



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ  
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

**Ραδιοπεριβαλλοντικές επιπτώσεις από φυσικά  
ραδιενεργά  
υλικά (Naturally Occurring Radioactive Materials, NORM)**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του Μάνθου Φωτόπουλου

Επιβλέπων Καθηγητής : Μ. Ι. ΑΝΑΓΝΩΣΤΑΚΗΣ, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2020



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή είναι βιβλιογραφική και επικεντρώνεται στα Φυσικά Ραδιενεργά Υλικά (Naturally Occurring Radioactive Materials, NORM). Ως υλικά NORM χαρακτηρίζονται τα υλικά εκείνα – πρώτες ύλες, προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών – τα οποία μπορεί να οδηγήσουν στην επαύξηση της ραδιοβιολογικής επιβάρυνσης εργαζομένων ή του κοινού πληθυσμού. Συνήθως, τα υλικά αυτά απαντώνται σε μία σειρά από βιομηχανικές διεργασίες, από την εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών, έως την παραγωγή ενέργειας μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αναδειχθεί τόσο η ραδιοβιολογική σημασία των υλικών αυτών όσο και τα προβλήματα και οι κίνδυνοι που μπορεί να προκύπτουν στις διάφορες φάσεις των αντίστοιχων βιομηχανικών διεργασιών, καθώς και μέτρα προστασίας για εργαζομένους και το κοινό.

Στην εισαγωγή της εργασίας αναλύονται μία σειρά από έννοιες σχετικές με τη ραδιενέργεια, τα υλικά NORM, τα ραδιενεργά ισότοπα που περιέχουν, την προέλευσή τους και τις διάφορες κατηγορίες τους και εισάγονται τα βασικά δοσιμετρικά μεγέθη. Γίνεται αναφορά σε μεθόδους προσδιορισμού της ραδιενέργειάς των υλικών και δίνονται τα απαραίτητα στοιχεία δοσιμετρίας για την αξιολόγηση του κινδύνου εξαιτίας των υλικών. Η εργασία επικεντρώνεται στις παρακάτω βιομηχανικές διεργασίες: εξόρυξη και καύση λιγνίτη, εξόρυξη και επεξεργασία βωξίτη για την παρασκευή αλουμινίου, βιομηχανία φωσφορικών λιπασμάτων και οικοδομική βιομηχανία. Για κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις παρουσιάζονται, αναλύονται και σχολιάζονται δημοσιευμένες ερευνητικές εργασίες. Τέλος παρουσιάζεται η σχετική νομοθεσία και κανονισμοί για την προστασία του κοινού και των εργαζομένων.

## **ABSTRACT**

This work focuses on Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM). NORM materials are those materials - raw materials, products or by-products of industrial processes - that can result to an elevated dose to workers or the public, compared to the unaltered state. These materials are usually found in a wide variety of industrial processes, from the extraction and processing of raw materials, to the generation of energy through the combustion of fossil fuels.

The purpose of this work is to highlight both the radiological significance of these materials and the problems and risks that may arise at the various stages of the respective industrial processes, as well as the protective measures for workers and the public.

In the beginning of this work a series of concepts related to radioactivity, radioactive isotopes, NORM materials, and relevant dosimetry issues are presented. Reference is made to the methods used for the determination of radionuclides, as well as the evaluation of the radiological significance of materials and the risk posed to workers and the public. The work is then focused on some of the most important processes, from the point of view of their radiological effects, namely: lignite mining and combustion, bauxite mining and processing for the manufacture of aluminum, phosphate fertilizer industry and construction industry. For each one of these processes, published research work is presented, analyzed and commented. Finally, the relevant laws and regulations for the protection of the public and workers are presented.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	1
1.1 Υλικά NORM .....	1
1.2 Φυσικές ραδιενεργές σειρές .....	2
1.4 Στοιχεία από τη δοσιμετρία .....	4
1.5 Μέθοδοι προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων .....	5
1.5.1 Φασματοσκοπία ακτίνων-γ .....	5
1.5.2 Φασματοσκοπία ακτίνων-α.....	6
1.5.3 Μέθοδος μέτρησης ολικής α/β ακτινοβολίας .....	6
1.5.4 Μέθοδος υγρού σπινθηρισμού.....	6
1.5.5 Μετρήσεις ραδονίου .....	6
1.6 Παραγωγή υλικών NORM.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	8
2.1 Εισαγωγή .....	8
2.2 Ραδιοβιολογικές επιπτώσεις από την εξόρυξη και καύση του γαιάνθρακα .....	10
2.2.1 Ραδιοβιολογικές επιπτώσεις από τη λειτουργία του ορυχείου El Maghara στην Αίγυπτο.....	10
2.2.2 Ραδιενεργός ρύπανση των υδάτων από την εξόρυξη άνθρακα στην Πολωνία .....	13
2.2.3 Παράγωγη NORM από την καύση άνθρακα στις Ηνωμένες Πολιτείες .....	15
2.2.4 Παράγωγη NORM από την καύση λιγνίτη στην Ελλάδα.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	28
3.1 Εισαγωγή .....	28
3.2 Αξιολόγηση της ραδιοβιολογικής επιβάρυνσης από την εξόρυξη και επεξεργασία του βωξίτη στην Αυστραλία .....	30
3.3 Μελέτη της ραδιοβιολογικής επιβάρυνσης από το ατύχημα στην εγκατάσταση απόθεσης ερυθράς ιλύος στην περιοχή Αλκα της Ουγγαρίας.....	32
3.4 Επεξεργασία βωξίτη και διαχείριση ερυθράς ιλύος στην Ελλάδα .....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	45
4.1 Εισαγωγή .....	45
4.2 Χρήση ιπτάμενης τέφρας στην παραγωγή τσιμέντου .....	45
4.2.1 Μελέτη ραδιολογικών επιπτώσεων από τη χρήση διαφόρων πρώτων υλών για την παραγωγή τσιμέντου στην Β. Μακεδονία.....	47
4.2.2. Μελέτη της ραδιοβιολογικής επίπτωσης οικοδομικών υλικών από την περιοχή της Πελοποννησού .....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο .....	56

5.1 Εισαγωγή .....	56
5.2 Μελέτη των ραδιοβιολογικών επιπτώσεων από τις αποθέσεις φωσφογύψου στη Huelva της Ισπανίας .....	57
5.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις αποθέσεις φωσφογύψου σε αποκατεστημένο χώρο απόβλητων στην περιοχή Σχιστού (Πειραιάς, Ελλάδα).....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο .....	67
6.1 Εισαγωγή .....	67
6.2 Νομοθεσία.....	68
6.3 Διαχείριση Υλικών NORM.....	69
6.3.1 Μεταφορά NORM .....	71
6.3.2 Επεξεργασία και αποθήκευση NORM.....	71
6.3.3 Απόρριψη NORM.....	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	75
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	78

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Υλικά NORM

Τα ραδιενεργά ισότοπα τα οποία βρίσκονται με φυσικό τρόπο στο περιβάλλον (π.χ. στο έδαφος και στο νερό) μπορούν να διαιρεθούν στα ισότοπα τα οποία είναι γήινης προέλευσης, προέρχονται δηλαδή από το έδαφος και συνδέονται με τη δημιουργία της γης, και σε εκείνα τα οποία παράγονται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας με τα αέρια της ατμόσφαιρας, τα οποία χαρακτηρίζονται ως ισότοπα κοσμική προέλευσης. Τα σημαντικότερα ραδιενεργά ισότοπα γήινης προέλευσης είναι τα ισότοπα της σειράς του ουρανίου με πατρικό πυρήνα το  $^{238}\text{U}$ , τα ισότοπα της σειράς του θορίου με πατρικό πυρήνα το  $^{232}\text{Th}$ , καθώς και το  $^{40}\text{K}$ .

Όλα τα μέταλλα και οι πρώτες ύλες που προέρχονται από το έδαφος περιέχουν – εκτός των άλλων – και ραδιενεργά ισότοπα φυσικής και ειδικότερα γήινης προέλευσης, όπως αυτά των σειρών του ουρανίου και του θορίου, καθώς και όλα τα θυγατρικά τους ισότοπα.

Για τις περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες και βιομηχανικές διεργασίες που αφορούν στην εξόρυξη και επεξεργασία μετάλλων και πρώτων υλών, τα επίπεδα έκθεσης σε αυτά τα ραδιενεργά ισότοπα δεν είναι σημαντικά υψηλότερα από τα φυσιολογικά επίπεδα, όπως π.χ. στο αδιατάρακτο έδαφος, και για το λόγο αυτό δεν θεωρείται ότι έχουν κάποια ιδιαίτερη ραδιοβιολογική σημασία. Υπάρχουν όμως υλικά που παράγονται από ορισμένες ανθρώπινες – κυρίως βιομηχανικές – δραστηριότητες τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά αυξημένη έκθεση του ανθρώπου σε ακτινοβολία, λόγω των ραδιενεργών ισωτόπων που περιέχουν, στο βαθμό που να είναι απαραίτητο να λαμβάνονται μέτρα για την ακτινοπροστασία του. Τα υλικά αυτά έχουν γίνει γνωστά ως φυσικά ραδιενεργά υλικά ή αλλιώς NORM (IAEA, 2013).

Το ακρωνύμιο NORM (**Naturally Occurring Radioactive Material**) καταρχήν θα μπορούσε να περιλαμβάνει κάθε υλικό που περιέχει φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, ωστόσο, ο όρος αυτός χρησιμοποιείται ειδικότερα για όλα τα φυσικά ραδιενεργά υλικά όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν αυξήσει την πιθανότητα έκθεσης του ανθρώπου σε ακτινοβολία, σε σχέση με την αμετάβλητη κατάσταση τους, δηλαδή πριν την ανθρώπινη παρέμβαση. Στην περίπτωση αυτή η αρχική ραδιενέργεια των υλικών ενδέχεται να έχει αυξηθεί, χωρίς όμως αυτό να είναι και απαραίτητο.

Στο σημείο αυτό έχει σημασία να αναφερθεί άλλη μία κατηγορία υλικών που σχετίζεται με τα υλικά NORM. Πρόκειται για τα υλικά TENORM (**Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material**). Ως TENORM ορίζονται τα υλικά NORM στα οποία, λόγω της ανθρώπινης παρέμβασης έχει αυξηθεί και η φυσική τους ραδιενέργεια, σε σχέση με την αρχική κατάσταση.

Πρόκειται δηλαδή για μία υποκατηγορία των υλικών NORM, όπου δεν έχει απλώς αυξηθεί η πιθανότητα έκθεσης του ανθρώπου, αλλά έχει επιπλέον αυξηθεί και η ίδια η ραδιενέργεια του υλικού. Πάντως, ο όρος TENORM σήμερα χρησιμοποιείται όλο και λιγότερο, ενώ χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά ο όρος NORM.

Τα ραδιενεργά ισότοπα τα οποία συνήθως ενδιαφέρουν στα υλικά NORM δεν είναι άλλα από τα κυριότερα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα γήινης προέλευσης, δηλαδή το  $^{40}\text{K}$  και τα ισότοπα των φυσικών ραδιενεργών σειρών του  $^{238}\text{U}$  και του  $^{232}\text{Th}$ . Το  $^{40}\text{K}$  είναι το μόνο φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του φυσικού καλίου, το οποίο είναι το έβδομο πιο άφθονο στοιχείο στο φλοιό της Γης και για το λόγο αυτό και η ραδιενέργεια του  $^{40}\text{K}$  στο έδαφος είναι αξιόλογη. Η ραδιενέργεια του  $^{40}\text{K}$  στα επιφανειακά εδάφη παρουσιάζει μεγάλη κύμανση και είναι συνήθως μερικές εκατοντάδες Bq/kg.

