

Κεφάλαιο 4

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό επισκοπούνται τα διεθνή δεδομένα που αφορούν στην επίδραση της τεχνολογίας στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες και τα σχετικά δοσομετρικά στοιχεία, όπου αυτά υπάρχουν. Από όσα παρουσιάζονται στο παρόν εδάφιο, διαφαίνεται ότι η τεχνολογία επιδρά, κυρίως, μέσω των ιατρικών εφαρμογών των ακτινοβολιών (Ακτινοδιαγνωστική, Πυρηνική Ιατρική, Ακτινοθεραπεία), και αυτό, διότι οι εφαρμογές αυτές αφορούν σε μεγάλο τμήμα πληθυσμού. Η τεχνολογικές επιδράσεις έχουν σημαντική συνεισφορά τοπικά σε περιοχές εγγύς ορυχείων ουρανίου και λιγνίτη, καθώς και από τις τεχνολογικές εφαρμογές του φυσικού αερίου, του φωσφόρου αλλά και διαφόρων μετάλλων.

4. Τεχνολογία και Ιοντίζουσες ακτινοβολίες, Επίδραση της Τεχνολογίας στις Φυσικές & Τεχνητές Πηγές

4.1. Επίδραση της τεχνολογίας στις φυσικές πηγές ιοντίζουσών ακτινοβολιών

4.1.1. Γενικά

Υπάρχουν πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες που έχουν ως αποτέλεσμα την αλλοίωση της κατανομής των φυσικών πηγών ιοντίζουσών ακτινοβολιών, τοπικά ή σε κάποια περιοχή με σχετικό εύρος. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, υπάρχουν συγκεκριμένες δραστηριότητες, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένα επίπεδα φυσικώς εμφανιζόμενων ραδιενεργών υλικών (Naturally Occurring Radioactive Material-NORM) (United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2003, 2008). Οι βασικότερες τέτοιες κατηγορίες δραστηριοτήτων είναι οι παρακάτω:

- (α) η εξόρυξη και επεξεργασία του ουρανίου
- (β) η εξόρυξη και τήξη μετάλλων
- (γ) οι βιομηχανικές εφαρμογές των παραγώγων του φωσφόρου
- (δ) η εξόρυξη άνθρακα και οι βιομηχανικές εφαρμογές αυτού
- (ε) η εξόρυξη του πετρελαίου και του φυσικού αερίου
- (στ) οι βιομηχανικές εφαρμογές οξειδίων του τιτανίου και των σπανίων γαιών
- (ζ) οι βιομηχανικές εφαρμογές ζirkονίου και κεραμικών υλικών

Ο κίνδυνος από την ακτινοβολία που προκύπτει λόγω των δραστηριοτήτων που προκαλούν αύξηση των τοπικών επιπέδων NORM είναι εν γένει μικρός, εκτός από τις περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση υλικών ή παραγώγων με ιδιαίτερα αυξημένες συγκεντρώσεις φυσικών ραδιοϊσοτόπων. Οι σημαντικότερες τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζονται ως αποτέλεσμα της χρήσης οικοδομικών υλικών, της παραγωγής ενέργειας και της χρήσης υπολειμμάτων της παραγωγής πετρελαίου.

Μια συστηματική εκτίμηση της κατάστασης γύρω από περιοχές της Ευρώπης με αυξημένα ποσά NORM, λόγω τεχνολογικών εφαρμογών, παρέχεται από τον Vandenhove (2000). Ειδικά για την Ευρώπη, η επιτροπή United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008) αναφέρει ότι μόνο οι τρεις πρώτες κατηγορίες αποτελούν τις βασικές πηγές βιομηχανικών εφαρμογών που αποφέρουν επιβαρύνσεις επιπέδων NORM, κυρίως μέσω των παραγώγων τους και των αποβλήτων αυτών. Με εξαίρεση την επίδραση της εξόρυξης και επεξεργασίας του ουρανίου και, πρόσφατα, αυτήν των βιομηχανικών εφαρμογών του ζirkονίου, οι υπόλοιπες τεχνολογικές πηγές αύξησης του επιπέδου NORM δεν έχουν διερευνηθεί αρκετά μέχρι σήμερα (2015) ως προς την επίδρασή τους στον άνθρωπο. Κάποιες σχετικές προσπάθειες έχουν αναφερθεί στις εκθέσεις United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1993) και United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000).

Για τις βιομηχανίες που δεν ευρίσκονται σήμερα σε λειτουργία, το επιστημονικό ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις περιοχές που περιέχουν υπολείμματα των σχετικών εφαρμογών, όμως, πριν την εφαρμογή σύγχρονων μέτρων ακτινοπροστασίας. Αρκετές περιοχές έχουν καθαριστεί πλέον. Υπάρχουν όμως και συγκεκριμένες περιοχές για τις οποίες τα στοιχεία είναι από ελλιπή έως ανύπαρκτα. Για τις βιομηχανίες που είναι σε παραγωγή, το επιστημονικό ενδιαφέρον επικεντρώνεται στα λύματα, τις εκροές από τις αποθέσεις παραπροϊόντων και στη σχετική έκθεση των πληθυσμών που γειτνιάζουν.

Επισημαίνεται πάντως ότι η σχετική έρευνα είναι ακόμη σε αρχικό στάδιο και χρησιμοποιείται σήμερα (2015) μόνο ως βάση για την κατασκευή βάσεων δεδομένων. Παρακάτω αναλύονται σε μικρή έκταση τα σχετικά παγκόσμια στοιχεία.

4.1.2. Εξόρυξη και επεξεργασία Ουρανίου

Μεταξύ 1998 και 2003 παραγόταν περίπου 35,000 τόνοι ουρανίου σε είκοσι τέσσερις χώρες. Ο Καναδάς κατείχε τα πρωτεία με περίπου 30% της παγκόσμιας παραγωγής, με δεύτερη την Αυστραλία με 21%. Από το ξεκίνημα των εφαρμογών ραδιενέργειας, ενεπλάκησαν τριανταεπτά χώρες στη παραγωγή ουρανίου. Σημαντικό μερίδιο στην παραγωγή είχαν σε όλη αυτή την περίοδο οι ΗΠΑ, η Γερμανία, η Κίνα και η πρώην ΕΣΣΔ. Μεταξύ 1990 και 2000 η παγκόσμια παραγωγή ουρανίου μειώθηκε και, έκτοτε, παραμένει σχετικά σταθερή (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008).

Το ουράνιο εξορύσσεται. Οι χώρες που έχουν δηλώσει ύπαρξη και λειτουργία ορυχείων ουρανίου είναι η Αργεντινή, η Αυστραλία, η Βουλγαρία, η Γαλλία, η Δανία, οι ΗΠΑ, η Ισπανία, ο Καναδάς, η Σλοβενία, και η Τσεχία. Δυνατότητες εξόρυξης υπάρχουν, επίσης, στη Βραζιλία, στην Εσθονία, στο Καζακστάν, στην Ουκρανία και στη Ρουμανία (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008).

Η εξόρυξη του ουρανίου πραγματοποιείται σε ανοικτά σημεία, σε υπόγεια ορυχεία και με έκπλυση in-situ. Οι χώροι απόθεσης των υπολειμμάτων της εξόρυξης του ουρανίου αντιστοιχούν περίπου σε 1 τόνο παραπροϊόντος ανά τόνο χρήσιμου καυσίμου. Τα υπολείμματα της παραγωγής περιέχουν, μετά την επεξεργασία, περίπου στο 5-10% ουράνιο και περίπου 85% της ολικής ενεργότητας. Τυπικές τιμές ειδικής ενεργότητας είναι μεταξύ 40000 Bq/kg και 100000 Bq/kg σε ^{238}U και μεταξύ 1000 σε Bq/kg και 20000 σε ^{226}Ra (Vandenhove, 2000). Η συνολική ποσότητα των αποθεμάτων της επεξεργασίας του ουρανίου παγκόσμια ανέρχεται παγκόσμια περίπου σε $2,5 \times 10^5$ τόνους (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008). Η πηγή αυτή αποτελεί και την κυριότερη πηγή έκθεσης του ανθρώπου σε ιονίζουσα ακτινοβολία λόγω της επίδρασης της τεχνολογίας.

Οι οδοί της έκθεσης του ανθρώπου εξαρτώνται αρκετά από τον τόπο. Η έκθεση προέρχεται κύρια από το ^{226}Ra , το ^{222}Rn και τα βραχύβια θυγατρικά του, αλλά σημαντική είναι κατά περίπτωση και η συνεισφορά των ^{238}U , ^{230}Th και ^{210}Pb (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2008; Vandenhove, 2000). Είναι σημαντικό ότι υπάρχουν διάφορες εγκαταλελειμμένες περιοχές παγκόσμια για τις οποίες δεν έχει ληφθεί καμία μέριμνα μείωσης των συγκεντρώσεων μέχρι σήμερα (2015).

