα ως ακολούθως: τοπικά (12%), στην τροπόσφαιρα (10%) και στη στρατόσφαιρα (78%). Επίσης, οι ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές έχουν σαν αποτέλεσμα την παραγωγή C-14 λόγω της πυρηνικής αντίδρασης: N-14(n,p)C-14, με αποτέλεσμα το διπλασιασμό της συγκέντρωσης C-14 στην ατμόσφαιρα από τα μέσα της δεκαετίας του 1960. Η συνολική ραδιολογική επίπτωση από τις ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές εκτιμάται (UNSCEAR, 1993) ότι ανέρχεται στα 3×10^7 manSv με το 70% των επιπτώσεων να αποδίδεται στον C-14. Οι άλλοι βασικοί συντελεστές είναι το Cs-137, Sr-90, Zr-95 και Ru-106. Ας σημειωθεί ότι οι ραδιολογικές επιπτώσεις από τις υπόγειες πυρηνικές δοκιμές δεν είναι εύκολο να εκτιμηθούν.

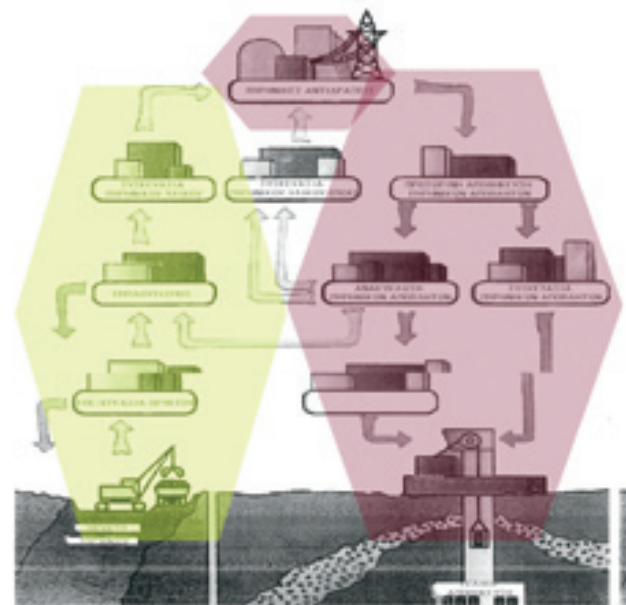
1.3 Ανθρωπογενείς Πηγές Ραδιενέργειας - Εκμετάλλευση Πυρηνικής Ενέργειας (Ατυχήματα & Απόβλητα)

Η εγκατάσταση των πρώτων πυρηνικών αντιδραστήρων για παραγωγή ενέργειας άρχισε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 και προχώρησε με γρήγορους ρυθμούς μέχρι τη δεκαετία του 1980. Το 1997 λειτουργούσαν 443 μονάδες (και 35 ήταν υπό κατασκευή) παρέχοντας περίπου το 17% της συνολικής παγκόσμια παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη Γαλλία και τη Λιθουανία το ποσοστό αυτό αναλογεί στο 77.4 και 83.4%, αντίστοιχα. Έχοντας υπόψη τη σημερινή ενεργειακή κατάσταση και τα παγκόσμια αποθέματα ουρανίου (~ 5 Mt), η εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας (σχάσης) αναμένεται ότι θα συνεχιστεί τουλάχιστον μέχρι τα μέσα του 21^{ου} αιώνα.

Η απελευθέρωση ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον μπορεί να λάβει χώρα σε όλα τα στάδια του κύκλου του πυρηνικού υλικού (Σχήμα 4) με την εξόρυξη και εξευγενισμό του ορυκτού ουρανίου και την κατεργασία/ανακύκλωση του πυρηνικού υλικού να αποτελούν τα κυριότερα στάδια ρύπανσης. Κατά κανόνα τα στάδια συσκευασίας του «καυσίμου» και παραγωγής ενέργειας (με περίπου 1000 TBq/y) να αποτελούν τα στάδια με τις χαμηλότερες ραδιολογικές επιπτώσεις της τάξης των μSv/y. Η ανακύκλωση του πυρηνικού υλικού διεξάγεται βασικά για ανάκτηση των σημαντικών ποσοτήτων σχάσιμου υλικού (U-235 και Pu-239)

που περιέχουν, αλλά και μείωση της χρόνιας ραδιοτοξικότητάς τους. Το 1990, 15 χώρες υιοθέτησαν την ανακύκλωση, 11 την προσωρινή αποθήκευση και τρεις χώρες την τελική αποθήκευση/διάθεση του ακατέργαστου πυρηνικού υλικού.