## 1.2 Φυσικές ραδιενεργές σειρές

Μία ραδιενεργός σειρά αποτελείται από μία σειρά ραδιενεργών ισοτόπων, καθένα των οποίων παράγεται από τη διάσπαση του προηγούμενου του στη σειρά, ενώ κατά τη διάσπασή του παράγεται το επόμενο. Εξαιρέση αποτελούν το πρώτο και το τελευταίο ισότοπο της σειράς τα οποία μόνο καταναλώνονται και μόνο παράγονται αντίστοιχα. Ο πρώτος πυρήνας μίας ραδιενεργού σειράς ονομάζεται και πατρικός πυρήνας, καθώς όλοι οι υπόλοιποι προέρχονται από τη διάσπασή του και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού πολύ υψηλότερο όλων των υπολοίπων ισοτόπων. Υπάρχουν τρεις φυσικές ραδιενεργές σειρές:

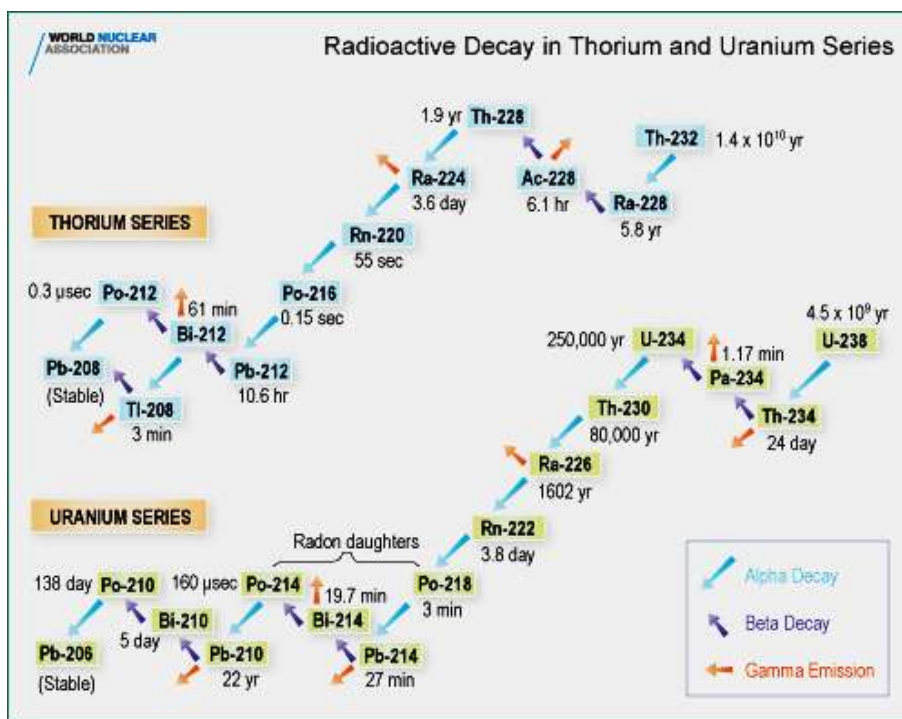
- Η σειρά του ουρανίου με πατρικό πυρήνα το  $^{238}\text{U}$
- Η σειρά του θορίου με πατρικό πυρήνα το  $^{232}\text{Th}$
- Η σειρά του ακτινίου με πατρικό πυρήνα το  $^{235}\text{U}$

Καθώς για το φυσικό ουράνιο η ραδιενέργεια του  $^{238}\text{U}$  είναι πολύ υψηλότερη (περίπου 21 φορές) από αυτήν του  $^{235}\text{U}$ , η ραδιενέργεια του τελευταίου στα υλικά NORM συνήθως δεν απασχολεί και για το λόγο αυτό συνήθως δεν προσδιορίζεται. Στο παρακάτω σχήμα 1.1 που ακολουθεί παρατίθενται οι ραδιενεργές σειρές του θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ) και του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ).

Ένα ισότοπο που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα υλικά NORM είναι το  $^{222}\text{Rn}$  γνωστό απλά και ως ραδόνιο. Το ραδόνιο είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ευγενές αέριο, άχρωμο, άοσμο και άγευστο, το οποίο προέρχεται από τη διάσπαση του ραδίου ( $^{226}\text{Ra}$ ) της σειράς του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ). Η επικινδυνότητα του οφείλεται κυρίως στα άμεσα θυγατρικά του, τα οποία είναι ραδιενεργά ισότοπα με μικρό χρόνο ημιζωής που προσκολλώνται στα σωματίδια του αεροζόλ που βρίσκονται στον αέρα, με αποτέλεσμα να εισπνέονται και ακτινοβολούν τους ιστούς του πνεύμονα με σωματίδια-α και -β, αυξάνοντας το κίνδυνο για καρκίνο του πνεύμονα. Η μέση ετήσια δόση από τα θυγατρικά του ραδονίου παγκοσμίως εκτιμάται ότι είναι περίπου 1.2 mSv (σχεδόν το 50% της συνολικής ετήσιας δόσης). Υπάρχουν, εντούτοις, σημαντικές διαφοροποιήσεις από χώρα σε χώρα και από περιοχή σε περιοχή. Το ραδόνιο που βρίσκεται στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών προέρχεται από τα οικοδομικά υλικά και από το υπέδαφος, οπότε εισέρχεται στην κατοικία μέσω ανοιγμάτων για διέλευση σωληνώσεων και αγωγών ή ρωγμών του κτιρίου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση του ραδονίου στον



εσωτερικό χώρο ενός κτιρίου είναι αρκετοί, όπως ο ρυθμός εκροής του από το έδαφος και τα οικοδομικά υλικά, το είδος θεμελίωσης και το ύψος της οικοδομής, καθώς και ο εξαερισμός του.



Σχήμα 1.1. Οι ραδιενεργές σειρές του  $^{238}\text{U}$  και του  $^{232}\text{Th}$

Ένα άλλο ισότοπο του ραδονίου το οποίο παράγεται από τη διάσπαση του  $^{224}\text{Ra}$  της σειράς του  $^{232}\text{Th}$  είναι το  $^{220}\text{Rn}$  γνωστό και ως θορόνιο. Λόγω του πολύ χαμηλού χρόνου ημίσειας ζωής του, δεν εκρέει με ευκολία από τα διάφορα υλικά και για το λόγο αυτό συχνά δεν αξιολογείται σε δοσιμετρικούς υπολογισμούς.

### 1.3 Κατηγορίες υλικών NORM

Σε ορισμένες βιομηχανικές διεργασίες, όπως είναι η εξόρυξη και κυρίως η επεξεργασία των πρώτων υλών, η συγκέντρωση των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στα προϊόντα ή παραπροϊόντα μπορεί να αυξάνεται σημαντικά. Για το λόγο αυτό τα υλικά NORM κατατάσσονται σε δύο ομάδες (García-Tenorio R., et al., 2015):

- **Ομάδα A** (Group A Residues): Υλικά που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες και συνήθως περιέχουν μέτρια ή χαμηλά επίπεδα ραδιενεργών ισοτόπων (εν γένει κάτω από 10 Bq/g), και
- **Ομάδα B** (Group B Residues): Υλικά που παράγονται σε μικρές ποσότητες και συνήθως περιέχουν υψηλά επίπεδα ραδιενεργών ισοτόπων (εν γένει 10–10<sup>3</sup> Bq/g).

Ορισμένα υλικά που κατατάσσονται στην Ομάδα A είναι:

- ο φωσφογύψος που παράγεται κατά την παραγωγή στοιχειακού φωσφόρου, φωσφορικού οξέος και φωσφορικών λιπασμάτων,

- οι τέφρες που παράγονται σε θερμικούς σταθμούς κατά την καύση στερεών ορυκτών καυσίμων,
- η ερυθρά ιλύς που παράγεται κατά την επεξεργασία βωξίτη και παραγωγή αλουμινίου.

Τα υλικά της ομάδας Α συνήθως μπορούν να απελευθερώνονται στο περιβάλλον ακολουθώντας διάφορες διαδικασίες (π.χ. απλή απόθεση, διάλυση κλπ).

Τυπικά υλικά που συνήθως κατατάσσονται στην Ομάδα Β είναι:

- σκωρία (scale) πλούσια σε άλατα του ραδίου που παράγεται κατά την εξόρυξη πετρελαίου,
- λάσπη (sludge) που αποτίθεται σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες, όπως στον διαχωρισμό του πετρελαίου από το νερό και το φυσικό αέριο αμέσως μετά την εξόρυξη
- φίλτρα που χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες, όπως φίλτρα κατά την επεξεργασία νερού ή φίλτρα αέρα.

Λόγω των χαρακτηριστικών των υλικών της ομάδας Β και των επιπέδων της ραδιενέργειας τους, αυτά σε ορισμένες περιπτώσεις πρέπει να αντιμετωπίζονται ως low-level radioactive waste.

#### 1.4 Στοιχεία από τη δοσιμετρία

Τα επίπεδα της ραδιενέργειας των υλικών NORM τυπικά εκφράζονται συνήθως σε όρους ειδικής ραδιενέργειας, δηλαδή Becquerel ανά χιλιόγραμμο (Bq/kg) ενός συγκεκριμένου ισότοπου. Εναλλακτικά, σε ορισμένες περιπτώσεις η ραδιενέργεια ενός ισότοπου εκφράζεται έμμεσα μέσω της συγκέντρωσης του αντίστοιχου στοιχείου σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm).

Παρόλα αυτά, τα επίπεδα της ραδιενέργειας ενός ραδιενεργού ισότοπου σε ένα υλικό δεν είναι ένα μέγεθος επαρκές από μόνο του για την έκφραση της ραδιοβιολογικής επίπτωσης από την έκθεση του ανθρώπου στην ακτινοβολία που εκπέμπει το υλικό αυτό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το είδος και η ενέργεια της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μία ραδιενεργό διάσπαση εξαρτάται σημαντικά από το είδος του πυρήνα που διασπάται. Για παράδειγμα, κατά τη διάσπαση  $^{222}\text{Rn}$ , εκπέμπεται ακτινοβολία-α, κατά τη διάσπαση του  $^{226}\text{Ra}$  εκπέμπεται ακτινοβολία-α και ακτινοβολία-γ, κατά τη διάσπαση του  $^{14}\text{C}$  εκπέμπεται μόνο ακτινοβολία-β και κατά τη διάσπαση  $^{137}\text{Cs}$  ακτινοβολία-β και ακτινοβολία-γ. Επιπλέον, σε κάθε περίπτωση η ενέργεια της αντίστοιχης ακτινοβολίας εξαρτάται από το ισότοπο που την εκπέμπει. Τέλος, μεγάλη σημασία έχει η οδός έκθεσης λόγω του ισότοπου (εξωτερική ακτινοβολία, εισπνοή, κατάποση κλπ).

Η ραδιοβιολογική επίπτωση από την έκθεση στην ακτινοβολία ραδιενεργών ισότοπων εκφράζεται μέσω δοσιμετρικών μεγεθών, όπως η **Απορροφώμενη δόση** (absorbed dose), η οποία αντιστοιχεί στην ανά μονάδα μάζας ιστού απορροφώμενη ενέργεια, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας που εκπέμπει το αντίστοιχο ραδιενεργό ισότοπο με τον ιστό (Λεωνίδου Δ., 1987). Για την απορροφώμενη δόση χρησιμοποιούνται οι μονάδες rad (παλαιότερα) και Gray, όπου:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J/kg}$$

Ένα άλλο δοσιμετρικό μέγεθος που χρησιμοποιείται συχνά είναι η την **Ισοδύναμη δόση** (Dose Equivalent), με μονάδα το rem (παλαιότερα) και το Sievert ( $1\text{Sv} = 100\text{rem}$ ). Η ισοδύναμη δόση οποία λαμβάνει υπόψη, όχι μόνο την ενέργεια που αποτίθεται στον ιστό από την ακτινοβολία αλλά και το είδος της ακτινοβολίας, μέσω της χρήσης κατάλληλων συντελεστών για κάθε είδος ακτινοβολίας. Για την ακτινοβολία-β και ακτινοβολία-γ ο συντελεστής αυτός είναι ίσος με την μονάδα και στην περίπτωση αυτή 1 Sv αντιστοιχεί σε 1 Gy.