Τα δοσιμετρικά δεδομένα λόγω των χρήσεων του ουρανίου είναι ακόμη περιορισμένα. Για παράδειγμα, έχει εκτιμηθεί ότι η συνολική εκροή ραδονίου λόγω των υπογείων ορυχείων ουρανίου είναι 75 TBq. Για άλλου τύπου εξορύξεις δεν υπάρχουν εκτιμήσεις. Σύμφωνα με την έκθεση United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008) στο Καναδά και την Αυστραλία η ολική εκροή ραδονίου ανέρχεται σε 3 TBq.

Η συλλογική δόση λόγω των χρήσεων του ουρανίου ανέρχεται περίπου σε $0,2 \text{ manSv}/(\text{GW y}^{-1})$. Οι εκτιμώμενες τιμές δόσεις για κατοίκους σε ακτίνα 100 km από τα ορυχεία, ή τις εναποθέσεις ουρανίου, ανέρχεται σε 25 μSv . Θεωρείται ότι σε τοπικό επίπεδο οι αποκλίσεις από αυτή την τιμή θα πρέπει να είναι δεδομένες (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2008). Ειδικότερα για τις μονάδες εμπλουτισμού ουρανίου, η συλλογική δόση μειώνεται δραστικά, και είναι περίπου ίση προς $0,003 \text{ manSv}/(\text{GW y}^{-1})$.

4.1.3. Εξόρυξη και τήξη μετάλλων

Οι βιομηχανικές εφαρμογές μετάλλων σε αυτό το εδάφιο αφορούν κυρίως στα αλουμίνιο, χαλκό, σίδηρο, ατσάλι, μόλυβδο, νιόβιο, κασσίτερο, ψευδάργυρο και χρυσό (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008)). Η ενεργότητα NORM στα αρχικά ορυκτά είναι γενικά αρκετά χαμηλή, και το αυτό ισχύει και για τις σκουριές και για τα υπολείμματα. Ωστόσο αναφέρονται και περιπτώσεις με αυξημένες συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων στις σκουριές, όπως, για παράδειγμα, στις σκουριές κασσίτερου (Vanmarcke, Paridaens, Froment, Van Cauteren, & Timmermans, 2003).

Το ραδιενεργό περιεχόμενο των παραγώγων της βιομηχανίας του νιοβίου είναι γενικά υψηλό, με τον πυροχλωρίτη να περιέχει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις – για παράδειγμα μεταξύ 10 kBq/kg και 80 kBq/kg σε αναφορά με το ^{232}Th (Vandenhove, 2000). Σε μία βιομηχανία στη Βραζιλία η ενεργότητα στα υπολείμματα ανέρχεται μέχρι και στα 200 kBq/kg για το ^{228}Ra και μέχρι τα 117 kBq/kg για το ^{232}Th στις σκουριές (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008). Οι κύριες πηγές της έκθεσης του γενικού πληθυσμού αφορούν στη ραδιενεργό μόλυνση των υπογείων υδάτων με ισότοπα του

ραδίου και στην εξωτερική έκθεση στις σκουριές με υψηλή περιεκτικότητα σε ισότοπα του θορίου (Ibrahim, 1999; Pires do Rio, Amaral, Fernandes & Rochedo, 2002). Έχουν, επίσης, αναφερθεί σημαντικές τιμές έκθεσης ανθρώπων στο ύπαιθρο λόγω επανα-αεροδιάλυσης παραπροϊόντων της βιομηχανίας κασσιτέρου (Vandenhove, 2000).

Σχετικά με την εξόρυξη χρυσού αναφέρεται ότι οι αποθέσεις από τα βαθιά ορυχεία χρυσού της Νοτίου Αφρικής έχουν γενικά χαμηλές συγκεντρώσεις ουράνιου (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008). Από το 1950 έχουν αποτεθεί περί τους 170 τόνους του παραπροϊόντος U_3O_8 και περίπου 20 τόνοι ^{226}Ra (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008). Οι δόσεις του γενικού πληθυσμού ανέρχονται σε περίπου 0.04 mSv λόγω της κατάποσης ύδατος, περίπου 0,086 mSv, λόγω κατανάλωσης ψαριών, και περίπου 0.002 mSv, λόγω της κατανάλωσης τοπικών τροφίμων (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008). Η ετήσια επιβάρυνση του γενικού πληθυσμού λόγω της εισπνοής του ραδονίου που παράγεται από το ράδιο που περιέχεται στις εναποθέσεις των ορυχείων, ανέρχεται σε περίπου 0,04 mSv (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008; Wymer & Botha, 2001).

4.1.4. Βιομηχανικές εφαρμογές των παραγώγων του φωσφόρου

Τα ορυκτά πετρώματα φωσφόρου χρησιμοποιούνται ως αρχικά υλικά για την παρασκευή όλων των παραγώγων φωσφόρου. Τα παράγωγα του φωσφόρου χρησιμοποιούνται γενικά για την παρασκευή λιπασμάτων, φωσφορικού οξέος, καθαρού φωσφόρου, απορρυπαντικών και διαφόρων οργανικών χημικών. Οι συγκεντρώσεις του ^{232}Th και του ^{40}K στα πετρώματα κάθε τύπου είναι παρόμοιες με αυτές που παρατηρούνται στο έδαφος και στους άλλους τύπους πετρωμάτων, όμως οι συγκεντρώσεις του ^{238}U παρουσιάζονται αυξημένες και, ως εκ τούτου, η εξόρυξη, επεξεργασία και χρήση πετρωμάτων φωσφόρου και παραγώγων τους είναι υπεύθυνη για επιπρόσθετη έκθεση του ανθρώπου σε ακτινοβολία. Ειδικότερα, τα ορυκτά πετρώματα περιέχουν περίπου 1500 Bq/kg σε ουράνιο και ράδιο παρ' ότι έχουν αναφερθεί και πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις έως 20 kBq/kg σε U_3O_8 (Paschoa & Godoy, 2002; United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008). Γενικά τα ορυκτά φωσφόρου ιζηματογενούς προέλευσης έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις ισοτόπων ουρανίου. Τα μαγματικά ορυκτά έχουν χαμηλές συγκεντρώσεις ισοτόπων ουρανίου, αλλά αυξημένες συγκεντρώσεις ισοτόπων θορίου (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008) παρόλο που οι συγκεντρώσεις αυτών είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των ιζηματογενών πετρωμάτων (Vanmarcke et al., 2003). Τα λιπάσματα φωσφόρου εμπλουτίζονται σε ισότοπα του ουρανίου και έτσι έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αυτά (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008). Από την άλλη πλευρά, ο φωσφογύψος περιέχει κατά μέσο όρο 30% σε ^{232}Th και 5% σε ισότοπα του ουρανίου (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008).

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι η επεξεργασία των πετρωμάτων φωσφόρου επάγει την εκπομπή αερίων και αιωρούμενων σωματιδίων με υψηλή περιεκτικότητα σε ισότοπα του ουρανίου και του ραδίου (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008). Αυτά με τη σειρά του εισπνεόμενα από τον άνθρωπο οδηγούν σε αύξηση της ραδιενεργού δόσης. Επιπρόσθετα οι περιοχές εναπόθεσης των υπολειμμάτων της επεξεργασίας του φωσφογύψου εντοπίζονται, συνήθως, σε ελεύθερους χώρους, με αποτέλεσμα οι βροχή και τα τοπικά καιρικά φαινόμενα να οδηγούν εμπλουτισμένα ραδιενεργά κατάλοιπα στον υδροφόρο ορίζοντα και τα επιφανειακά ύδατα (Vandenhove, 2000). Η επιβάρυνση αυξάνεται από το γεγονός ότι τα λιπάσματα φωσφόρου χρησιμοποιούνται στις αγροτικές εργασίες, αλλά και ορισμένα οικοδομικά υλικά (Pantelica, Georgescu, Murariu-Magureanu, Margaritescu, Cincu, 2001).

Γενικά οι δόσεις από τη χρήση πετρωμάτων φωσφόρου θεωρούνται μικρές, σε ειδικές περιπτώσεις πληθυσμών όμως μπορεί αυτές να παρουσιαστούν ιδιαίτερα αυξημένες. Η μέση ετήσια συλλογική δόση ανά κάτοικο της γης από τις βιομηχανικές χρήσεις ορυκτών πετρωμάτων φωσφόρου και των παραγώγων τους εκτιμάται σε 0,04 μ Sv, από τη χρήση λιπασμάτων σε 2 μ Sv και από τη χρήση άλλων παραγώγων και υπολειμμάτων, σε 10 μ Sv (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993, 2008).