Ο αριθμός των πυρηνικών ατυχημάτων που έχει αναφερθεί ανέρχεται στο 150, με 35 από αυτά τα ατυχήματα να έχουν οδηγήσει σε περιβαλλοντική ρύπανση (π.χ. Three Mile Island, Tokai Mura κ.α.). Το σοβαρότερο πυρηνικό ατύχημα είναι αυτό του Chernobyl (1986) κατά το οποίο μία έκρηξη στον αντιδραστήρα είχε σαν αποτέλεσμα τη διάρρηξη και του εξωτερικού προστατευτικού περιβλήματος και συνεπώς τη απελευθέρωση μεγάλης ποσότητας ραδιονουκλιδίων στην ατμόσφαιρα/περιβάλλον επιρρυπαίνοντας ραδιενεργά μεγάλα τμήματα της τότε Σοβιετικής Ένωσης, Δ. Ευρώπης και Σκανδιναβικής χερσονήσου.



Σχήμα 4: Στάδια του κύκλου του πυρηνικού υλικού. Στον πυρηνικό αντιδραστήρα παράγονται τα τεχνητά ραδιονουκλίδια

Εκτός από τα ατυχήματα, συχνά η διαχείριση υγρών και στερεών αποβλήτων έχει οδηγήσει σε περιβαλλοντική ραδιενεργό ρύπανση, πολύ πιο σοβαρή από τις μικροδιαρροές ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα και σε υδατικούς αποδέκτες, που μπορεί να παρουσιαστούν σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Μη-ορθή διαχείριση στερεών και υγρών αποβλήτων (κυρίως από την παραγωγή πυρηνικών όπλων) έχει οδηγήσει σε ευρεία ρύπανση υπόγειων υδροφορέων (π.χ. Hanford). Επίσης, σο-

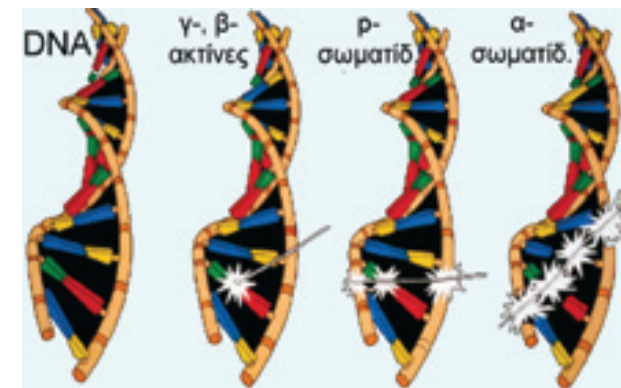
βαρή ρύπανση υδροφορέα προκάλεσε η απόρριψη υγρών ραδιενεργών αποβλήτων, που περιλάμβαναν περίπου 100 PBq προϊόντων διάσπασης και Pu, στον ποταμό στο Chelyabinsk-40 (Kyshtym, USSR) μεταξύ 1949 και 1956, ρυπαίνοντας ραδιενεργά την κοίτη του ποταμού Techa για 50 km. Η ρύπανση ήταν τόσο σοβαρή που οδήγησε στην κένωση των γύρω από τον ποταμό κατοικημένων περιοχών και παραμένει ακόμη μέχρι σήμερα σε ψηλά επίπεδα. Ένα άλλο παράδειγμα ρύπανσης επιφανειακού υδροφορέα αποτελεί η λίμνη Karachay, η οποία αποτέλεσε τις δεκαετίες '50 και '60 τον αποδέκτη περίπου 4 EBq ραδιενέργειας. Ας σημειωθεί ότι μερική αποξήρανση της λίμνης, μέσα του 1976, έχει οδηγήσει σε μερική διασπορά της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα σε μορφή σκόνης που περιείχε περίπου 20 TBq Sr-90 και Cs-137.

2. Επιπτώσεις της Ραδιενέργειας στον Άνθρωπο

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία που δέχεται ένας άνθρωπος οργανισμός διακρίνεται σε εξωτερική και εσωτερική ραδιενέργεια. Η εξωτερική ραδιενέργεια προέρχεται από εξωτερικές πηγές (εκτός του σώματος), όπως το έδαφος, το νερό και ατμοσφαιρικά σωματίδια ή αέρια, που έχουν επιρρυπανθεί ραδιενεργά. Όσον αφορά την εξωτερική ραδιενέργεια είναι πολύ πιο σημαντική για την γ-ακτινοβολία, επειδή η α- και η β-ακτινοβολία έχουν πολύ μικρή εμβέλεια/διεισδυτικότητα και σε περίπτωση εξωτερικής ραδιενεργού επιρρύπανσης θα εναποθέσουν όλη την ενέργειά τους αποκλειστικά στην επιδερμίδα. Αλλά και στην περίπτωση της γ-ακτινοβολίας μόνο ένα μικρό ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αλληλεπιδρά και απορροφάται, με αποτέλεσμα μόνο σε ψηλές δόσεις οι βιολογικές βλάβες να είναι σημαντικές.