Πάντως, πρέπει να επισημανθεί στο σημείο αυτό ότι η δόση στην οποία εκτίθεται ένας άνθρωπος λόγω μία ραδιενεργού πηγής εξαρτάται σημαντικά και από άλλες παραμέτρους όπως η απόσταση από την πηγή, η διάρκεια έκθεσης, η ύπαρξη θωράκισης κλπ.

Ένα δοσιμετρικό μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται για να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ακτινοβολίας στα διάφορα όργανα του ανθρώπου, τα οποία και έχουν διαφορετική ευαισθησία, είναι η **Ενεργός δόση** (Effective Dose), η οποία υπολογίζεται από την ισοδύναμη δόση σε κάθε όργανο ή ιστό που ακτινοβολείται, μέσω κατάλληλου συντελεστή στάθμισης για κάθε όργανο.

Τέλος, προκειμένου να εκτιμηθεί η ραδιοβιολογική επιβάρυνση λόγω της εισπνοής του ραδονίου και των θυγατρικών του χρησιμοποιείται η μονάδα Working Level (WL) που αντιστοιχεί στη συνολική ενέργεια των σωματιδίων-α που εκπέμπονται από τη διάσπαση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου σε ισορροπία με  $3.700\text{Bq/m}^3$  ( $100\text{pCi/L}$ ) ραδονίου ανά λίτρο αέρα. Η μονάδα αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για μετρήσεις σε περιβάλλον ορυχείου. Βάσει αυτής της μονάδας υπολογίζεται το μέγεθος WLM (Working Level Month) που αφορά σε έκθεση ενός εργαζομένου σε επίπεδο 1WL για έναν μήνα (170 εργάσιμες ώρες).

## 1.5 Μέθοδοι προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων

Για τον προσδιορισμό των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχονται στα πάσης φύσεως υλικά, άρα και στα υλικά NORM, χρησιμοποιούνται μία σειρά από τεχνικές, ανάλογα από την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα ισότοπα ενδιαφέροντος και από τη φύση του υλικού.

### 1.5.1 Φασματοσκοπία ακτίνων-γ

Η μέθοδος της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης χρησιμοποιείται για τον ποιοτικό προσδιορισμό και τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιενεργών ισοτόπων που εκπέμπουν ακτινοβολία-γ σε διάφορους τύπους δειγμάτων, συμπεριλαμβανομένων και των περιβαλλοντικών, όπως: δείγματα τροφίμων, χώματος, οικοδομικών υλικών, στερεών υπολειμμάτων βιομηχανικών διεργασιών όπως τα NORM, φίλτρων αέρα, νερών, ιζημάτων ποταμών κλπ.

Η μέτρηση γίνεται σε ανιχνευτικές διατάξεις υψηλής διακριτικής ικανότητας και χαμηλού υποστρώματος, συνήθως με ανιχνευτές γερμανίου (HPGe), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό θωράκισης μολύβδου, έτσι ώστε να μειώνεται η επίδραση της ακτινοβολίας του περιβάλλοντος. Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση επιτρέπει τον ταυτόχρονο προσδιορισμό πλήθους φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων, όπως  $^{40}\text{K}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  κλπ. Η μέθοδος δεν είναι καταστροφική για το δείγμα, απαιτεί ελάχιστη ή και καθόλου προετοιμασία και επιτυγχάνει αρκετά χαμηλά επίπεδα ανίχνευσης. Για όλους τους παραπάνω λόγους είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνική για τον ποιοτικό και

ποσοτικό προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων. Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι για την περίπτωση των NORM τα οποία συχνά παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα συχνά η γ-φασματοσκοπική ανάλυση ενδέχεται να παρουσιάζει ιδιαιτερότητες, όπως ισχυρή αυτοαπορρόφηση των φωτονίων μέσα στο υλικό του δείγματος.

### 1.5.2 Φασματοσκοπία ακτίνων-α

Η μέθοδος βασίζεται στην εκμετάλλευση του φάσματος των ακτίνων-α που εκπέμπει το προς ανάλυση δείγμα, για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των περιεχομένων ισοτόπων. Απαιτείται προηγούμενη ραδιοχημική προετοιμασία δείγματος η οποία είναι πολύπλοκη και χρονοβόρος, αλλά επιτυγχάνονται πολύ χαμηλά επίπεδα ανίχνευσης. Η μέθοδος δεν ενδείκνυται για την ανάλυση μεγάλου όγκου δειγμάτων.

### 1.5.3 Μέθοδος μέτρησης ολικής α/β ακτινοβολίας

Η μέθοδος αυτή οδηγεί στην εκτίμηση της συνολικής ακτινοβολίας τύπου α και β (counts per second, cps) που εκπέμπεται από ένα δείγμα, χωρίς να προσδιορίζονται συγκεκριμένα ισότοπα. Η μέθοδος μέτρησης ολικής α/β ακτινοβολίας εφαρμόζεται κυρίως στον προκαταρκτικό έλεγχο δειγμάτων (screening), προκειμένου να αποφασιστεί ο περαιτέρω τρόπος ανάλυσής τους, σε περίπτωση που αυτό απαιτηθεί. Ιδιαίτερα εφαρμόζεται σε δείγματα που προκύπτουν από έλεγχο διαρροής από ραδιενεργές πηγές, δείγματα νερού και φίλτρα αέρα.

Για τις εργαστηριακές μετρήσεις ολικής α/β ακτινοβολίας χρησιμοποιείται συνήθως ανιχνευτής αερίου, με θωράκιση μολύβδου.

### 1.5.4 Μέθοδος υγρού σπινθηρισμού

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιενεργών ισοτόπων που εκπέμπουν α ή β ακτινοβολία. Είναι ιδιαίτερα αποδοτική για τον προσδιορισμό ισοτόπων που εκπέμπουν β-ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας, όπου άλλες τεχνικές υστερούν. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνονται πολύ χαμηλά επίπεδα ανίχνευσης, κυρίως σε υγρά δείγματα, ή σε δείγματα που μπορούν εύκολα να βρεθούν σε κατάσταση υγρού διαλύματος. Ανάλογα από τον τύπο του δείγματος και τα ισότοπα που περιέχει, ενδεχομένως προ της ανάλυσης του δείγματος να απαιτείται απλή ή πιο πολύπλοκη ραδιοχημική επεξεργασία του.

### 1.5.5 Μετρήσεις ραδονίου

Οι μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου πραγματοποιούνται τόσο σε κατοικίες όσο και σε χώρους εργασίας, συνήθως με τη χρήση παθητικών δοσιμέτρων (ανιχνευτές ιχνών). Τα δοσιμέτρα αυτά περιέχουν πλακίδια από κατάλληλο συνθετικό υλικό (συνήθως CR-39) πάνω στα οποία δημιουργούνται ίχνη από τα σωματίδια-α που εκπέμπονται από το ραδόνιο και από τα θυγατρικά του στον αέρα. Τα δοσιμέτρα τοποθετούνται στην κατοικία ή στο χώρο εργασίας, σύμφωνα με συγκεκριμένες οδηγίες και για διάστημα από 3 μήνες έως και 1 χρόνο. Μετά την πάροδο του χρόνου έκθεσης γίνεται κατάλληλη επεξεργασία των πλακιδίων και από το πλήθος των ιχνών που ανιχνεύονται, μέσω κατάλληλου συντελεστή βαθμονόμησης εκτιμάται η μέση

συγκέντρωση του ραδονίου στο χώρο, για την περίοδο μέτρησης. Για μετρήσεις μικρότερης χρονικής διάρκειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλα όργανα, όπως ανιχνευτές τύπου Electret. Παραλλαγή της τεχνικής προσδιορισμού του ραδονίου στον αέρα χρησιμοποιείται και για τον προσδιορισμό του ραδονίου στο νερό. Ένα άλλο είδος μετρήσεων ραδονίου που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι οι μετρήσεις της εκροής (exhalation) ραδονίου από υλικά και κατασκευές.

## 1.6 Παραγωγή υλικών NORM

Υλικά NORM, εκτός από τα ορυχεία ουρανίου και όλες τις συναφείς δραστηριότητες του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου παράγονται και σε μία σειρά από συμβατικές βιομηχανίες. Τα υλικά NORM που παράγονται στις βιομηχανίες αυτές είναι συνήθως παραπροϊόντα των βιομηχανικών διεργασιών σε στερεά κυρίως αλλά και σε υγρή μορφή. Η έκθεση των εργαζομένων στις ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τα υλικά αυτά, αλλά και από το ραδόνιο που εκρέει από τα υλικά, ενδεχομένως οδηγεί σε ραδιοβιολογική επιβάρυνση των εργαζομένων και για το λόγο αυτό θα πρέπει να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα. Επιπλέον, καθώς τα στερεά παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών (τέφρα, σκωρία κλπ) σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ως αδρανή υλικά στην παραγωγή οικοδομικών υλικών ή και σε άλλες εφαρμογές, ένα θέμα που προκύπτει είναι η έκθεση του κοινού και κυρίως των εργαζομένων, τόσο στο ραδόνιο που εκρέει από τα οικοδομικά υλικά, όσο και στην απευθείας ακτινοβολία από τα ραδιενεργά ισότοπα που αυτά περιέχουν.

Ορισμένες μόνον από τις βιομηχανικές δραστηριότητες, τα παραπροϊόντα των οποίων συχνά εμπίπτουν στην κατηγορία των υλικών NORM είναι:

- Η παραγωγή ενέργειας με καύση ορυκτών στερεών καυσίμων (και σε λιγότερο βαθμό η εξόρυξή τους)
- Η εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου
- Η εξόρυξη μεταλλευμάτων και η παραγωγή μετάλλων
- Η εξόρυξη ορυκτών (κυρίως τα ορυκτά σπάνιων γαιών, τιτανίου και ζirkονίου)
- Η παραγωγή φωσφορικού οξέως και φωσφορικών λιπασμάτων
- Η ανακύκλωση μετάλλων

Η ραδιοβιολογική επιβάρυνση από ορισμένες από τις παραπάνω βιομηχανικές δραστηριότητες θα αναλυθούν με στη συνέχεια της εργασίας. Πρέπει πάντως να επισημανθεί ότι η μελέτη της ραδιοβιολογικής επιβάρυνσης που θα ακολουθήσει δεν είναι εξαντλητική σε κάθε περίπτωση, άλλα μάλλον ενδεικτική

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΕΞΟΡΥΞΗ ΚΑΙ ΚΑΥΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### 2.1 Εισαγωγή

Από την αρχή της βιομηχανικής επανάστασης, ο ορυκτός άνθρακας χρησιμοποιείται κατά κόρον για την παραγωγή ενέργειας μέσω της καύσης. Ο ορυκτός άνθρακας (γαιάνθρακας) μπορεί πολύ χονδρικά να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες, τον ανθρακίτη (coal) που είναι υψηλής ποιότητας καύσιμο και το λιγνίτη (brown coal) που είναι ένα μαλακό καφέ εύφλεκτο ιζηματογενές πέτρωμα, το οποίο σχηματίζεται από φυσικά συμπιεσμένα τύρφη. Ο λιγνίτης έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα περίπου 60-70%, υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία μερικές φορές έως και 75% και περιεκτικότητα σε τέφρα που κυμαίνεται από 6-19% και θεωρείται η κατώτερη βαθμίδα άνθρακα, λόγω της σχετικά χαμηλής θερμογόνου δύναμης. Εξορύσσεται σε όλο τον κόσμο και χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά ως καύσιμο για την παραγωγή ατμοηλεκτρικής ενέργειας.