4.1.5. Εξόρυξη και βιομηχανικές εφαρμογές άνθρακα

Η ραδιοβιολογική επιβάρυνση του ανθρώπου λόγω της χρήσης του άνθρακα για παραγωγή ενέργειας είναι πολλαπλή. Σε πρώτο επίπεδο η επίδραση προέρχεται από την εξόρυξη του άνθρακα. Αυτή έχει ως αποτέλεσμα την έκθεση πληθυσμού στον αέρα εξόδου των ορυχείων άνθρακα, ο οποίος είναι πλούσιος σε ραδόνιο, και σε παράγωγά του. Για την παραγωγή ενέργειας γίνεται καύση του άνθρακα σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς (ΑΗΣ) (40%), σε κτίρια για οικιακή χρήση (10%) και σε βιομηχανίες (50%). Η συλλογική δόση από την παραγωγή 1 GW ηλεκτρικής ενέργειας με καύση άνθρακα, εκτιμάται σε 20 manSv. Λαμβάνοντας υπόψη τα διεθνή δεδομένα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η μέση ετήσια ενεργός δόση ανά άτομο της γης εκτιμάται ότι είναι 2 μSv, η οποία, όμως, τοπικά, κοντά σε χώρους καύσης άνθρακα, μπορεί να παρουσιάσει έντονες παραγώγων καύσης στα οικοδομικά υλικά εκτιμάται σε 25000 manSv και η αντίστοιχη ενεργός δόση ανά άτομο σε 5 μSv (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993, 2008). Δεν υπάρχουν καθόλου πληροφορίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις από την καύση του άνθρακα για οικιακές χρήσεις. Θεωρείται όμως ότι οι οικιακές χρήσεις πρέπει να οδηγούν σε αυξημένες συλλογικές δόσεις, επειδή οι καμινάδες των οικιών δεν είναι εξοπλισμένες με ειδικά φίλτρα αφαίρεσης της ιπτάμενης τέφρας (United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993). Σύμφωνα με την United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008) η χρήση άνθρακα στην παραγωγή ενέργειας οδηγεί στη δημιουργία παραγώγων καύσης (διοξείδιο του άνθρακα και ύδωρ) και σε ανόργανα υλικά πλούσια σε φυσικά ραδιοϊσότοπα, τα οποία συνιστούν την τέφρα. Παρά το ότι τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται ως οικοδομικά, π.χ. τσιμέντα, η United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008) εκτιμά ότι η σχετική συνεισφορά είναι χαμηλή, και κάτω από τα θεσμοθετημένα όρια.

Τα στοιχεία υποδεικνύουν ότι η μέση ειδική ενεργότητα των μορφών του άνθρακα σε ^{238}U και ^{232}Th είναι περί τα 20 Bq/kg, με το εύρος 5 Bq/kg με 500 Bq/kg να πρέπει να θεωρείται αντιπροσωπευτικό (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993, 2008). Έχουν αναφερθεί περιπτώσεις, όμως, ορυκτού άνθρακα με ειδική ενεργότητα έως και 15000 Bq/kg (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993, 2008; Vandenhove, 2000). Κατά τη διάρκεια της καύσης του άνθρακα κάποιας μορφής, παράλληλα με τα παραγόμενα ύδωρ και το διοξείδιο του άνθρακα, δημιουργείται και πλήθος αερίων οργανικών και ανόργανων ενώσεων. Οι ανόργανες ενώσεις εμπλουτίζουν, κυρίως, την παραγόμενη τέφρα. Με δεδομένο ότι οι ανόργανες ενώσεις περιέχουν υλικά NORM, η τέφρα εμπλουτίζεται σε ραδιενεργά υλικά (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993, 2008; Vanmarcke et al., 2001). Ο συνήθης εμπλουτισμός της τέφρας σε υλικά NORM ανέρχεται σε 10 φορές. Η σημαντικότερη αιτία επιβάρυνσης του ανθρώπου, λόγω της τέφρας που προέρχεται από τις βιομηχανικές χρήσεις του άνθρακα, είναι η εισπνοή των τελικών θυγατρικών του ραδονίου ^{210}Pb και ^{210}Po (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993, 2008). Πρόσφατες μελέτες στο Ηνωμένο Βασίλειο υποδεικνύουν ότι οι επιδράσεις της χρήσης τέφρας στα οικοδομικά υλικά δεν επιφέρει επιβαρύνσεις πάνω από τα θεσμοθετημένα όρια (Health Protection Agency UK, 2001, 2006).

4.1.6. Εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου

Το πετρέλαιο, είτε ως αργό είτε ως επεξεργασμένο, αλλά και τα παράγωγά αυτού, έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι η λειτουργία μηχανοκινητήρων διαφόρων τύπων για μεταφορά, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και οικιακή θέρμανση. Το φυσικό αέριο, από την άλλη μεριά, έχει και αυτό πολλές χρήσεις. Η κύρια χρήση του είναι για κίνηση, οικιακή θέρμανση, παρασκευή γευμάτων, ηλεκτροπαραγωγή, και ως πηγή θέρμανσης σε βιομηχανίες.

Κατά την εξόρυξη του πετρελαίου και την εξαγωγή του φυσικού αερίου, τα φυσικά ραδιοϊσότοπα των κατώτερων στρωμάτων του φλοιού της γης έρχονται στην επιφάνεια. Σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις ^{226}Ra και ^{228}Ra NORM, απελευθερώνονται στην επιφάνεια κατά την εφαρμογή των τεχνικών εξόρυξης. Οι μέσες συγκεντρώσεις στο νερό γύρω από το σταθμό γεώτρησης ανέρχεται σε περίπου 2 Bq/L ύδατος. Σε αποστάσεις, όμως, ολιγότερες των 250 μέτρων, οι σχετικές συγκεντρώσεις φθάνουν τα φυσιολογικά επίπεδα NORM (Jerez Veguería, Godoy, & Miekeley, 2002; Vanmarcke et al., 2003).

Τα σημαντικότερα ισότοπα είναι αυτά του ραδίου με τιμές ειδικής ενεργότητας μεταξύ 100 Bq/kg έως 1000 Bq/kg (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008; Vandenhove, 2000). Έχουν αναφερθεί, όμως, και πολύ υψηλές τιμές ειδικής ενεργότητας του ραδίου

στο πετρέλαιο στη Βραζιλία που ανέρχονται έως 340 kBq/kg για το ^{226}Ra και 286 kBq/kg για το ^{228}Ra (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008).

Οι εκτιμήσεις δόσεων από τη χρήση του πετρελαίου και των παραγώγων του έχουν γίνει μόνο για τις χρήσεις σε σταθμούς παραγωγής. Η δόση σε αυτές τις περιπτώσεις προέρχεται, κατά το ήμισυ, από εισπνοή κατά τη διάρκεια της διόδου του παραγόμενου νέφους και, κατά το άλλο ήμισυ, από εξωτερική και εσωτερική έκθεση στα ραδιοϊσότοπα που καθιζάνουν. Εκτιμάται ότι η μέση συλλογική δόση για την παραγωγή 1 GW ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση πετρελαίου, ή παραγώγων του, είναι 0,5 manSv, και ότι η αντίστοιχη ενεργός δόση ανά άτομο της γης είναι 10 nSv (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993, 2008). Αυξημένες τιμές ενεργού δόσης έχουν αναφερθεί για κατοίκους της υπαίθρου γύρω από τους σταθμούς εξόρυξης, λόγω της διάλυσης και διακίνησης του ^{226}Ra και των θυγατρικών του στα παρακείμενα θαλάσσια στρώματα.

Σχετικά με το φυσικό αέριο, η βασική ραδιοβιολογική επιβάρυνση από τη χρήση του προέρχεται από το ραδόνιο, που απελευθερώνεται και το οποίο περιέχεται σε μεγάλες ποσότητες. Εκτιμάται ότι η μέση συλλογική δόση για την παραγωγή 1 GW ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση φυσικού αερίου, είναι 0.03 manSv και ότι η αντίστοιχη ενεργός δόση ανά άτομο της γης είναι 1 nSv (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993, 2008).

4.1.7. Βιομηχανικές εφαρμογές σπανίων γαιών και τιτανίου.

Ο μοναζίτης (monasite) και ο βαστναεναζίτης (bastnaesite) αποτελούν τα σημαντικότερα ορυκτά που περιέχουν ίχνη σπανίων γαιών. Ο μοναζίτης έχει ειδική ενεργότητα μεταξύ 1000 Bq/kg και 20000 Bq/kg σε ισότοπα της σειράς του ^{238}U και μεταξύ 5000 Bq/kg και 350000 Bq/kg σε ισότοπα της σειράς του ^{232}Th (IAEA, 2003; United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008). Ο βαστναεναζίτης, από την άλλη μεριά, έχει ειδική ενεργότητα μεταξύ 900 Bq/kg και 1,200 Bq/kg σε ισότοπα της σειράς του ^{238}U και μεταξύ 700 Bq/kg και 7,000 Bq/kg σε ισότοπα της σειράς του ^{232}Th (IAEA, 2003; United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008). Στην Ευρώπη παράγονται οι ελάχιστες ποσότητες υπολειμμάτων από τις σχετικές βιομηχανίες. Σημαντικές, όμως, διαφοροποιήσεις έχουν αναφερθεί για τη Βραζιλία (Lauria & Rochedo, 2005) και τις ΗΠΑ (Environmental Protection Agency, 2002).