Αντίθετα, η εσωτερική ραδιενέργεια που προέρχεται από α- και β-ραδιονουκλίδια που υπεισιέλθαν σε έναν οργανισμό με την εισπνοή ή/και την κατάποση είναι πολύ πιο σημαντική (βλ. Σχήμα 5). Η ραδιενεργός δόση που λαμβάνουν επί μέρους όργανα αλλά και συνολικά ο επιβαρυσμένος οργανισμός υπολογίζεται με εξειδικευμένα δοσιμετρικά μοντέλα, τα οποία λαμβάνουν υπόψη την ποσότητα και τον τρόπο εισόδου των ραδιονουκλιδίων στον οργανισμό καθώς επίσης και τη βιολογική συμπεριφορά, διασπορά και κατακράτηση/συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων σε κάποια όργανα, αλλά και τις ποσότητες ενέργειας που εναποτίθεται και την ευαίσθησία του κάθε κυττάρου/

οργάνου ξεχωριστά. Επίσης σημαντικό ρόλο στην απορροφούμενη δόση παίζει και ο τύπος της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Έτσι π.χ. τα α-σωματίδια έχουν μικρή εμβέλεια/διεισδυτικότητα, επειδή απορροφούνται σε σχετικά μικρό όγκο του κυττάρου/οργάνου, στο οποίο έχουν εναποτεθεί, με αποτέλεσμα η βλάβη στο DNA/κύτταρο να είναι σχετικά μεγάλη και συνεπώς οι επιπτώσεις στο αντίστοιχο όργανο/οργανισμό ανάλογα σοβαρές. Ας σημειωθεί ότι τόσο ο τύπος ραδιενέργειας όσο η βιολογική ημιζωή και το είδος του ιστού λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της βιολογικά σημαντικής ισοδύναμης ή αποτελεσματικής δόσης (Sv) από την απορροφούμενη δόση (Gy).



Σχήμα 5: Βλάβες στο DNA που μπορούν να προξενηθούν από διάφορους τύπους ιοντίζουσας ακτινοβολίας (ραδιενέργειας)

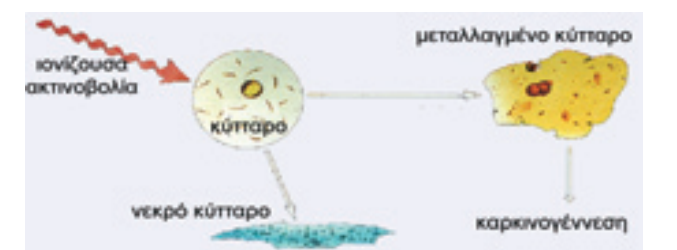
2.1 Βιολογικές Επιπτώσεις Ραδιενέργειας

Όταν η ιοντίζουσα ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την ύλη μεταφέρει σε αυτή ενέργεια με αποτέλεσμα τον ιονισμό των μορίων/ατόμων της. Όταν η ύλη είναι βιογενής (π.χ. κύτταρα, ιστοί κ.α.), το βιολογικό υλικό καταστρέφεται άμεσα ή έμμεσα από δραστικά χημικά είδη (π.χ. ρίζες) που παράγονται και αλληλεπιδρούν με τα βιομόρια. Οι επιπτώσεις της ραδιενέργειας σε έναν οργανισμό εξαρτώνται τις ραδιολογικές βλάβες σε κυτταρικό ή οργανικό επίπεδο.

Έκθεση σε ψηλά επίπεδα ραδιενέργειας (δόση > 5 Gy) έχει σαν αποτέλεσμα τον άμεσο θάνατο του κυττάρου πριν τη μίτωσή του, λόγω αλληλεπίδρασης των παραγομένων ριζών με άλλα μακρομόρια του κυττάρου, όπως π.χ. λιπίδια και πρωτεΐνες. Σε ραδιολογικές δόσεις από 0.1-5.0 Gy, η βλάβη του οργανισμού επέρχεται λόγω θραύσεων στην απλή ή διπλή έλικα του DNA. Αυτές οι θραύσεις μπορεί να

οδηγήσουν σε μεταλλάξεις ή/και θάνατο των κυττάρων μετά από ορισμένες μτώσεις του μητρικού κυττάρου. Το ακριβές επίπεδο δόσης, που οδηγεί σε θάνατο ενός κυττάρου, εξαρτάται από τον τύπο του κυττάρου. Έτσι π.χ. κύτταρα που αναπαράγονται γρήγορα, όπως κύτταρα που βρίσκονται στο μυελό των οστών ή στο γαστροεντερικό σύστημα είναι πιο ευαίσθητα από αυτά που έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής όπως τα κύτταρα των νευρώνων και των ινών μυών.