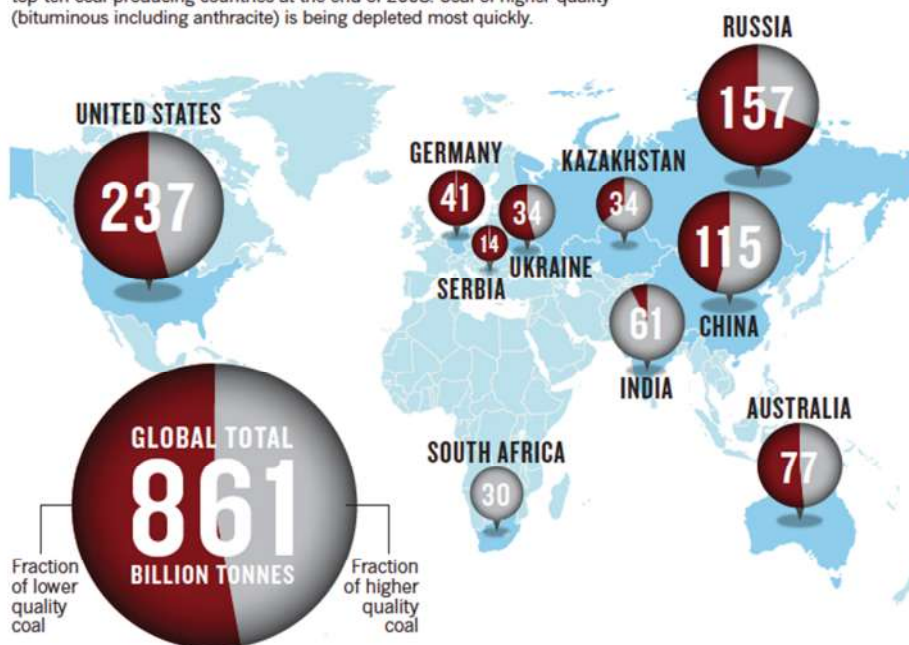
Ο γαιάνθρακας – ανεξαρτήτως ποιότητας – εξορύσσεται σε περισσότερες από 50 χώρες παγκοσμίως. Το 2007 η παγκόσμια παραγωγή ήταν μεγαλύτερη από 7.000 Mt. Αντίστοιχα, το 2006, η παγκόσμια παραγωγή καφέ άνθρακα (λιγνίτη) ήταν ελαφρώς πάνω από 1.000 Mt. Όσον αφορά στους μεγαλύτερους παραγωγούς λιγνίτη παγκοσμίως, στην πρώτη θέση ήταν η Γερμανία με 194.4 Mt και στη δεύτερη θέση η Κίνα με 100.6 Mt. Στο σχήμα 2.1 παρατίθεται παγκόσμιος χάρτης με την απεικόνιση των εκτιμώμενων παγκοσμίων αποθεμάτων άνθρακα και λιγνίτη.

Η εξόρυξη και χρήση του γαιάνθρακα συνοδεύεται από μία σειρά σοβαρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι σημαντικότερες των οποίων παρατίθενται στη συνέχεια:

- Η εξόρυξη άνθρακα εξαλείφει πλήρως την υπάρχουσα βλάστηση στο έδαφος, καταστρέφει το γενετικό προφίλ του εδάφους, μετατοπίζει ή καταστρέφει την άγρια φύση, υποβαθμίζει την ποιότητα του αέρα, μεταβάλλει τις τρέχουσες χρήσεις γης και σε κάποιο βαθμό μεταβάλλει μόνιμα τη γενική τοπογραφία της περιοχής.
- Τα ορυχεία παράγουν συχνά όξινα υπολείμματα, τα οποία μπορεί να διαρρεύσουν σε υδάτινες οδούς και υδροφόρους ορίζοντες, με επιπτώσεις στο οικοσύστημα και στην ανθρώπινη υγεία.
- Εάν οι υπόγειες σήραγγες των ορυχείων καταρρεύσουν, προκαλούν καθίζηση του εδάφους. Η καθίζηση μπορεί να προκαλέσει βλάβες σε κτίρια και να διαταράξει τη ροή των ρευμάτων και των ποταμών μέσω της παρέμβασης στο φυσικό αποχετευτικό δίκτυο.
- Η παραγωγή και καύση του άνθρακα συμβάλλει σημαντικά στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

## WORLD COAL RESERVES

Proven recoverable coal reserves reported to the World Energy Council by the top-ten coal-producing countries at the end of 2008. Coal of higher quality (bituminous including anthracite) is being depleted most quickly.



Σχήμα 2.1 Παγκόσμια αποθέματα άνθρακα και λιγνίτη

Τα διάφορα ήδη άνθρακα, αλλά και τα παραπροϊόντα της καύσης τους (τέφρες) συχνά χαρακτηρίζονται ως υλικά NORM. Τα ραδιενεργά ισότοπα τα οποία κυρίως περιέχονται σε αυτά είναι το  $^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9$  έτη) το  $^{232}\text{Th}$  ( $T_{1/2} = 1.4 \cdot 10^{10}$  έτη) και τα θυγατρικά τους ραδιενεργά ισότοπα, καθώς και το  $^{40}\text{K}$  ( $T_{1/2} = 1.3 \cdot 10^9$  έτη). Τα ισότοπα τα οποία συνήθως ανιχνεύονται και για τα οποία ανευρίσκονται στοιχεία στη βιβλιογραφία είναι τα  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  και το  $^{40}\text{K}$ . Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισοτόπων αλλά και μετάλλων στον άνθρακα εξαρτάται από την κατηγορία (ποιότητα) του άνθρακα. Η απορρόφηση μετάλλων και ιχνοστοιχείων κατά τη διαδικασία δημιουργίας του λιγνίτη (coalification) μέσω της σταδιακής θέρμανσης και συμπίεσης της οργανικής ύλης, έχει ως αποτέλεσμα ο λιγνίτης να έχει υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισοτόπων από άνθρακες υψηλότερης ποιότητας.

Η ιπτάμενη τέφρα που προέρχεται από την καύση του άνθρακα αποτελεί υλικό NORM και μάλιστα παρουσιάζει υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισοτόπων από τον αρχικό άνθρακα (TENORM). Επιπλέον, μελέτες έχουν δείξει ότι η συγκέντρωση των  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα της ιπτάμενης τέφρας μπορεί να είναι διαφορετική (Karangelos D.J., et al., 2004).

Λόγω της μεγάλης σημασίας και της ευρύτατης χρήσης του άνθρακα για παραγωγή ενέργειας έχουν γίνει πλήθος από μελέτες παγκοσμίως για τα NORM που παράγονται κατά την εξόρυξη και καύση του, καθώς και για τις γενικότερες ραδιοβιολογικές επιπτώσεις που συνεπάγεται η χρήση του για παραγωγή ενέργειας. Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένες από αυτές.



## 2.2 Ραδιοβιολογικές επιπτώσεις από την εξόρυξη και καύση του γαιάνθρακα

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται ορισμένες μελέτες οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες χώρες, σχετικά με τη ραδιοβιολογική επιβάρυνση από τη χρήση διαφόρων τύπων γαιάνθρακα. Οι μελέτες αυτές άπτονται όλου του φάσματος των ενδεχομένων ραδιοβιολογικών επιπτώσεων, από την εξόρυξη του άνθρακα έως την καύση του και την παράγωγη τεφρών. Σε ορισμένες από τις μελέτες αυτές δίνονται και στοιχεία για τη ραδιενέργεια των σχετικών NORM υλικών που παράγονται, ενώ σε άλλες γίνονται απλώς εκτιμήσεις για την επιβάρυνση των εργαζομένων και του περιβάλλοντος.

### 2.2.1 Ραδιοβιολογικές επιπτώσεις από τη λειτουργία του ορυχείου El Maghara στην Αίγυπτο

Το ορυχείο El Maghara είναι ένα υπόγειο ανθρακωρυχείο στη χερσόνησο του Σινά της Αιγύπτου. Λειτουργεί από το 1964 και παράγει χαμηλής ποιότητας ασφαλτούχο άνθρακα. Βρίσκεται περίπου στην έρημο του Σινά, 250 χλμ. Βορειοανατολικά του Καΐρου (σχήμα 2.2) και είναι το μοναδικό ανθρακωρυχείο στην Αίγυπτο. Τα αποθέματα του εκτιμώνται σε 21 ΜΤ άνθρακα.



**Σχήμα 2.2** Η θέση του ανθρακωρυχείου El Maghara στη χερσόνησο του Σινά

Στην εργασία (Amer H.A. et al., 2002) παρουσιάζεται μία έρευνα που έχει γίνει με στόχο την εκτίμηση των επιπέδων ραδιενέργειας στην περιοχή πριν από την ανέγερση θερμικού σταθμού και την εκτίμηση της έκθεσης των εργαζομένων στο ορυχείο λόγω του ραδονίου που εκπέμπεται μέσα σε αυτό, προκειμένου να ληφθούν ενδεχομένως τα κατάλληλα μέτρα για τη βελτίωση των επιπέδων ασφαλείας στο ορυχείο. Στα πλαίσια έρευνας που πραγματοποιήθηκε έγιναν μία σειρά από μετρήσεις και δειγματοληψίες στο ορυχείο στις θέσεις παρουσιάζονται στο χάρτη που παρατίθεται στο σχήμα 2.3. Συγκεκριμένα, σε δέκα θέσεις δειγματοληψίας μέσα στο ορυχείο έγιναν μετρήσεις των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα. Σε κάθε θέση δειγματοληψίας έγιναν πέντε μετρήσεις σε ύψος ενός μέτρου από το έδαφος: δύο κοντά στα πλαϊνά τοιχώματα και τρεις περί το μέσον του τούνελ. Για την εκτίμηση των θυγατρικών του ραδονίου σε όρους **WL** (working level), χρησιμοποιήθηκε η σχέση:



$$WL = \frac{R}{EvtF}$$

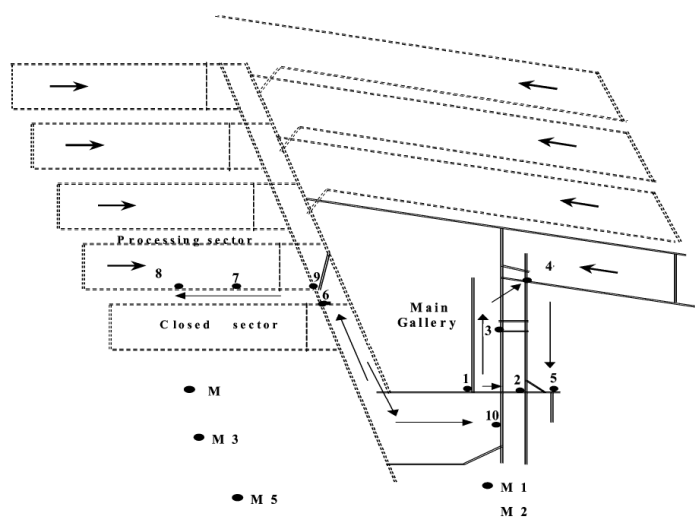
όπου  $R$  είναι ο ρυθμός εκπομπής σωματιδίων-α ανά λεπτό στον αέρα,  $E$  η απόδοση της διάταξης μέτρησης,  $v$  είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας αέρα σε λίτρα ανά λεπτό,  $t$  η διάρκεια δειγματοληψίας σε λεπτά και  $F$  συντελεστής μετατροπής, ο οποίος για διάρκεια δειγματοληψίας 1-20 λεπτών έχει την προσεγγιστική τιμή στο 212.

Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του θορονίου έγινε κατάλληλη δειγματοληψία με χρήση αντλίας αέρα πάνω σε κατάλληλο φίλτρο. Το θορόνιο ( $^{220}\text{Rn}$ ) εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_{Thb} = \frac{0.411Re^{0.001086T}}{Evt}$$

όπου  $C_{Thb}$  είναι η συγκέντρωση του θυγατρικού του θορονίου  $\text{Th}_b$  ( $^{212}\text{Pb}$ ),  $R$  ο ρυθμός εκπομπής σωματιδίων τη χρονική στιγμή  $T$  από το τέλος της δειγματοληψίας,  $T$  είναι το διάστημα από το τέλος της δειγματοληψίας μέχρι την καταμέτρηση ( $\geq 300$ ) σε λεπτά,  $E$  είναι η απόδοση της διάταξης,  $v$  ο ογκομετρικός ρυθμός δειγματοληψίας ανά λεπτό και  $t$  είναι η διάρκεια δειγματοληψίας σε λεπτά.