Αναφορικά με τη βιομηχανική παρασκευή τιτανίου οι τυπικές τιμές ειδικής ενεργότητας στα αντίστοιχα ορυκτά κυμαίνονται μεταξύ 300 Bq/kg και 600 Bq/kg σε ισότοπα της σειράς του ^{238}U και μεταξύ 35 Bq/kg και 600 Bq/kg σε ισότοπα της σειράς του ^{232}Th . Η έκθεση είναι, κυρίως, εξωτερική, αλλά οφείλεται, επίσης, και στη διακίνηση ισωτόπων του ^{226}Ra στις παρακείμενες περιοχές (Vandenhove, 2000). Τα υπολείμματα της βιομηχανίας τιτανίου μπορεί να οδηγήσουν σε αξιοσημείωτη έκθεση πληθυσμών που κατοικοεδρεύουν κοντά στις βιομηχανίες. Συνήθως αφορά στον εμπλουτισμό με υλικά NORM των υδροξειδίων του τιτανίου, όπως και από την παρουσία χλωριδίων του ραδίου (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008; Vandenhove, 2000). Ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις έχουν αναφερθεί στη Γαλλία μεταξύ 1976 και 1990 (European Commission, 1999).

4.1.8. Βιομηχανικές εφαρμογές ζirkονίου και κεραμικών υλικών

Οι μέσες τιμές ενεργότητας στο ζirkόνιο είναι μεταξύ 300 Bq/kg και 600 Bq/kg σε ισότοπα της σειράς του ^{232}Th και μεταξύ 3000 Bq/kg και 7000 Bq/kg σε ισότοπα της σειράς του ^{238}U . Με εξαίρεση τα πυρίμαχα τούβλα, για τα οποία η ειδική ενεργότητα σε ζirkόνιο ανέρχονται στα 10 Bq/kg, τιμή που θεωρείται σχετικά μικρή για σημαντική ραδιολογική επιβάρυνση του ανθρώπου (Vandenhove, 2000). Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι τοπικά, και ειδικότερα για τους εργαζομένους στη βιομηχανία ζirkονίου, η εργασία τους συνιστά επιπρόσθετη επιβάρυνση λόγω εκπεμπόμενης γ-ακτινοβολίας. Οι μέγιστες σχετικές δόσεις ανέρχονται σε 200 mSv. Ο γενικός πληθυσμός αναμένεται ότι λαμβάνει πολύ μικρότερες δόσεις ραδιενέργειας.

4.1.9. Λοιπές εφαρμογές

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, υπάρχει, επίσης, πλήθος υλικών που προέρχονται από το φλοιό της γης και τα οποία χρησιμοποιούνται αυτούσια ή κατεργασμένα μετά από συγκεκριμένη μεθοδολογία (Bigit et al., 2005; International Atomic Energy Agency, 2010; United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1993, 2008) με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αυτό των οικοδομικών υλικών (Stoulos, Manolopoulou, & Papastefanou, 2003; Misdaq & Amghar, 2005; United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1993, 2008). και τα πρωτογενή υλικά

αυτών, όπως λ.χ. η ιπτάμενη τέφρα (Karangelos, Petropoulos, Anagnostakis, Hinis & Simopoulos, 2004). Όπως και ο φλοιός της γης, τα υλικά αυτά εκπέμπουν γ-ακτινοβολία, επειδή περιέχουν ποσότητες από ραδιοϊσότοπα που είναι μέλη φυσικών ραδιενεργών σειρών, ή δεν ανήκουν σε κάποια φυσική ραδιενεργό σειρά (Bigit et al., 2005; International Atomic Energy Agency, 2010; Miah, 2004; Misdaq & Amghar, 2005; United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1993, 2008). Τα ραδιοϊσότοπα αυτά εκπέμπουν ακτινοβολία η οποία οδηγεί σε μια πρόσθετη έκθεση του ανθρώπου (NAS-NRR, 2005,2006).

Μία αξιοσημείωτη, επίσης, πηγή είναι η γεωθερμική ενέργεια. Με τον όρο γεωθερμική ενέργεια νοείται η ενέργεια ζεστών ατμών ή υδάτων που παράγονται από βράχους υψηλής θερμοκρασίας στη γη. Οι ατμοί και τα ύδατα της γεωθερμικής ενέργειας εκλύουν ραδιενέργεια, που προέρχεται, κυρίως, από διασπάσεις της σειράς του ουρανίου. Αν και τα ισότοπα στερεών στοιχείων είναι σημαντικά, η ραδιοβιολογική επιβάρυνση του ανθρώπου προέρχεται κατά βάση από την έκλυση ραδονίου, το οποίο περιέχεται σε μεγάλες ποσότητες. Γεωθερμική ενέργεια παράγεται στην Αρκτική, την Ιταλία, την Ιαπωνία, τη Νέα Ζηλανδία, τη Ρωσία και τις ΗΠΑ.

Μία άλλη πηγή θεωρείται η εξόρυξη και επεξεργασία μεταλλευμάτων βαρέων μετάλλων. Ως μεταλλεύματα βαρέων μετάλλων χαρακτηρίζονται τα μεταλλεύματα εκείνα που παρουσιάζουν ειδικό βάρος μεγαλύτερο του 2.9. Οι συγκεντρώσεις των μεταλλευμάτων αυτών σε ^{232}Th και ^{238}U είναι, συνήθως, αρκετά υψηλότερες των τυπικών συγκεντρώσεων εδαφών και βράχων. Έτσι θεωρούνται υπεύθυνα για έκθεση του ανθρώπου. Δυστυχώς, τα δεδομένα για τα μεταλλεύματα αυτά είναι πολύ λίγα, και δε μπορεί έτσι να γίνει εκτίμηση της μέσης ετήσιας ενεργού δόσης από αυτά.

4.2. Τεχνητές πηγές Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών

4.2.1. Ιατρικές χρήσεις

Η χρήση της ιοντιζουσας ακτινοβολίας στην ιατρική έχει οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στη διάγνωση και τη θεραπεία ασθενειών. Ετησίως, σε όλο τον κόσμο, εκτελούνται πάνω από 3600 εκατομμύρια εξετάσεις με ακτίνες X, πάνω από 37 εκατομμύρια διαδικασίες πυρηνικής ιατρικής και πάνω από 7,5 εκατομμύρια ακτινοθεραπείες. Καθώς τα οφέλη για τους ασθενείς αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο, η χρήση της ακτινοβολίας στην ιατρική αυξάνει παγκοσμίως. Ενώ η ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας της υγείας καθιστά τις νέες εφαρμογές ασφαλέστερες, τυχόν ακατάλληλη χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε περιττές ή ακούσιες δόσεις ακτινοβολίας και μπορεί να προκαλέσει δυνητικούς κινδύνους για τους ασθενείς και το προσωπικό (World Health Organization, 2015).

Οι επαγγελματίες υγείας έχουν γενικά χαμηλή ευαισθητοποίηση σχετικά με τις δόσεις ακτινοβολίας σε ακτινολογικές ιατρικές διαδικασίες, καθώς και με τη φύση και το μέγεθος των κινδύνων, που σχετίζονται με τις ακτινοβολίες. Μια περιοχή ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι η άσκοπη χρήση της ακτινοβολίας, όταν κλινική αξιολόγηση ή άλλες απεικονιστικές μέθοδοι θα μπορούσαν να δώσουν διάγνωση με αρκετή ακρίβεια. Η αιτιολόγηση των διαδικασιών είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στην παιδιατρική φροντίδα υγείας. Τα παιδιά είναι ιδιαίτερα ευάλωτα στις περιβαλλοντικές απειλές και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, δηλαδή υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης μακροπρόθεσμων επιδράσεων στην υγεία τους από την ακτινοβολία, όπως ο καρκίνος.

Όλη σχεδόν η μέση ετήσια ενεργός δόση, που λαμβάνει ο άνθρωπος από τεχνητές πηγές ακτινοβολίας, οφείλεται στις ιατρικές χρήσεις ακτινοβολιών X και ραδιοϊσοτόπων (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993) στην ακτινοδιαγνωστική, στην πυρηνική ιατρική και στην ακτινοθεραπεία. Τονίζεται πάντως ότι ικανοποιητικά δεδομένα για την εκτίμηση υπάρχουν μόνο για τις αναπτυγμένες χώρες, δηλαδή αναφέρονται σε ποσοστό μικρότερο του 25 % του πληθυσμού της Γης. Αντίθετα στις αναπτυσσόμενες χώρες, τα δεδομένα είναι από πολύ ελλιπή ως ανύπαρκτα. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν αποσπασματικά δεδομένα για περίπου 25% του πληθυσμού της Γης, ενώ για το υπόλοιπο 50% δεν υπάρχουν καθόλου στοιχεία (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993). Το μεγαλύτερο μέρος της ενεργούς δόσης από ιατρικές πηγές ακτινοβολιών και ραδιοϊσοτόπων οφείλεται στη χρήση ακτίνων X για διαγνωστικούς σκοπούς (90-95%). Το υπόλοιπο (5-10%) οφείλεται στην πυρηνική ιατρική (ακτίνες β και γ) και στην ακτινοθεραπεία (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993).