Η κύρια επίπτωση που σχετίζεται με χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας είναι ο καρκίνος. Εργαστηριακές μελέτες σε ζώα έδειξαν ότι και οι τρεις τύποι ραδιενέργειας (α-, β- και γ-ραδιενέργεια) ήταν σε θέση να προκαλέσουν καρκινογένεση σε κάθε τύπο ιστού και οργάνου στα υπό μελέτη ζώα. Οι τύποι καρκίνου που παρατηρήθηκαν σε ανθρώπους μετά από έκθεση σε ραδιενέργεια περιλαμβάνουν καρκίνο πνευμόνων, οστών, θυροειδούς, δέρματος και μαστού (σε γυναίκες). Οι χρόνοι εμφάνισης του καρκίνου μετά την έναρξη έκθεσης στην ραδιενέργεια διαφέρει, με τη λευχαιμία να εμφανίζεται σε 2 χρόνια μετά την έκθεση, ενώ ο καρκίνος πνευμόνων, μαστού και θυροειδούς πιθανόν να εμφανιστούν μετά από 20 χρόνια έκθεσης.



Σχήμα 6: Η βλάβη που προξενείται σε ένα κύτταρο από τη ραδιενέργεια μπορεί να οδηγήσει στο θάνατό του (απόπτωση) ή στη μετάλλαξή του (καρκινικό κύτταρο)

Ας σημειωθεί ότι επικρατεί μεγάλη αβεβαιότητα όσον αφορά τις ραδιολογικές χρόνιες επιπτώσεις από χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας, που είναι γενικά οι πιο σημαντικές για συνήθεις περιπτώσεις ραδιενέργειας περιβάλλοντος. Τα μοντέλα που προτείνονται περιλαμβάνουν γραμμικές και μη-γραμμικές προσεγγίσεις, επίπεδα ραδιενέργειας “κατωφλίου” και φαινόμενα όρμεσις για χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας. Επειδή γενικά οι ραδιολογικές χρόνιες επιπτώσεις για χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας εκτιμώνται με προέκταση από τις ραδιολογικές επιπτώσεις για ψηλά επίπεδα ραδιενέργειας, το μοντέλο που θα υιοθετηθεί παίζει

καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό των αποδεκτών ορίων έκθεσης του πληθυσμού στην ιοντίζουσα ακτινοβολία (ραδιενέργεια).

2.2 Επιδημιολογικές Μελέτες

Οι βασικές επιδημιολογικές μελέτες, από τις οποίες προέρχονται τα δεδομένα σχετικά με τις επιπτώσεις της ραδιενέργειας στον άνθρωπο, σχετίζονται με (1) βιομηχανικές χρήσεις του ραδίου (βιομηχανία κατασκευής ρολογιών) και τις επιπτώσεις στους εργαζομένους με ράδιο, (2) τις πρώτες εφαρμογές των ακτίνων-X στην ιατρική, (3) εξόρυξη ουρανίου και τις επιπτώσεις ραδονίου στους εργαζομένους στα εν λόγω ορυχεία, (4) κατοικίες με αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου, (5) τους επιζώντες των πυρηνικών βομβαρδισμών και (6) τα θύματα του Chernobyl και άλλων μικρότερων ατυχημάτων σε πυρηνικούς αντιδραστήρες.