Στην ίδια μελέτη λήφθηκαν δείγματα και από το έδαφος στον περιβάλλοντα χώρο έξω από το ορυχείο, σε πέντε θέσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Τα δείγματα αυτά μετά από κονιοποίηση και ξήρανση αναλύθηκαν με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας και ανιχνευτή HPGe σε δοχεία Marinelli ενός λίτρου.



**Σχήμα 2.3** Θέσεις δειγματοληψίας στο ανθρακωρυχείο El Maghara

Ο ρυθμός ισοδύναμου δόσης (nSv/h) στον αέρα 1 m από το επίπεδο εδάφους εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$D = R_K \cdot C_K + R_U \cdot C_U + R_{Th} \cdot C_{Th}$$

Όπου  $D$  είναι ο ισοδύναμος ρυθμός δόσης,  $R_K$ ,  $R_U$  και  $R_{Th}$  είναι συντελεστές μετατροπής που εκφράζονται σε nSv/h ή μSv/h ανά μονάδα Bq/kg και  $C_K$ ,  $C_U$  και  $C_{Th}$  είναι οι ειδικές ραδιενέργειες των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  σε Bq/kg, όπως έχουν εκτιμηθεί από τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση στο εργαστήριο. Στον πίνακα 2.1 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την έκθεση σε ραδόνιο και θορόνιο εντός του ορυχείου.

**Πίνακας 2.1** Επίπεδα έκθεσης λόγω ραδονίου και θορονίου μέσα στο ορυχείο El Maghara

Θέση	Θυγατρικά ραδονίου (WL)	Thoron ( $^{212}\text{Pb}$ ) mBq/m <sup>3</sup>	Ρυθμός Έκθεσης $\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$	Ενεργός Δόση $\mu\text{Sv}\cdot\text{y}^{-1}$	Συγκέντρωση Μεθανίου (%)
1	$1.258\cdot 10^{-4}$	>LLD	4.6	15.7	0.06–0.07
2	$3.774\cdot 10^{-4}$	1.962	13.7	47.2	0.06–0.07
3	$1.258\cdot 10^{-4}$	2.585	22.8	15.7	0.11
4	0.00704	4.040	22.8	880	0.11
5	0.00201	1.240	26.7	251	0.10
6	$5.031\cdot 10^{-4}$	1.214	6.8	63	0.07
7	0.00189	1.220	13.7	236	0.055
8	0.00113	1.174	3.7	141	0.06

Αντίστοιχα, στον πίνακα 2.2 παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δειγμάτων εδάφους καθώς και η εκτίμηση του ρυθμού δόσης εκτός του ορυχείου.

**Πίνακας 2.2** Επίπεδα ραδιενέργειας και ρυθμός δόσης εκτός του ορυχείου

Δείγμα	Ρυθμός δόσης $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$^{226}\text{Ra}$ Bq/kg	$^{232}\text{Th}$ Bq/kg	$^{40}\text{K}$ Bq/kg
M <sup>a</sup>	0.4	2.7±0.2	3.2±0.3	14.6±1.5
M1	0.23	20.2±1	12.6±1	201±5
M2	0.21	12±2.3	9.1±1.2	161±10
M3	0.17	8.2±0.4	9.2±0.5	130.5±2
M4	0.15	3.5±0.5	4.0±1.0	30±3.2

<sup>a</sup> σκόνη άνθρακα

Από τις μετρήσεις των θυγατρικών του ραδονίου και του θορονίου και της φυσικής ραδιενέργειας στο ανθρακωρυχείο El Maghara συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών του ραδονίου αυξάνονται ανάλογα με το βάθος στο ορυχείο και φτάνουν τις ελάχιστες τιμές στην είσοδο του, κάτι το οποίο είναι μάλλον αναμενόμενο. Σε κάθε περίπτωση, οι μέσες τιμές θυγατρικών ραδονίου είναι χαμηλότερες από το όριο 0.3WL για εργαζόμενους, ενώ και οι υπολογισθείσες ετήσιες συνολικές δόσεις για τους εργαζόμενους στο ορυχείο είναι χαμηλότερες από το συνιστάμενο όριο δόσης. Πέρα από το σχετικά χαμηλό ραδιενεργό περιεχόμενο του άνθρακα στο ορυχείο, το αποτελεσματικό σύστημα εξαερισμού που είναι εγκαταστημένο φαίνεται να είναι ο κύριος λόγος για την χαμηλή συγκέντρωση θυγατρικών του ραδονίου στις στοές. Οι ειδική ραδιενέργεια των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στα δείγματα που συλλέχθηκαν γύρω από το ορυχείο αποκαλύπτουν κανονικές τιμές του φυσικού ραδιενεργού υποβάθρου. Η ειδική ραδιενέργεια, τόσο των πατρικών πυρήνων ( $^{232}\text{Th}$  ή  $^{238}\text{U}$ ) όσο και των θυγατρικών τους στον άνθρακα δεν υπερβαίνουν τα 0.3 Bq/g ή 1.0 Bq/g αντίστοιχα, για εργασίες που συνοδεύονται από έκλυση σκόνης, και τα 5 Bq/g ή 9 Bq/g αντίστοιχα για υλικά προς αποθήκευση. Σύμφωνα με τον κώδικα ορθής πρακτικής που εγκρίθηκε πρόσφατα στη Αίγυπτο, τα δείγματα αυτά δεν θεωρούνται ως ραδιενεργά υλικά και ως εκ τούτου δεν είναι υπόκεινται σε κανονιστικό έλεγχο.

### 2.2.2 Ραδιενεργός ρύπανση των υδάτων από την εξόρυξη άνθρακα στην Πολωνία

Η εξόρυξη άνθρακα, κυρίως από κλειστά ορυχεία, μπορεί να συνοδεύεται και από προβλήματα που έχουν σχέση με το νερό, το συχνά οποίο κατακλύζει τις υπόγειες στοές και το οποίο πρέπει να εξάγεται από το ορυχείο και να απελευθερώνεται στο περιβάλλον. Μία σχετική μελέτη που έγινε το 1992 στην Πολωνία, (Skubacz et al., 1992] αφορά στις επιπτώσεις εξόρυξης λιγνίτη στην περιοχή της Σιλεσίας (Silesia) και επικεντρώνεται ακριβώς στις επιπτώσεις που έχει η εξόρυξη στη ραδιενέργεια των υπογείων υδάτων.

Στην Πολωνία, ο λιγνίτης εξορύσσεται κυρίως στη λεκάνη της ανώτερης Σιλεσίας που έχει έκταση περί τα 4500km<sup>2</sup>. Στην περιοχή αυτή είναι ενεργά 66 ανθρακωρυχεία, από όπου εξαγονται περίπου 180·10<sup>6</sup> τόνοι άνθρακα ετησίως. Η μεγαλύτερη ανησυχία για το φυσικό περιβάλλον προκαλείται από το γεγονός ότι μέσα από τα ορυχεία αυτά πρέπει να αντλούνται μεγάλες ποσότητες αλατούχων υδάτων που εισέρχονται στις υπόγειες στοές από τους γύρω βράχους κατά τη διάρκεια της εξόρυξης, με τη συνολική περιεκτικότητα σε ιόντα χλωρίου (Cl<sup>-</sup>) να εκτιμάται σε ~3.6·10<sup>6</sup> τόνους ετησίως. Όπως έχει ήδη διαπιστωθεί από τη δεκαετία του 1970 τα νερά αυτά έχουν σχετικά υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας. Το 1974 από μία αντίστοιχη έρευνα προέκυψε ότι σε περιοχές της Γερμανίας, η συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  στα νερά που αντλούνταν από ανθρακωρυχεία έφταναν τα 13kBq/m<sup>3</sup>, ενώ το νερό που εκρέει από το βράχο μέσα στο ορυχείο μπορεί να φτάνει τα 63kBq/m<sup>3</sup>. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι η συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  σε φυσικά νερά συνήθως δεν υπερβαίνει τα 0.1 kBq/m<sup>3</sup>, με εξαίρεση ύδατα από βαθιά υδροφόρα στρώματα. Η υψηλότερη συγκέντρωση  $^{226}\text{Ra}$  έχει αναφερθεί σε αυστραλιανά υπόγεια ύδατα, όπου φτάνει τα 455 kBq·m<sup>3</sup>.

Στα πλαίσια της εργασίας (Skubacz et al., 1992) συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν πέντε χιλιάδες δείγματα νερού, τόσο από την απορροή των ορυχείων όσο και από το φυσικό νερό στις

μεταλλευτικές περιοχές. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με την τεχνική υγρού σπινθηρισμού. Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι τα ύδατα περιέχουν κυρίως ισότοπα του ράδιου:  $^{226}\text{Ra}$  από τη σειρά ουρανίου και  $^{228}\text{Ra}$  από τη σειρά του θορίου, με τις συγκεντρώσεις να είναι πολύ υψηλές, ενώ και η ραδιενεργός ισορροπία ήταν διαταραγμένη. Όπως εκτιμήθηκε, για το 1990 στο 20% της συνολικής ποσότητας νερού ( $1.6 \cdot 10^8 \text{m}^3$ ) που φτάνει στις υπόγειες εγκαταστάσεις εξόρυξης, η συγκέντρωση ιόντων του  $\text{Cl}^-$  ξεπερνά τα  $42 \text{gr/dm}^3$ . Αυτό συσχετίζεται άμεσα με τη μεταφορά σημαντικών ποσοτήτων ράδιου στην επιφάνεια, οι οποίες εντέλει μεταφέρονται στο φυσικό περιβάλλον. Η διασπορά στο περιβάλλον της ραδιενεργού ρύπανσης που μεταφέρεται με τον νερό στην επιφάνεια του εδάφους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χημική σύνθεση του νερού. Τα δείγματα νερού, σύμφωνα με τους (Lebecka J. et. al., 1986) διακρίνονται εν γένει σε δύο τύπους: ύδατα τύπου Α, χωρίς ή με πολύ μικρές ποσότητες θεικών αλάτων που περιέχουν ιόντα  $\text{Ba}^{+2}$  και ύδατα τύπου Β με ποσότητες θεικών ενώσεων αλλά χωρίς ιόντα  $\text{Ba}^{+2}$ .

Στον πίνακα 2.3 παρατίθενται αποτελέσματα από μετρήσεις  $^{226}\text{Ra}$  και ιόντων σε ορισμένα χαρακτηριστικά δείγματα νερού από την παραπάνω εργασία.

**Πίνακας 2.3** Συγκέντρωση ιόντων  $\text{Ba}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$  και  $\text{SO}_4^{2-}$  και  $^{226}\text{Ra}$  σε δείγματα νερού

Τύπος νερού	Συγκέντρωση σε ( $\text{mg/dm}^3$ )			Συγκέντρωση $^{226}\text{Ra}$
	$\text{Ba}^{+2}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	( $\text{kBq/dm}^3$ )
A	180	>LLD	21.463	175
A	1196	>LLD	68.292	114
A	675	>LLD	74.146	80
A	561	>LLD	78.536	48
B	>LLD	1752	52.195	10.4
B	>LLD	2104	65.804	7.8
B	>LLD	2244	72.683	5.2

Στα ύδατα τύπου Β το ράδιο δεν καθιζάνει, γεγονός που οδηγεί στη μεταφορά του στα επιφανειακά ύδατα. Η τύχη του ράδιου που υπάρχει στα ύδατα τύπου Α είναι διαφορετική. Σε αυτήν την περίπτωση, μετά την ανάμειξη τους με τα θειικά ύδατα, τα οποία είναι κοινά στο φυσικό περιβάλλον, μια καθίζηση του ράδιου και των ιόντων θείου και βαρίου οδηγεί στο σχηματισμό ραδιενεργών αποθέσεων.