Η **διαγνωστική ακτινολογία**, γενικά, αναφέρεται στη λήψη και ανάλυση των εικόνων που αποκτώνται με τη βοήθεια των ακτίνων X. Αυτή περιλαμβάνει τις απλές ακτινογραφίες, π.χ. ακτινογραφία θώρακος, τη μαστογραφία, εικόνες που αποκτώνται με ακτινοσκόπηση, π.χ. απεικόνιση του εντέρου με βάριο,

και εικόνες που αποκτώνται με τεχνικές ανακατασκευής στην υπολογιστική τομογραφία (computed tomography, CT). Απεικονιστικές μεθόδους χρησιμοποιεί και η οδοντοακτινολογία. Οι εξετάσεις αυτές εκτελούνται από ακτινολόγους, αλλά και από γενικούς παθολόγους, καρδιολόγους, ορθοπεδικούς χειρουργούς, των οποίων η εκπαίδευση στην ακτινοπροστασία μπορεί να μην είναι τόσο ενδεδειγμένη όσο η αντίστοιχη των ακτινολόγων. Λόγω του μεγάλου αριθμού των διαγνωστικών διαδικασιών με ακτίνες X, ιδιαίτερα στις αναπτυγμένες χώρες, η συλλογική δόση από την πρακτική αυτή είναι αρκετά υψηλή. Η επιτροπή United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

έχει υπολογίσει μια συλλογική δόση, από όλες τις διαγνωστικές εξετάσεις, της τάξεως των 2,5 δισεκατομμυρίων manSv. Στην πραγματικότητα, όμως, οι νέοι άνθρωποι δεν έχουν ανάγκη από πολλές ακτινογραφίες, και η πιθανότητα να απαιτείται μια εξέταση ακτίνων X αυξάνεται με την ηλικία. Αυτό συνεπάγεται ότι, σε γενικές γραμμές, το ανωτέρω αποτέλεσμα είναι υπερτιμημένο.

Η χρήση της **υπολογιστικής τομογραφίας (CT)** έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια σε σημείο που, περίπου 5 % του συνόλου των διαδικασιών σε διαγνωστική ακτινολογία στις αναπτυγμένες χώρες, να είναι αξονική τομογραφία. Με την τεχνική αυτή, μια δέσμη ακτίνων X σε σχήμα βεντάλιας περιστρέφεται γύρω από τον ασθενή, και η εξερχόμενη ακτινοβολία καταγράφεται από μια σειρά ανιχνευτών τοποθετημένων στην αντίθετη πλευρά του εξεταζόμενου. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια ισχυρού υπολογιστή, ανακατασκευάζεται η εικόνα μιας τομής του σώματος του ασθενούς και μεταφέρει πολύτιμες διαγνωστικές πληροφορίες στην οθόνη του χρήστη. Ωστόσο, οι δόσεις από εικόνες CT μπορεί να είναι κατά μία τάξη μεγέθους ή και περισσότερο υψηλότερες από εκείνες των συμβατικών εξετάσεων με ακτίνες X.

Οι εξετάσεις CT αποτελούν σημαντικό παράγοντα της συλλογικής δόσης από την ιατρική διάγνωση και σε ορισμένες χώρες η συμβολή τους είναι πάνω από 40 % του συνόλου. Οι εξετάσεις του κατώτερου τμήματος του εντέρου συνεισφέρουν περίπου το 10 % της ολικής συλλογικής δόσης και οι εξετάσεις του θώρακα περίπου 1 %. Από τα στοιχεία αυτά γίνεται σαφές ότι ορισμένες σχετικά σπάνιες διαδικασίες μπορεί να δώσουν μια πολύ μεγαλύτερη δόση στον πληθυσμό από όσο οι πιο συνηθισμένες εξετάσεις. Αυτός είναι ο λόγος που μια αξονική τομογραφία δε χρησιμοποιείται, όταν μια απλή ακτινογραφία θα αρκούσε για μια καλή διάγνωση (International Atomic Energy Agency, 2003).

Οι διαγνωστικές εξετάσεις, ωστόσο, που δίνουν την υψηλότερη δόση, είναι της **επεμβατικής ακτινολογίας**. Επεμβατική είναι η διαδικασία κατά την οποία ένας γιατρός χρησιμοποιεί μια σειρά από ακτινογραφίες του σώματος του ασθενούς, ώστε να «βλέπει» το εσωτερικό του ασθενή σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτρέπει να εκτελεσθεί μια απλή επέμβαση σε εσωτερικό όργανο του σώματος, αποφεύγοντας τη βαρύτερη χειρουργική επέμβαση για πρόσβαση στο όργανο. Ωστόσο, οι διαδικασίες αυτές μπορεί να δώσουν δόσεις στον ασθενή στην περιοχή των 10 mSv-100 mSv και, αν δεν δοθεί η ανάλογη προσοχή, μπορούν να οδηγήσουν σε παρομοίως υψηλές δόσεις στους επεμβατικούς χειρουργούς. Έχουν παρατηρηθεί περιπτώσεις στις οποίες η δόση ήταν αρκετά υψηλή, ώστε να προκαλέσει καθοριστικό (deterministic) αποτελέσματα στον ασθενή.

Για μια διαγνωστική διαδικασία στην **πυρηνική ιατρική**, χορηγείται στον ασθενή ένα ραδιοϊσότοπο σε μια φέρουσα ουσία, όπως ένα φάρμακο, το οποίο, κατά προτίμηση, προσλαμβάνεται από τον υπό μελέτη ιστό ή όργανο. Η χορήγηση μπορεί να είναι με ένεση, κατάποση ή εισπνοή. Το ραδιοφάρμακο, δηλαδή η ουσία με το ραδιενεργό υλικό, κατανέμεται στο σώμα ανάλογα με τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του. Το ραδιοϊσότοπο εκπέμπει ακτίνες γ και η εικόνα που σχηματίζεται καλείται σπινθηρογράφημα.

Οι περισσότερες από τις διαγνωστικές διαδικασίες κάνουν χρήση του ραδιοϊσοτόπου Τεχνήτιο-99m, που έχει χρόνο ημιζωής 6 ώρες, εκλύει ακτίνες γ με ενέργεια 0,14 MeV, μπορεί να παρασκευαστεί σχετικά εύκολα στο νοσοκομείο, και έχει τη δυνατότητα να προσκολληθεί σε ποικιλία ουσιών-φορέων. Ένας ειδικός ανιχνευτής, που ονομάζεται γ-κάμερα, χρησιμοποιείται, για να απεικονίσει τη δομή και λειτουργία οργάνων ή ιστών, ή την ταχύτητα συγκέντρωσης και διάχυσης του ραδιοφαρμάκου. Μερικές φορές ραδιοφάρμακα χορηγούνται, για να θεραπεύσουν ασθένειες, όπως η υπερθυρεοειδισμός και ο καρκίνος θυρεοειδούς. Στην σύγχρονη Πυρηνική Ιατρική παρατηρείται μια τάση αύξησης των θεραπευτικών εφαρμογών.

Η δόση από σπινθηρογράφημα με τεχνήτιο είναι συγκρίσιμη με την αντίστοιχη στη διαγνωστική ακτινολογία. Η συλλογική δόση από την πυρηνική ιατρική είναι, ωστόσο, κατά περισσότερο από μία τάξη μεγέθους, κατώτερη, διότι ο αριθμός των εξετάσεων είναι πολύ χαμηλότερος (International Atomic Energy Agency, 2003).

Όταν ραδιοϊσότοπα χρησιμοποιούνται για θεραπεία, χορηγούνται στον ασθενή πολύ μεγαλύτερες ποσότητες ραδιοφαρμάκου, και επομένως πολύ υψηλότερες δόσεις ακτινοβολίας δίνονται στους ιστούς ή τα όργανα στόχους. Η θεραπεία του υπερδραστικού θυρεοειδούς αδένου - υπερθυρεοειδισμός - είναι ίσως η πιο διαδεδομένη θεραπευτική διαδικασία, και το ραδιοϊσότοπο που χρησιμοποιείται είναι το ιώδιο-131. Αν και τα

ραδιοϊσότοπα που χρησιμοποιούνται για τις διαδικασίες αυτές έχουν σύντομη ημιζωή, το ιατρικό προσωπικό πρέπει να λαμβάνει υπόψη του το γεγονός ότι το ραδιοφάρμακο παραμένει ενεργό στο σώμα του ασθενούς για κάποιο χρονικό διάστημα μετά τη διαδικασία. Ειδικά μετά από θεραπευτικές διαδικασίες, πρέπει να γίνουν υπολογισμοί της ενεργότητας του φαρμάκου, πριν αποφασισθεί το πότε θα δοθεί το εξιτήριο από το νοσοκομείο. Οικογένεια και φίλοι του ασθενούς πρέπει, επίσης, να ενημερώνονται από το νοσοκομείο και να λαμβάνουν τα κατάλληλα προληπτικά μέτρα κατά της ακούσιας έκθεσής τους σε τυχόν υπολειμματική ραδιενέργεια.