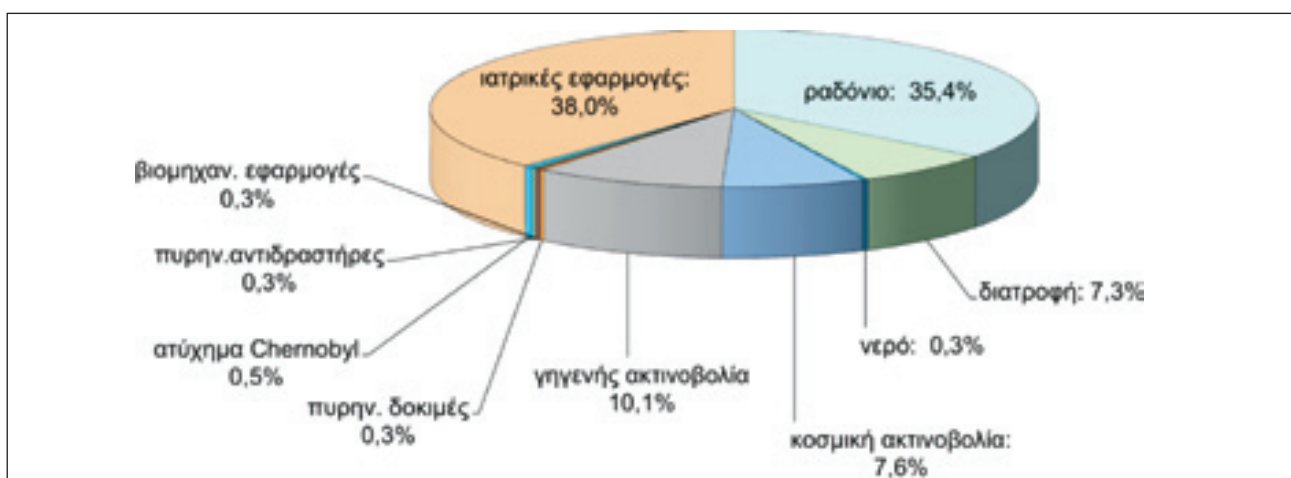
Γενικά οι μελέτες σχετικά με το ραδόνιο έχουν δείξει ότι η καρκινογενετικές ιδιότητες του ραδονίου ($Rn-222$) οφείλονται βασικά στα βραχύβια θυγατρικά του άλφα-ραδιονουκλίδια ($Po-218$, $Po-214$), τα οποία επικάθηνται κατά την αναπνοή στα κύτταρα του βρογχικού επιθηλίου, όπου μεταφέρεται όλη η ενέργεια των άλφα-σωματιδίων που εκπέμπουν, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ριζών και την έναρξη καρκινογένεσης πνευμόνων. Επίσης από τα δεδομένα των σχετικών μελετών έχουν εκτιμηθεί οι επιπτώσεις από την έκθεση σε ραδόνιο εσωτερικού χώρου (κατοικιών), οι οποίες όμως είναι σχετικά αμφίβολες όσον αφορά τα χαμηλά επίπεδα ραδονίου.

Επίλογος

Η ραδιενέργεια αποτελεί βασική συνισταμένη των ακτινοβολιών, οι οποίες κατακλύζουν το ανθρώπινο περιβάλλον και αλληλεπιδρώντας καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τους γαιολογικούς και βιοχημικούς κύκλους στη φύση. Η φυσική ραδιενέργεια υπήρχε πριν τη δημιουργία της ζωής στον πλανήτη και έπαιξε σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της. Όμως επειδή ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η χρήση της πυρηνικής ενέργειας για πολεμικούς (π.χ. πυρηνικές δοκιμές) και ειρηνικούς σκοπούς (π.χ. ατύχημα του Chernobyl) μπορεί να οδηγήσουν σε επικίνδυνα ψηλά επίπεδα ραδιενέργειας στη βιόσφαιρα και ειδικότερα στην ανθρωπότητα, είναι απαραίτητος ο συστηματικός και διαχρονικός έλεγχος των επιπέδων ραδιενέργειας στο εγγύς ανθρώπινο περιβάλλον, τόσο για την προστασία της ζωής όσο και τη διαφύλαξη του βιοτικού επιπέδου στις σύγχρονες κοινωνίες. Η απαίτηση αυτή καθίσταται ακόμη πιο επιτακτική, λαμβάνοντας υπόψη το έντονο ενδιαφέρον γειτονικών κρατών για παραγωγή ενέργειας με τη χρήση πυρηνικών αντιδραστήρων. Ένα ενδιαφέρον που ανακτά σταδιακά το (ειδικά μετά το ατύχημα του Chernobyl) χαμένο έδαφος, κυρίως λόγω της πρόσφατα (ακόμη και σε παραδοσιακά «πράσινες» χώρες) αναδυόμενης αντίληψης ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν ένα ακριβό όνειρο.

Βιβλιογραφία

1 Eisenbud M., Paschoa A.S., *Environmental Radioactivity, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A280* (1989) 470-482



Σχήμα 6: Σχετική κατανομή ραδιενεργού δόσης που δέχεται κατά μέσον όρο ο πληθυσμός της Ευρώπης και αντιστοιχεί σε φυσικές και τεχνητές πηγές ραδιενέργειας

2 MacKenzie A.B., *Environmental radioactivity: experience from the 20th century - trends and issues for the 21st century, The Science of the Total Environment* 249 (2000) 313-329