Ως αποτέλεσμα της εναπόθεσης και ρύπανσης του εδάφους από το ράδιο, εμφανίζεται υψηλή εκπομπή ραδονίου από το έδαφος και σχετικά αυξημένη συγκέντρωση ραδονίου και των θυγατρικών του στον αέρα. Στα πλαίσια της εργασίας (Skubacz et al., 1992) έγινε σειρά μετρήσεων των συγκεντρώσεων των θυγατρικών του ραδονίου στο αναπνεύσιμο κλάσμα της σκόνης κοντά στις δεξαμενές που περιέχουν ραδιενεργά ύδατα και αποθέσεις, καθώς και στο ρυπασμένο έδαφος. Συγκεκριμένα, εκτιμήθηκε το PAEC (Potential Alpha Energy Concentration) των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου και βρέθηκαν τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 0.025 –

0.067  $\mu\text{J}/\text{m}^3$ , όταν η μέση αντίστοιχη τιμή για μία φυσιολογική περιοχή είναι περί τα 0.012  $\mu\text{J}/\text{m}^3$  (UNSCEAR, 1982)

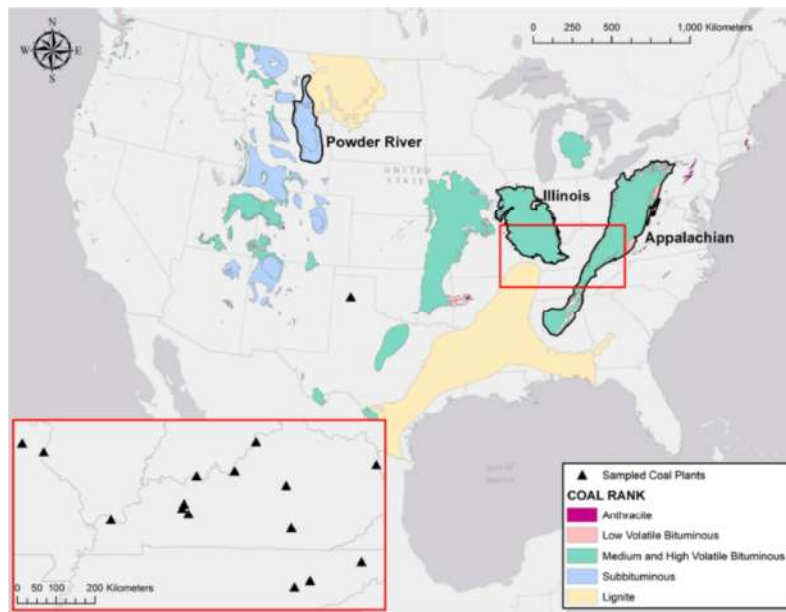
Τα ύδατα τύπου Β που αντλούνται κυρίως από ορυχεία στο ανατολικό τμήμα της υπό μελέτη περιοχής δημιουργούν διαφορετικά προβλήματα για το φυσικό περιβάλλον. Ενώ τα υπόγεια ύδατα από το νότιο τμήμα που φθάνουν τελικά στον ποταμό Oder δεν προκαλούν ραδιενεργό ρύπανση του ποταμού, τα ύδατα από τα ορυχεία του ανατολικού τμήματος επηρεάζουν σημαντικά τη ραδιενέργεια των υδάτων στον ποταμό Vistule. Οι λόγοι για αυτό το πρόβλημα δεν έχουν γίνει ακόμα πλήρως κατανοητοί.

Συμπερασματικά, οι έρευνες για τη ραδιενεργό ρύπανση που προκαλείται από τα ανθρακωρυχεία στην Πολωνία έδειξαν ότι τοπικά η ρύπανση μπορεί να είναι υψηλή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της δόσης λόγω της ακτινοβολίας- $\gamma$  του εδάφους αλλά και την αύξηση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα και τη ρύπανση της βλάστησης. Τα ραδιενεργά ύδατα τύπου Β φαίνεται να έχουν μεγαλύτερης έκτασης και βαρύτητας επίδραση στο περιβάλλον επειδή αυξάνουν το επίπεδο ραδιενέργειας των υδάτων στο ποτάμι όπου τελικά καταλήγουν. Πάντως, απαιτούνται περαιτέρω εργασίες για την εκτίμηση της επίδρασης αυτών των υδάτων στο πόσιμο νερό, καθώς και στον πληθυσμό που κατοικεί στη περιοχή.

### 2.2.3 Παράγωση NORM από την καύση άνθρακα στις Ηνωμένες Πολιτείες

Το σημαντικότερο ίσως πρόβλημα που σχετίζεται με τη ραδιοβιολογική επίπτωση από τη χρήση στερεών ορυκτών καυσίμων είναι η παραγωγή υλικών NORM κατά τη διαδικασία καύσης για παραγωγή ενέργειας. Η εργασία των (Lauer et al, 2015) αφορά σε υλικά NORM τα οποία παράγονται κατά την εξόρυξη του άνθρακα, καθώς και στα υπολείμματα καύσης του άνθρακα (Coal Combustion Residuals, CCRs). Στα πλαίσια της παραπάνω εργασίας πραγματοποιήθηκε συστηματική ανάλυση της ραδιενέργειας μίας σειράς ραδιενεργών ισότοπων ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{210}\text{Pb}$ ) σε άνθρακες από τις περιοχές Illinois, Appalachian και Powder River των ΗΠΑ, καθώς και τα αντίστοιχα CCRs. Στο Σχήμα 2.4 αποτυπώνονται οι μεγαλύτερες αποθέσεις στερεών ορυκτών καυσίμων στις ΗΠΑ και οι αντίστοιχοι τύποι καυσίμου σε κάθε περιοχή, καθώς και οι θέσεις των θερμικών σταθμών στους οποίους έγιναν δειγματοληψίες στα πλαίσια της εργασίας των (Lauer et al, 2015). Η συλλογή δειγμάτων άνθρακα και ιπτάμενης τέφρας από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής έγινε μεταξύ του 2007 και του 2013. Επειδή οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής συχνά καταναλώνουν και μείγματα άνθρακα και βιομάζας, ενώ συχνά τροφοδοτούνται και από διαφορετικά ορυχεία, δόθηκε προσοχή ώστε οι δειγματοληψίες να γίνονται μόνο στις περιπτώσεις που το καύσιμο ήταν άνθρακας από γνωστό ορυχείο.

Για τον προσδιορισμό της ειδικής ραδιενέργειας στα δείγματα που συλλέχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές  $\gamma$ -φασματοσκοπίας. Τα δείγματα μετά από ξήρανση και λιοτρίβιση συσκευάστηκαν σε γεωμετρία Petri (διάμετρος 6.5 cm και ύψος 2 cm) τα οποία στη συνέχεια σφραγίστηκαν με ταινία και επικαλύφθηκαν με κερί για επίτευξη αεροστεγούς συσκευασίας. Τα δείγματα αναλύθηκαν τουλάχιστον 27 ημέρες μετά τη συσκευασία τους, προκειμένου να επιτευχθεί ραδιενεργός ισορροπία. Τα δείγματα αναλύθηκαν για τα ισότοπα:  $^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 4.5 \times 10^9$  έτη),  $^{226}\text{Ra}$  ( $T_{1/2} = 1600$  έτη),  $^{210}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 22$  έτη) και  $^{228}\text{Ra}$  ( $T_{1/2} = 5.8$  έτη).



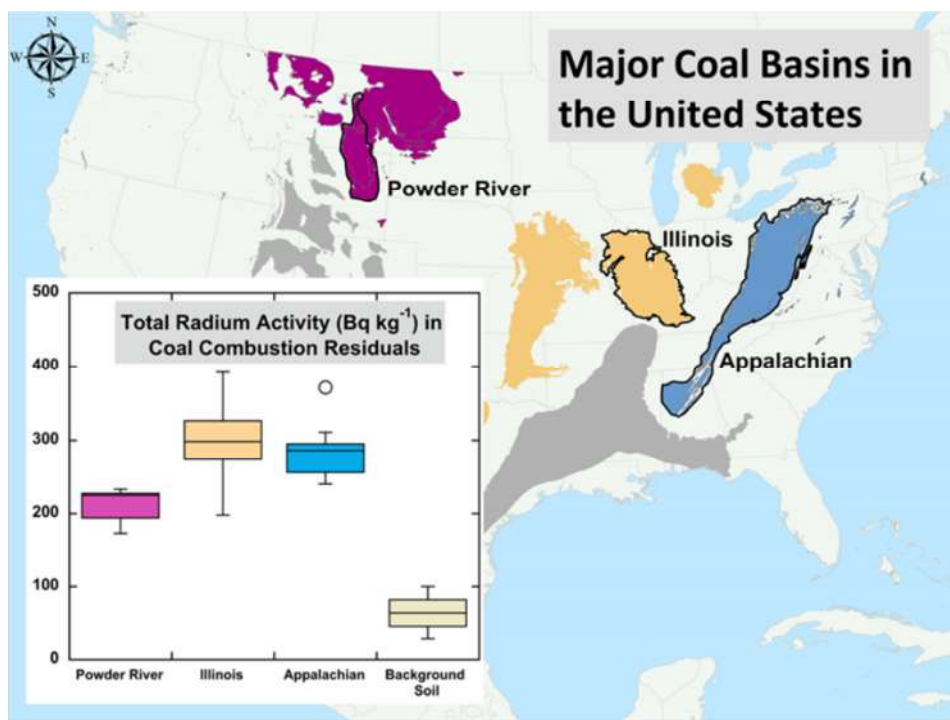
**Σχήμα 2.4** Οι σημαντικότερες αποθέσεις στέρεων ορυκτών καυσίμων στις ΗΠΑ (Lauer et al, 2015).

Οι μέσες τιμές και το εύρος τιμών της ειδικής ραδιενέργειας για τα ισότοπα που αναλύθηκαν, μαζί με τους λόγους των  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  και  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ , τόσο για τον άνθρακα που συλλέχθηκε από τις τρεις λεκάνες Appalachian, Illinois και Powder River Basins, όσο και για αντίστοιχα CCRs που συλλέχθηκαν από τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 2.4:

**Πίνακας 2.4** Ειδική ραδιενέργεια δειγμάτων άνθρακα και CCRs από διάφορες περιοχές του ΗΠΑ

Προέλευση/ Υλικό	$^{232}\text{Th}$ Bq/kg	$^{228}\text{Ra}$ Bq/kg	$^{238}\text{U}$ Bq/kg	$^{226}\text{Ra}$ Bq/kg	$^{210}\text{Pb}$ Bq/kg	$^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$	$^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$
<b>Appalachian</b>								
Άνθρακας		14 (12-15)	20 (18-21)	23 (21-25)	21 (17-23)	0.61 (0.49-0.68)	0.93 (0.83-1.03)	1.18 (1.07-1.38)
CCRs	112 (79-131)	113 (88-139)	171 (131-248)	170 (133-232)	193 (111-324)	0.67 (0.56-0.80)	1.12 (0.75-1.64)	1.01 (0.80-1.18)
<b>Illinois</b>								
Άνθρακας		8 (6-13)	30 (23-43)	31 (22-42)	27 (22-37)	0.28 (0.14-0.41)	0.88 (0.74-1.00)	1.02 (0.94-1.10)
CCRs	67 (49-81)	68 (53-94)	228 (135-341)	230 (142-325)	284 (81-483)	0.31 (0.20-0.52)	1.25 (0.30-2.07)	1.01 (0.75-1.25)
<b>Powder River</b>								
Άνθρακας		14 (11-19)	12 (6-21)	14 (7-23)	12 (6-19)	1.07 (0.79-1.48)	0.83 (0.81-0.86)	1.24 (1.12-1.38)
CCRs	86 (80-96)	93 (80-110)	114 (85-142)	120 (93-139)	131 (70-184)	0.79 (0.64-0.95)	1.08 (0.64-1.37)	1.07 (0.95-1.22)