Η τεχνική της **ακτινοθεραπείας** χρησιμοποιείται, για να θεραπεύσει καρκίνους, ή τουλάχιστον να ανακουφίσει τα πλέον οδυνηρά συμπτώματα, σκοτώνοντας τα καρκινικά κύτταρα. Μια δέσμη ακτίνων Χ υψηλής ενέργειας, ή ακτίνες γ ή ακτίνες ηλεκτρονίων (όπως από πηγή κοβαλτίου 60 ή από πηγή υψηλού δυναμικού όπως ο γραμμικός επιταχυντής) κατευθύνεται προς τον προσβεβλημένο ιστό, έτσι ώστε να του δώσει μια υψηλή δόση ακτινοβολίας, ενώ διαφυλάσσει, κατά το δυνατόν, τον περιβάλλοντα υγιή ιστό. Αν ένας κακοήθης όγκος είναι βαθιά μέσα στο σώμα, η δέσμη στοχεύει σε αυτόν από διάφορες κατευθύνσεις, έτσι ώστε να μειωθεί η βλάβη στα υγιή κύτταρα. Μία άλλη μορφή θεραπείας, στην οποία μία πηγή ακτινοβολίας τοποθετείται εντός ή επί του σώματος για ένα συγκεκριμένο, κατά περίπτωση, χρονικό διάστημα, χρησιμοποιείται για ορισμένες μορφές καρκίνου: ονομάζεται βραχυθεραπεία. Οι δόσεις ακτινοθεραπείας είναι ισχυρές και η θεραπεία χρησιμοποιείται μόνο, όταν η προοπτική για μια θεραπεία ή ανακούφιση είναι καλή και όταν οι άλλες μέθοδοι θεραπείας θα ήταν λιγότερο αποτελεσματικές.

Αν και η ακτινοθεραπεία μπορεί να θεραπεύσει τον αρχικό καρκίνο, μπορεί ενδεχομένως να προκαλέσει καρκίνο σε άλλους ιστούς ή δυσμενείς κληρονομικές επιδράσεις στις επόμενες γενιές. Ωστόσο, οι περισσότεροι άνθρωποι που υφίστανται ακτινοθεραπεία, έχουν υπερβεί την αναπαραγωγική ηλικία και είναι αρκετά ηλικιωμένοι, για να τους εμφανιστεί καθυστερημένος καρκίνος. Έτσι ο στόχος της ακτινοθεραπείας είναι η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της θεραπείας, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τις δυσμενείς παρενέργειες.

Οι όγκοι απαιτούν να απορροφηθεί δόση δεκάδων Gray (Gy), για να θανατωθούν αποτελεσματικά τα καρκινικά κύτταρα. Καθορισμένη δόση σε ιστούς είναι τυπικά στην περιοχή των 20-60 Gy. Σημαντική προσοχή απαιτείται, για να αποδοθεί η δόση με ακρίβεια, γιατί πολύ χαμηλή, ή πολύ υψηλή, δόση μπορεί να οδηγήσει σε ατελή θεραπεία ή σε ανεπιθύμητες παρενέργειες. Απαιτούνται αυστηρές διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας, για να εξασφαλισθεί ότι ο εξοπλισμός έχει ρυθμιστεί και συντηρηθεί σωστά. Αν δεν γίνει αυτό, οι συνέπειες μπορεί να είναι σοβαρές. Μια λανθασμένη δέσμη ακτινοθεραπείας στην Κόστα Ρίκα το 1996 είχε ως αποτέλεσμα περισσότεροι από 100 ασθενείς να λάβουν υψηλότερη δόση από όση έπρεπε και, σε πολλές περιπτώσεις, τους οδήγησε σε θάνατο ή σοβαρό τραυματισμό. Το 2001 στον Παναμά, ανακαλύφθηκε ότι υπήρχε πρόβλημα με την εισαγωγή δεδομένων στο σύστημα σχεδιασμού θεραπείας, γεγονός που προκάλεσε υπερέκθεση σε 28 ασθενείς, αρκετοί από τους οποίους έχασαν τελικά τη ζωή τους (International Atomic Energy Agency, 2003).

4.2.2. Πυρηνικές δοκιμές

Η κατασκευή των πυρηνικών οπλικών συστημάτων κατά την τελευταία πενήνταετία είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων πηγών έκθεσης του ανθρώπου σε ακτινοβολία. Η έκθεση αυτή προκύπτει σαν αποτέλεσμα δοκιμών των πυρηνικών οπλικών συστημάτων. Η συλλογική ενεργός δόση έχει εκτιμηθεί σε 3×10^7 manSv (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993), τιμή που αντιστοιχεί σε έκθεση τριών περίπου χρόνων σε φυσικές πηγές ακτινοβολίας.

Όταν τα πυρηνικά όπλα δοκιμάζονται σε επίγειες τοποθεσίες, προωθούνται στην ανώτερη ατμόσφαιρα μια ποικιλία ραδιονουκλιδίων από το υδρογόνο-3 (τριτίου) ως το πλουτόνιο-241. Από εκεί, τα ραδιοϊσότοπα μεταφέρονται αργά, αλλά σταθερά, προς την κατώτερη ατμόσφαιρα και, στη συνέχεια, στην επιφάνεια της Γης. Στην ατμόσφαιρα έγιναν περίπου 500 εκρήξεις, πριν από τον περιορισμό των δοκιμών με τη συνθήκη απαγόρευσης, που τέθηκε σε ισχύ το 1963, και λίγες περισσότερες ακολούθησαν μέχρι το 1980. Οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα, τη βροχή και τη διατροφή του ανθρώπου είναι πλέον πολύ χαμηλότερες από τις τιμές κορυφής, που παρουσιάστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1960 (International Atomic Energy Agency, 2003).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, τα πιο σημαντικά ραδιοϊσότοπα που εκλύθηκαν από τις πυρηνικές δοκιμές, από την άποψη της έκθεσης του ανθρώπου, είναι ο άνθρακας-14, το στρόντιο-90 και το καίσιο-137. Πολύ μικρές ποσότητες από αυτά προσλαμβάνονται με την τροφή και το ποτό. Μια σε μικρό βαθμό έκθεση του ανθρώπου προκαλείται, επίσης, από την υπολείπουσα στο έδαφος δραστηριότητα των ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν ακτίνες γ. Εσωτερική και εξωτερική ακτινοβολία συνεισφέρουν περίπου το ίδιο στον παγκόσμιο

μέσο όρο ενεργού δόσης, της τάξης των 0,005 mSv ανά έτος. Αυτό δε θα μπορούσε να συγκριθεί με τη μέγιστη τιμή των 0,1 mSv που εμφανίστηκε το 1963. Έχουν εντοπιστεί ορισμένες ομάδες ανθρώπων που έχουν δεχθεί από την παγκόσμια ραδιενεργό τέφρα σημαντικά υψηλότερες δόσεις από το μέσο όρο. Για παράδειγμα, στη δεκαετία του 1960 βρέθηκαν κτηνοτρόφοι ταρανδών της Βόρειας Ευρώπης και του Καναδά που έλαβαν σημαντικά υψηλότερες δόσεις από τους άλλους ανθρώπους, επειδή τρώνε το κρέας ζώων που τρέφονται με λειχήνες, οι οποίες είναι ένας πολύ αποτελεσματικός απορροφητής του αερομεταφερόμενου καϊσίου-137. Η παγκόσμια συλλογική ενεργός δόση από το ραδιενεργό νέφος, που δημιουργούν οι δοκιμές πυρηνικών όπλων, είναι τώρα περίπου 30000 manSv ετησίως, υποθέτοντας ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός είναι 6 δισεκατομμύρια.

Αν και τώρα τα ραδιενεργά κατάλοιπα στο περιβάλλον ελέγχονται αυστηρά στις περισσότερες χώρες, στο παρελθόν ο έλεγχος δε γινόταν, όπως θα έπρεπε. Ειδικότερα ορισμένες στρατιωτικές εγκαταστάσεις που λειτουργούσαν κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου υιοθετούσαν απαράδεκτες, για μια σύγχρονη στρατιωτική εγκατάσταση, μεθόδους διαχείρισης των αποβλήτων. Αποτέλεσμα τέτοιου είδους λειτουργίας είναι το παράδειγμα της εγκατάστασης Mayak κοντά στο Chelyabinsk στη Ρωσική Ομοσπονδία, όπου η περιοχή γύρω από το εργοστάσιο, και κατά μήκος του ποταμού Techa, έχει πολύ υψηλά επίπεδα ραδιενεργού μόλυνσης. Ορισμένοι κάτοικοι μπορεί να έχουν λάβει πολύ υψηλές δόσεις (μέχρι 1 Sievert ή περισσότερο) στη διάρκεια της ζωής τους.

4.2.3. Πυρηνική ενέργεια

Η χρήση πυρηνικής ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα επιπρόσθετη έκθεση για τον άνθρωπο. Η έκθεση αυτή οφείλεται στην: α) εξόρυξη και εμπλουτισμό μεταλλεύματος, β) κατασκευή καυσίμου πυρηνικών αντιδραστήρων (ράβδοι καυσίμου), γ) παραγωγή ενέργειας στον αντιδραστήρα, δ) αναπαραγωγή και ανακύκλωση καυσίμου και ε) μεταφορά και διαχείριση αποβλήτων. Σε κάθε ένα από τα παραπάνω επίπεδα, υπάρχει, συνήθως, έκλυση ισοτόπων στο περιβάλλον. Συνήθως τα ισότοπα αυτά ενδιαφέρουν μόνο σε τοπικό επίπεδο, κοντά στον αντιδραστήρα, μερικά όμως μπορεί να μεταφερθούν, συνεισφέροντας έτσι, ανάλογα με τον φυσικό υποδιπλασιασμό τους, στην παγκόσμια μέση δόση.

Η συλλογική ενεργός δόση ανά μονάδα ισχύος των σταθμών παραγωγή πυρηνικής ενέργειας για τα επόμενα 100 έτη εκτιμάται : α) σε 1,5 man Sv GW⁻¹ από τα απόβλητα ορυχείων, β) 6 man Sv GW⁻¹ από γενικά διασπειρόμενους πυρήνες, γ) 4 man Sv GW⁻¹ από τοπικές εκθέσεις και δ) 12 man Sv GW⁻¹ από επαγγελματικές εκθέσεις (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993). Γενικά η χρήση πυρηνικής ενέργειας επιφέρει μια μέση ετήσια ενεργό δόση μικρότερη του 1μSv, υπάρχουν, όμως, και περιπτώσεις που ένα μικρό μέρος του πληθυσμού δέχεται δόσεις μέχρι και 300 μSv ανά έτος.

Τα ραδιοϊσότοπα τεχνητής προέλευσης που απορρίπτονται στο περιβάλλον από τη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας, των στρατιωτικών και ερευνητικών οργανισμών, των νοσοκομείων και, γενικά, της βιομηχανίας, ονομάζονται **ραδιενεργά κατάλοιπα**. Οι απορρίψεις οποιασδήποτε ποσότητας θα πρέπει να υπόκεινται σε νόμιμο έλεγχο. Πρέπει να εγκρίνονται και να παρακολουθούνται. Οι ιδιοκτήτες ή οι υπεύθυνοι των εγκαταστάσεων από τις οποίες αποβάλλονται τα ραδιοϊσότοπα εκτελούν προγράμματα καταγραφής και παρακολούθησης, όπως κάνουν και οι ρυθμιστικοί οργανισμοί.

Η πυρηνική βιομηχανία δημιουργεί τα περισσότερα ραδιενεργά κατάλοιπα. Σε κάθε στάδιο του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου, αποβάλλεται μια ποικιλία από ραδιοϊσότοπα σε μορφή υγρών, αερίων ή στερεών σωματιδίων. Η φύση της εκροής εξαρτάται από τη συγκεκριμένη λειτουργία ή διαδικασία.

Κάθε χρόνο, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες ηλεκτροπαραγωγής παράγουν περίπου το 20 % της ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Κατά τη συνήθη λειτουργία των πυρηνικών εγκαταστάσεων, η ποσότητα των ραδιενεργών κατάλοιπων είναι χαμηλή και η έκθεση σε αυτά, συνήθως, εκτιμάται με μοντέλα περιβαλλοντικής μεταφοράς. Για όλες τις εργασίες του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης και επεξεργασίας, της παραγωγής καυσίμου, της λειτουργίας του αντιδραστήρα και την επανεπεξεργασία των καυσίμων, η έκθεση, τοπικά, αλλά και στην ευρύτερη περιφέρεια, εκτιμάται από τον οργανισμό United Nations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation ότι είναι περίπου 0,9 man Sv ανά έτος και GigaWatt (GW α). Η σημερινή παγκόσμια παραγωγή πυρηνικής ενέργειας είναι περίπου 250 GW α το χρόνο, και έτσι η συνολική συλλογική δόση από την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας επί ένα έτος, είναι περίπου 200 man Sv. Γενικά, οι μεμονωμένες δόσεις είναι χαμηλές, κάτω του 1 μSv ανά έτος. Ωστόσο ορισμένα άτομα μπορεί να λαμβάνουν υψηλότερες δόσεις,

ανάλογα με το πού ζουν και τι τρώνε. Αυτοί οι άνθρωποι θα πρέπει να υπόκεινται σε περιορισμούς δόσης, με μέγιστη τιμή τα 300 μSv ανά έτος (International Atomic Energy Agency, 2003).

Σε περίπτωση ατυχήματος, όταν υπάρχει σημαντική τοπική ρύπανση, οι τοπικές δόσεις μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από την επιτρεπόμενη δόση. Όπου ενδείκνυται, λαμβάνονται μέτρα για την ελαχιστοποίηση των δόσεων στους ανθρώπους, όπως η δημιουργία ζωνών περιορισμένης πρόσβασης στην περιοχή του Chernobyl. Τέτοια μέτρα μπορεί να μειώσουν ουσιαστικά τόσο την ατομική όσο και τη συλλογική δόση.

Τα κατάλοιπα από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας καυσίμων δίνουν ετήσιες δόσεις στους πιο εκτεθειμένους ανθρώπους - αυτούς που τρώνε τοπικά θαλασσινά - έως και 0,14 mSv κυρίως από ακτινίδες (σειρά χημικών στοιχείων). Παρουσία του στροντίου-90 και άλλων ραδιονουκλιδίων σε ραδιενεργό νέφος, οδηγεί σε ατομικές δόσεις μικρότερες από 0,05 mSv ετησίως κυρίως από την κατανάλωση τοπικού γάλακτος και λαχανικών. Η συλλογική δόση από αερομεταφερόμενα κατάλοιπα, κυρίως λόγω του άνθρακα-14 στα τρόφιμα, είναι περίπου 500 man Sv ετησίως. Η συλλογική δόση από υγρά κατάλοιπα, είναι περίπου 4000 man Sv ετησίως, κυρίως λόγω της παρουσίας του καισίου-137 στα ψάρια.

4.2.4. Πυρηνικά ατυχήματα

Ραδιενεργό υλικό μπορεί να απελευθερωθεί στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος σε εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας (nuclear power plant, NPP). Τα ραδιοϊσότοπα που προκαλούν τη μεγαλύτερη ανησυχία για την ανθρώπινη υγεία είναι το ιώδιο και καίσιο.

Κατά τη διάρκεια της αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, είναι πιθανό να συμβεί ραδιενεργός έκθεση (είτε εσωτερική είτε εξωτερική) των εργαζομένων, των διασωστών και όσων σπεύδουν για βοήθεια. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε δόση ακτινοβολίας αρκετά υψηλή, ώστε να προκαλέσει οξείες επιδράσεις, όπως είναι εγκαύματα του δέρματος ή οξύ σύνδρομο ακτινοβολίας.

Αλλά και κάτοικοι που ζουν σε στενότερη γειτνίαση με το NPP μπορεί να εκτεθούν εξωτερικά στα ραδιοϊσότοπα, που ενυπάρχουν σε σχηματιζόμενο ραδιενεργό νέφος ή εναποτίθενται στο έδαφος. Μπορούν, επίσης, να μολυνθούν με ραδιενεργά σωματίδια που εναποτίθενται στο δέρμα ή τα ρούχα. Εσωτερική μόλυνση μπορεί να συμβεί, εάν τα ραδιοϊσότοπα εισέλθουν στο σώμα με την εισπνοή, την κατάποση ή από μια ανοικτή πληγή.

Ο γενικός πληθυσμός δεν είναι πιθανό να εκτεθεί σε δόσεις αρκετά υψηλές, ώστε να προκαλέσουν οξείες επιδράσεις, αλλά μπορεί να εκτεθεί μακροχρόνια σε χαμηλές δόσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αυξημένο κίνδυνο για μακροπρόθεσμα αποτελέσματα, όπως ο καρκίνος. Η κατανάλωση μολυσμένων τροφίμων και νερού συμβάλλει στη συνολική έκθεση στην ακτινοβολία.