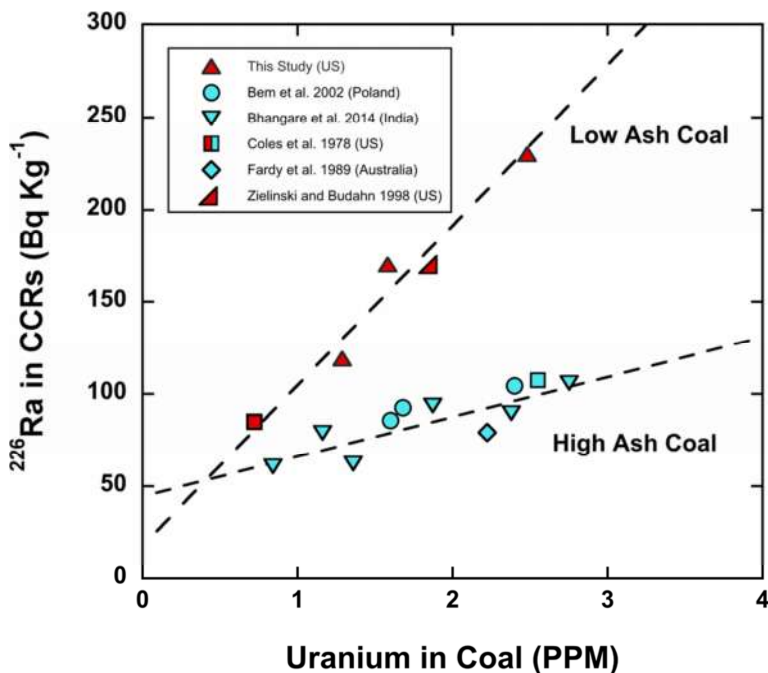
Όπως παρατηρείται από τον παραπάνω πίνακα, οι άνθρακες από τη λεκάνη του Illinois έχουν την υψηλότερη συνολική ραδιενέργεια ραδίου ( $^{228}\text{Ra} + ^{226}\text{Ra} = 39 \pm 8 \text{ Bq/kg}$ ) και το χαμηλότερο λόγο ραδιενέργειας  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  ( $0.28 \pm 0.11$ ), ακολουθούμενη από τους άνθρακες από την περιοχή Appalachian ( $37 \pm 2 \text{ Bq/kg}$ ) και ( $0.61 \pm 0.10$ ) αντίστοιχα, και από την περιοχή Powder River ( $28 \pm 12 \text{ Bq/kg}$ ) και ( $1.07 \pm 0.36$ ) αντίστοιχα. Οι ειδικές συγκεντρώσεις στα CCRs ακολουθούν την ίδια τάση. Τα CCRs που προέρχονται από τη λεκάνη του Illinois έχουν τη μεγαλύτερη συνολική ραδιενέργεια ραδίου ( $297 \pm 46 \text{ Bq/kg}$ ) και τη χαμηλότερη αναλογία  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  ( $0.31 \pm 0.09$ ), ακολουθούμενη από τα CCRs από την περιοχή Appalachian ( $283 \pm 34 \text{ Bq/kg}$ ) και ( $0.67 \pm 0.09$ ) και την περιοχή Powder River ( $213 \pm 21 \text{ Bq/kg}$ ) και ( $0.79 \pm 0.10$ ). Επίσης, προκύπτει ότι η συνολική ραδιενέργεια του ραδίου είναι ~7-10 φορές υψηλότερη στα CCRs των ΗΠΑ σε σύγκριση με τους άνθρακες, με την υψηλότερη ραδιενέργεια σε CCRs να παρατηρείται στα CCRs από το Illinois και την περιοχή Appalachian και τη χαμηλότερη από την περιοχή Powder River. Αυτός ο εμπλουτισμός κατά 7-10 φορές είναι αναμενόμενος, λόγω της απομείωσης του άνθρακα κατά την διαδικασία της καύσης, καθώς οι υπό εξέταση άνθρακες περιέχουν τέφρα 10-15%, κάτι το οποίο είναι χαρακτηριστικό των ανθρακούχων των ΗΠΑ. Τα αποτελέσματα για την ειδική ραδιενέργεια στα CCRs αποτυπώνονται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 2.5.



**Σχήμα 2.5** Ειδική ραδιενέργεια των CCRs από διάφορες περιοχές των ΗΠΑ.

Το Σχήμα 2.6 που ακολουθεί δείχνει τη συσχέτιση μεταξύ των  $^{226}\text{Ra}$  σε CCRs και  $^{238}\text{U}$  στον άνθρακα, όπως προκύπτουν από μία σειρά εργασιών σε διαφορετικές χώρες. Τα στοιχεία δείχνουν ότι το  $^{226}\text{Ra}$  στα CCRs συσχετίζεται γραμμικά με το  $^{238}\text{U}$  στον αρχικό άνθρακα, με καλό βαθμό συσχέτισης. Οι άνθρακες υψηλής τέφρας (~30-40% τέφρα) παράγουν CCRs με σχετικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις  $^{226}\text{Ra}$ , σε σύγκριση με τους άνθρακες χαμηλής τέφρας (~10-15% τέφρα). Αυτές οι συσχετίσεις δείχνουν ότι η αρχική συγκέντρωση του  $^{238}\text{U}$  και η περιεκτικότητα

σε τέφρα του άνθρακα είναι οι δύο κυρίαρχοι παράγοντες που καθορίζουν τα επίπεδα ραδιενέργειας του  $^{226}\text{Ra}$  στα παραγόμενα CCRs. Αυτή η σχέση είναι σημαντική για μια πρόβλεψη της ραδιενέργειας του  $^{226}\text{Ra}$  στην υπτάμενη τέφρα η οποία παράγεται από διαφορετικούς τύπους άνθρακα παγκοσμίως.



**Σχήμα 2.6** Συσχέτιση  $^{226}\text{Ra}$  στα CCRs με το  $^{238}\text{U}$  στον άνθρακα για διάφορες ποιότητες άνθρακα

Οι μεγάλοι χρόνοι υποδιπλασιασμού των  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$  – τάξη μεγέθους  $10^9$  και  $10^{10}$  ετών αντίστοιχα – υποδηλώνουν ότι οι ραδιενεργές σειρές του ουρανίου και του θορίου στους άνθρακες των ΗΠΑ είναι πιθανά σε ραδιενεργό ισορροπία με τα θυγατρικά τους. Αυτό δεν συμβαίνει απαραίτητα στα CCRs, λόγω των διαφορετικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων – κυρίως πτητικότητα – ιδιαίτερα για τον  $^{210}\text{Pb}$ . Η υψηλή θερμοκρασία στην οποία καίγεται ο άνθρακας μέσα στο σταθμό παραγωγής ενέργειας προάγει την εξάτμιση του  $^{210}\text{Pb}$ , με συνέπεια την εν συνεχεία διαταραχή της ραδιενεργού ισορροπίας στα CCRs

Λόγω των αυξημένων επιπέδων ραδιενέργειας των CCRs σε σύγκριση με το φυσικό υπόβαθρο του εδάφους (3-5 φορές), οι πιθανές περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις και οι κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία που σχετίζονται με τις αποθέσεις των CCRs στο περιβάλλον πρέπει να αξιολογούνται. Τα σωματίδια σκόνης από τους χώρους απόθεσης των CCRs θα μπορούσαν να δημιουργήσουν επιπλέον κινδύνους για την υγεία (μέσω της εισπνοής) οι οποίοι δεν είναι ακόμα σήμερα πλήρως κατανοητοί. Επιπρόσθετα, οι επιφανειακές αποθέσεις των CCRs ενέχουν κινδύνους απόπλυσης (leaching) των ισοτόπων του ραδίου και τη μεταφορά τους προς τα υπόγεια ύδατα. Πάντως, σε κάθε περίπτωση η εγκατάσταση αποτελεσματικών ηλεκτροστατικών φίλτρων (ESP) στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας και άλλων συσκευών ελέγχου εκπομπής σωματιδίων έχουν ως αποτέλεσμα η δόση ακτινοβολίας που οφείλεται στην άμεση εκπομπή CCRs στο περιβάλλον από την καπνοδόχο του σταθμού να βρίσκεται κοντά στο φυσικό ραδιενεργό υπόβαθρο.



## 2.2.4 Παράγωγή NORM από την καύση λιγνίτη στην Ελλάδα

Αντίστοιχες μελέτες που αφορούν στην επίπτωση από τη εξόρυξη και χρήση στερεών ορυκτών καυσίμων έχουν γίνει και στην Ελλάδα. Καθώς το ορυκτό το οποίο κυρίως χρησιμοποιείται στην Ελλάδα για την παραγωγή ενέργειας για περισσότερο από πενήντα χρόνια είναι ο λιγνίτης, η έρευνα έχει εστιάσει πάνω στο λιγνίτη. Ο ελληνικός λιγνίτης είναι ένα σχετικά φτωχό καύσιμο, με χαμηλή θερμογόνο δύναμη, πολύ υψηλή υγρασία και υψηλό ποσοστό τέφρας. Η εξόρυξη γίνεται σε ανοικτά ορυχεία και οι περιοχές όπου κυρίως συγκεντρώνεται η εξόρυξη λιγνίτη και κατά συνέπεια η παραγωγή ενέργειας είναι δύο: το λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδος στην Βορειοδυτική Ελλάδα και το λιγνιτικό πεδίο Μεγαλόπολης, στο κέντρο της Πελοποννήσου. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής ενέργειας και ιπτάμενης τέφρας γίνεται στην Πτολεμαΐδα. Η ιπτάμενη τέφρα της Πτολεμαΐδας είναι πλούσια σε ενώσεις ασβεστίου, ενώ η τέφρα της Μεγαλόπολης περιέχει περισσότερο SiO<sub>2</sub>. Στα δείγματα ιπτάμενης τέφρας του ελληνικού λιγνίτη παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, ενώ και η ραδιενέργεια είναι σχετικά υψηλή, φθάνοντας στην περίπτωση της τέφρας της Μεγαλόπολης έως και το 1 kBq/kg για το <sup>226</sup>Ra. Η κύρια χρήση της τέφρας στην Ελλάδα γίνεται στη βιομηχανία τσιμέντου καθώς αντικαθιστά το κλίνκερ στην παραγωγή ειδικών τύπων τσιμέντου Portland.

### 2.2.4.1 Ραδιενέργεια ελληνικών λιγνιτών

Λόγω της μεγάλης χρήσης του λιγνίτη για την παραγωγή ενέργειας στην Ελλάδα, έχει γίνει εκτενής μελέτη της φυσικής του ραδιενέργειας διαχρονικά. Στη δημοσίευση (Skordas G. et al., 2007) στην οποία γίνεται διερεύνηση των χαρακτηριστικών των τεφρών από ελληνικούς λιγνίτες δίνονται και ορισμένα ενδεικτικά στοιχεία για τη ραδιενέργεια των ελληνικών λιγνιτών από διάφορα ορυχεία της χώρας. Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται τα στοιχεία αυτά.

**Πίνακας 2.5** Ενδεικτικά στοιχεία για τη ραδιενέργεια των ελληνικών λιγνιτών

Ορυχείο	Μέγεθος δείγματος	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
(Μέση τιμή ± 1σ σε Bq/kg ξηρής μάζας)				
Αχλάδα	3	407 ± 13	74 ± 3.0	411 ± 23
Αμύνταιο	5	33 ± 14	15 ± 3.7	96 ± 24
Καρδιά	5	174 ± 19	16 ± 1.5	67 ± 15
Μεγαλόπολη	5	314 ± 52	21 ± 2.0	181 ± 26
	5	321 ± 40	21 ± 1.0	191 ± 14
Πτολεμαΐδα	5	85 ± 7.4	15 ± 1.5	78 ± 15
Βεύη	2	204 ± 41	26 ± 11	196 ± 89
Τυπικές τιμές παγκοσμίως		10 – 25	10 – 25	50 – 110

Από τον παραπάνω πίνακα, αν και το μέγεθος δείγματος για κάθε ορυχείο είναι πολύ μικρό, καταρχήν διαπιστώνεται ότι οι τιμές ειδικής ραδιενέργειας για το  $^{226}\text{Ra}$  είναι σημαντικά υψηλότερες από τα παγκόσμια επίπεδα, με βάση την αναφορά (UNSCEAR, 2000), ενώ οι ραδιενέργεια των  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  είναι γενικά εντός των αναμενόμενων ορίων παγκοσμίως. Δεδομένου ότι τα περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα εμπλουτίζονται στην ιπτάμενη τέφρα σε σύγκριση με τον αρχικό λιγνίτη, είναι αναμενόμενο ότι η ελληνική ιπτάμενη τέφρα θα έχει επίσης αυξημένα επίπεδα ραδιενέργειας. Ευτυχώς, λόγω των υψηλών επιπέδων τέφρας του ελληνικού λιγνίτη, οι λόγοι εμπλουτισμού είναι χαμηλότεροι από αυτούς αναφέρονται σε άνθρακες υψηλότερης ποιότητας, με αποτέλεσμα οι τιμές της ραδιενέργειας στις τέφρες να μην είναι τελικά τόσο υψηλές.