Το ραδιενεργό ιώδιο, όταν απελευθερώνεται στο περιβάλλον και εισέρχεται στο σώμα μέσω της εισπνοής ή της κατάποσης, επικεντρώνεται στο θυρεοειδή αδένα αυξάνοντας τον κίνδυνο του καρκίνου του θυρεοειδούς. Ο κίνδυνος καρκίνου του θυρεοειδούς είναι υψηλότερος στα παιδιά από όσο στους ενήλικες, ιδίως στα παιδιά κάτω των 5 ετών, όπως και εκείνα των οποίων η διατροφή είναι γενικά ανεπαρκής σε ιώδιο.

Η αλματώδης ανάπτυξη της πυρηνικής βιομηχανίας για ενεργειακούς και άλλους σκοπούς, έχει συνοδευτεί από ατυχήματα τόσο μικρής όσο και ευρείας κλίμακας. Τα κυριότερα έχουν συμβεί σε πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και είναι τρία : α) στο Sellafield (πρώην Windscale), το 1957 στην Αγγλία, β) στο Three Mile Island, το 1979 στις ΗΠΑ και γ) στο Chernobyl, το 1986 στην τέως Σοβιετική Ένωση. Η συλλογική ενεργός δόση από το ατύχημα του Sellafield εκτιμήθηκε σε περίπου 1300 man Sv, το 50% της οποίας προκλήθηκε από ακτινοβολία του θυρεοειδούς από ισότοπα ιωδίου. Από το ατύχημα στο Three Mile Island η δόση εκτιμήθηκε σε 15-35 man Sv, κυρίως λόγω του ^{133}Xe . Από το ατύχημα στο Chernobyl η δόση εκτιμήθηκε σε περίπου 60000 man Sv, το 40% των οποίων αφορούν στον πληθυσμό της τέως Σοβιετικής Ένωσης, το 57% στο πληθυσμό της υπόλοιπης Ευρώπης και το υπόλοιπο 3% στον πληθυσμό των υπολοίπων χωρών του βορείου ημισφαιρίου της Γης.

4.2.5. Άλλες πηγές

Εκτός από τις τεχνητές πηγές ακτινοβολίας του ανθρώπου, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, υπάρχουν και άλλες, μικρότερης, όμως, σημασίας. Η μέση ετήσια ενεργός δόση από τις διάφορες πηγές είναι περίπου 10 μSv . Μπορεί να φτάσει όμως και μέχρι 1000 μSv (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993).

4.2.6. Επαγγελματική έκθεση

Ορισμένοι άνθρωποι εκτίθενται επιπρόσθετα σε ακτινοβολία λόγω του επαγγέλματός τους. Αυτοί είναι οι εργαζόμενοι στην πυρηνική βιομηχανία, την πυρηνική ιατρική, την ακτινοθεραπεία και την ακτινοδιαγνωστική, τις βιομηχανίες παρασκευής λιπασμάτων, τα ορυχεία, τις λουτροπηγές καθώς και τα πληρώματα αεροσκαφών. Δεδομένα δόσεων δεν υπάρχουν για όλες τις παραπάνω ομάδες παγκόσμια.

Για τους εργαζόμενους στην πυρηνική βιομηχανία, η επαγγελματική έκθεση έχει σαν αποτέλεσμα μια συλλογική ενεργό δόση της τάξης των 12 man Sv ανά έτος (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993). Η αντίστοιχη δόση στους εργαζόμενους στην πυρηνική ιατρική, στην ακτινοθεραπεία και την ακτινοδιαγνωστική, εκτιμάται σε 1 man Sv ανά 10^6 άτομα (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988). Για τις ανεπτυγμένες χώρες, όπου υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα, εκτιμάται ότι η μέση επαγγελματική έκθεση από ιατρικές εφαρμογές είναι περίπου 1 μ Sv ανά εξέταση (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993). Οι ρυθμοί δόσεων για τα πληρώματα των αεροσκαφών είναι ίδιοι με αυτούς των επιβατών, οι οποίοι, κατάλληλα μετασχηματιζόμενοι, οδηγούν σε μια μέση ετήσια δόση μεταξύ 2-3 mSv ανά έτος (United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993).

Βιβλιογραφία

- Bikit, I., Slivka, J., Conkic, L.J., Krmar, M., Veskovic, M., Zikic-Todorovic, N., Varga, E., Curcic, S., & Mrdja, D. (2005). Radioactivity of the soil in Vojvodina (northern province of Serbia and Montenegro). *Journal of Environmental Radioactivity* 78, 11-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.03.034>.
- Environmental Protection Agency. 2002. *National Priorities List-query on radioactively contaminated sites*. Retrieved from <http://www.epa.gov/>.
- European Commission. 1999. *Pilot study for the update of the MARINA Project on the radiological exposure of the European Community from radioactivity in North European marine waters. Final Report*. Retrieved from <http://europa.eu.int/comm/energy/nuclear>.
- Health Protection Agency, UK. 2001. *Radiological impact on the UK population of industries which use or produce materials containing enhanced levels of naturally occurring radionuclides: Part I: Coal-fired electricity generation*. NRPB-R327. Didcot:Author.
- Health Protection Agency, UK. 2006. *Environmental Radon Newsletter. Issue 46*. Retrieved from http://www.hpa.org.uk/webc/HPAwebFile/HPAweb_C/1194947340127.
- Ibrahim, N. Natural activities of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in building materials. *J. Environ. Radioact.* 43(3): 255-258 (1999).
- International Atomic Energy Agency. (2003). *Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation*. Technical Reports Series No. 419. IAEA, Vienna:Author.
- International Atomic Energy Agency. (2010). *Radiation Overview*. Argonne National Laboratory, USA:Author.
- Jerez Veguería, S.F., Godoy, J.M., & Miekeley, N. (2002). Environmental impact studies of barium and radium discharges by produced waters from the “Bacia de Campos” oil-field offshore platforms, Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity* 62(1), 29-38. [http://dx.doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00148-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00148-5).
- Karangelos, D.J., Petropoulos, N.P., Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., & Simopoulos, S.E. (2004). Radiological characteristics and investigation of the radioactive equilibrium in the ashes produced in lignite-fired power plants. *Journal of Environmental Radioactivity* 77(3), 233-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.03.009>.
- Lauria, D.C., & Rochedo E.R.R. (2005). The legacy of monazite processing in Brazil. *Radiation Protection Dosimetry* 114(4): 546-550. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/nci303>.
- Misdaq, M.A., & Amghar, A. (2005). Radon and thoron emanation from various marble materials: impact on the workers. *Radiation Measurements* 39, 421-430. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2004.06.011>.
- Pantelica, A., Georgescu, I.I., Murariu-Magureanu, M.D., Margaritescu, I. & Cincu, E. (2001). Thorium determination in intercomparison samples and in some Romanian building materials by gamma ray spectrometry. *Radiation Protection Dosimetry* 97(2): 187-191. <http://dx.doi.org/10.4236/wjnst.2012.24029>.
- Paschoa, A.S., & Godoy, J.M. (2002). The areas of high natural radioactivity and TENORM wastes. In W. Burkart, M. Sohrabi, & A. Bayer (Eds). *High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects*. International Congress Series 1225. Elsevier:Amsterdam.
- Pires do Rio, M.A., Amaral, E.C., Fernandes, H.M., & Rochedo, E.R.R. (2002). Environmental radiological impact associated with non-uranium mining industries: a proposal for screening criteria. *Journal of Environmental Radioactivity* 59(1): 1-17. [http://dx.doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00023-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00023-6).

- Stoulos, S., Manolopoulou, M. & Papastefanou, C. (2003). Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity* 69, 225–240. [http://dx.doi.org/10.1016/S0265-931X\(03\)00081-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0265-931X(03)00081-X).
- United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (1993). *Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes*. 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations sales publication E.94.IX.2. New York:Author.
- United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2008). *Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with scientific annexes*. United Nations sales publication E.10.XI.3. New York:Author.
- Vandenhove, H. European sites contaminated by residues from the ore extracting and processing industries. p. 61-89 in: *Restoration of Environments with Radioactive Residues. Proceedings Series. STI/PUB/1092*. IAEA, Vienna (2000).
- Vanmarcke, H., Paridaens, J., Froment, P., Van Cauteren, J., & Timmermans, C. (2003). *Overzicht van de NORM problematiek in de Belgische industrie, SCK, NRG and AV-Controloatom report on behalf of ONDRAF/NIRAS, the Belgian agency for radioactive waste*. R-3775, Mol. Brussels:Authors.
- Wymer, D.G., & Botha, J.C.. (2001). *Managing the environmental impacts of low activity wastes from the South African gold mining industry*. Paper presented in Session 51-1 of Eighth International Conference on Environmental Management, Bruges:Belgium.
- World Health Organization. (2015). *Ionizing radiation*. Retrieved from http://www.who.int/ionizing_radiation/about/med_exposure/en/.