#### *2.2.4.2 Μελέτη των χαρακτηριστικών των τεφρών από λιγνίτη των ορυχείων της Καρδιάς*

Τα σημαντικότερα αποθέματα λιγνίτη στη χώρα βρίσκονται στο βορειοδυτικό τμήμα της Ελλάδας. Στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας στη λεκάνη της Πτολεμαΐδας, όπου γίνεται το 75% της συνολικής παραγωγής λιγνίτη της χώρας. Η ποιότητα του λιγνίτη είναι χαμηλή, λόγω της χαμηλής θερμικής αξίας (1250 kcal/kg) και της σχετικά υψηλής περιεκτικότητας σε τέφρα (~13-17%). Η ιπτάμενη τέφρα που παράγεται από την καύση του λιγνίτη είναι τύπου  $\text{CaO-SiO}_2$  και ανήκει στην αλκαλική τέφρα τύπου C, η οποία περιέχει τουλάχιστον 50%  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Τόσο τα οργανικά όσο και τα ορυκτά κλάσματα του λιγνίτη περιέχουν φυσικά ραδιενεργά ισότοπα μαζί με τα θυγατρικά τους (όπως τα ισότοπα των σειρών του  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$  και το  $^{40}\text{K}$ ) σε συγκεντρώσεις που συνήθως είναι συγκρίσιμες με τη μέση ραδιενέργεια του γήινου φλοιού ή και λίγο υψηλότερες μερικές φορές. Οι συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισωτόπων στην ιπτάμενη τέφρα που παράγεται από την καύση του λιγνίτη είναι υψηλότερες από ότι στον αρχικό λιγνίτη λόγω εμπλουτισμού τους στα άκαυστα του λιγνίτη, αλλά συνήθως παραμένουν εντός των αποδεκτών ορίων.

Πολλές εργασίες έχουν γίνει με αντικείμενο τη μελέτη της ραδιοβιολογικής επίπτωσης από την ιπτάμενη τέφρα που παράγεται στους σταθμούς αυτούς. Στην εργασία (Fotakis M. et al., 2008) διερευνάται η φυσική ραδιενέργεια 26 δειγμάτων τέφρας, που παράγονται από την εργαστηριακή καύση λιγνίτη, ο οποίος ελήφθη δειγματοληπτικά από το ορυχείο της Καρδιάς, στην περιοχή της Πτολεμαΐδας. Τα δείγματα θερμάνθηκαν για 2.5 έως 3 ώρες στους 850-900° C (θερμοκρασία καύσης στην μονάδα παραγωγής) με ρυθμό θέρμανσης 6°C/λεπτό και τα δείγματα τέφρας που παρήχθη αναλύθηκαν ως προς τα περιεχόμενα ραδιενεργά ισότοπα. Τα δείγματα τέφρας που παρήχθησαν κατά την καύση σφραγίστηκαν σε δοχεία Marinelli και αποθηκεύτηκαν για ένα μήνα προκειμένου να επιτευχθεί ραδιενεργός ισορροπία. Στη συνέχεια, μετρήθηκαν με την τεχνική της γ-φασματοσκοπίας. Επιπλέον, προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα σε τέφρα των δειγμάτων αρχικού λιγνίτη προκειμένου να διερευνηθεί η συσχέτιση μεταξύ της ραδιενέργειας της τέφρας και της αρχικής περιεκτικότητας του λιγνίτη σε τέφρα. Στον Πίνακα 2.6 παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν στα πλαίσια της εργασίας (Fotakis M. et al., 2008).

Σύμφωνα με τους (Fotakis M. et al., 2008) οι μέσες συγκεντρώσεις των ραδιενεργών ισotόπων στην ιπτάμενη τέφρα είναι 4-5 φορές υψηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές του λιγνίτη. Αυτή η διαφορά βρέθηκε να είναι στατιστικά σημαντική για όλα τα ραδιενεργά ισotόπα. Επιπλέον, όπως διαπιστώθηκε υπάρχει σχετικά υψηλή συσχέτιση μεταξύ των διαφόρων ραδιενεργών ισotόπων στις τέφρες. Ενδεικτικά αναφέρεται η συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων των  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  (με συντελεστή συσχέτισης  $R = 0.61$ ).

**Πίνακας 2.6** Ειδική ραδιενέργεια ιπτάμενης τέφρας από την εργαστηριακή καύση λιγνίτη του ορυχείου της Καρδιάς

Ραδιενεργά ισotόπα	Εύρος τιμών	Μέση τιμή $\pm \sigma$
$^{40}\text{K}$	75.8 - 523.3	251.8 $\pm$ 22.8
$^{235}\text{U}$	8.87 - 53.96	24.91 $\pm$ 2.26
$^{238}\text{U}$	159.4 - 1006	511.8 $\pm$ 41
$^{226}\text{Ra}$	138.4 - 896	412 $\pm$ 33.3
$^{228}\text{Ra}$	12.3 - 207.6	49.3 $\pm$ 7.3
$^{232}\text{Th}$	12.6 - 205.5	51.2 $\pm$ 7

Από τα ευρήματα της παραπάνω εργασίας επιβεβαιώνεται ότι τα ραδιενεργά ισotόπα τα οποία εξετάστηκαν συνδέονται στενά μεταξύ τους και παρουσιάζουν μια αναμενόμενη ομαδοποίηση, ανάλογα με τις ραδιενεργές σειρές στις οποίες ανήκουν.

Στα πλαίσια της ίδιας εργασίας και προκειμένου να διερευνηθεί το ποσοστό των ραδιενεργών ιχνοστοιχείων του λιγνίτη που μεταφέρεται από την τέφρα και τα καυσαέρια, υπολογίστηκε ο συντελεστής κατανομής ραδιενεργών ισotόπων (RPC: Radionuclide Partitioning Coefficient) για κάθε ισotόπο. Ο συντελεστής αυτός, που φαίνεται στον πίνακα 2.7 δείχνει το κλάσμα των ραδιενεργών ισotόπων που μεταφέρονται από τον λιγνίτη στην τέφρα του κατά τη διαδικασία της καύσης.

**Πίνακας 2.7** Συντελεστής κατανομής ραδιενεργών ισotόπων στην τέφρα (RPC)

Ραδιενεργό ισotόπο	Μέση τιμή $\pm \sigma$	Διάστημα εμπιστοσύνης
$^{40}\text{K}$	0.8 $\pm$ 0.059	0.68 - 0.92
$^{235}\text{U}$	0.73 $\pm$ 0.059	0.62 - 0.85
$^{238}\text{U}$	0.69 $\pm$ 0.055	0.58 - 0.8
$^{226}\text{Ra}$	0.70 $\pm$ 0.053	0.59 - 0.8
$^{228}\text{Ra}$	0.79 $\pm$ 0.059	0.67 - 0.91
$^{232}\text{Th}$	0.83 $\pm$ 0.052	0.73 - 0.93

Όπως φαίνεται, τα  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  και  $^{40}\text{K}$  έχουν τις υψηλότερες τιμές RPC καθώς συνδέονται περισσότερο ή λιγότερο, με το ανόργανο κλάσμα του λιγνίτη και ως εκ τούτου διατηρούνται περισσότερο στην τέφρα, σε σχέση με τα  $^{238}\text{U}$  και  $^{226}\text{Ra}$ , τα οποία συνδέονται με το οργανικό κλάσμα του λιγνίτη. Λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές RPC, οι συγγραφείς της εργασίας καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι κατά τη διάρκεια της καύσης του λιγνίτη, τα καυσαέρια μεταφέρουν περίπου το 30% των ραδιενεργών ισοτόπων της σειράς του  $^{238}\text{U}$ , το 20% των ισοτόπων της σειράς του  $^{232}\text{Th}$  και το 20% της σειράς  $^{40}\text{K}$ . Πάντως, πρέπει να επισημανθεί ότι τα αποτελέσματα αυτά αφορούν εργαστηριακή καύση του λιγνίτη και όχι καύση σε εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας.

Σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραπάνω εργασίας με αποτελέσματα άλλων εργασιών για την ίδια περιοχή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία, αναφορικά με τη ραδιενέργεια στις τέφρες, που κυμαίνεται για την περίπτωση του  $^{226}\text{Ra}$  στην περιοχή 138-896 Bq/kg, που κατατάσσει τις τέφρες αυτές μεταξύ των τεφρών με υψηλή ραδιενέργεια παγκοσμίως.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ετήσιες εκπομπές ιπτάμενης τέφρας από το σταθμό Καρδιάς που εκτιμώνται σε 21.400 τόνους, την εκτιμώμενη συγκέντρωση  $^{226}\text{Ra}$  στην ιπτάμενη τέφρα και την εγκατεστημένη ισχύ του σταθμού (4.3GW) εκτιμήθηκε η ποσότητα  $^{226}\text{Ra}$  που απελευθερώνεται ετησίως σε 2050 MBq/GW<sub>y</sub>. Αυτή η τιμή είναι περίπου οκτώ φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή για μοντέρνους θερμικούς σταθμούς, που εκτιμάται σε 250 MBq/GW<sub>y</sub>. Όσον αφορά στη δόση του πληθυσμού εξαιτίας της εκπεμπόμενης ιπτάμενης τέφρας, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (UNSCEAR, 1988), η μέγιστη δόση λόγω των ισοτόπων της σειράς του  $^{232}\text{Th}$  έχει εκτιμηθεί σε 0.10 μSv/GW<sub>y</sub> και λόγω των ισοτόπων της σειράς του  $^{238}\text{U}$  σε 0.08 μSv/GW<sub>y</sub>. Με δεδομένη την εγκατεστημένη ισχύ στην περιοχή η ετήσια δόση εκτιμάται σε 0.8 μSv, που αντιστοιχεί περίπου στο 3% της ετήσιας ενεργού δόσης για το μέσο άνθρωπο παγκοσμίως, δηλαδή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

#### *2.2.4.3 Μελέτη της ραδιοβιολογικής επιβάρυνσης από τους θερμικούς σταθμούς της περιοχής Πτολεμαΐδας*

Η εργασία (Parastefanou C., 1996) ασχολείται με τη ραδιοβιολογική επίπτωση από το  $^{226}\text{Ra}$  που διαφεύγει από τις καπνοδόχους τεσσάρων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής που βρίσκονται εγκατεστημένοι στην κοιλάδα της Πτολεμαΐδας, συνολικής ισχύος 3.620 MW ενέργειας. Στον Πίνακα 2.8 παρατίθενται στοιχεία για τους σταθμούς αυτούς, την κατανάλωση λιγνίτη και τα επίπεδα ραδιενέργειας του λιγνίτη και της παραγόμενης τέφρας, καθώς και την ποσότητα της τέφρας που απελευθερώνεται στο περιβάλλον από τις καπνοδόχους των σταθμών, σύμφωνα με την παραπάνω εργασία. Οι μετρήσεις της ραδιενέργειας των υπό εξέταση ραδιενεργών ισοτόπων έδειξαν ότι η ειδική ραδιενέργεια του  $^{226}\text{Ra}$  κυμαινόταν, στους μεν λιγνίτες μεταξύ 44 και 236 Bq/kg, με μέση τιμή 133 Bq/kg, στις δε τέφρες μεταξύ 142 και 605 Bq/kg, με μέση τιμή τα 366Bq/kg.

Όπως έχει αναφερθεί και σε άλλες εργασίες, ο ελληνικός λιγνίτης είναι χαμηλής ποιότητας και η περιεκτικότητα σε τέφρα κυμαίνεται από 28.8% έως 41.6%. Κατά τη διαδικασία καύσης, το 20% της τέφρας καθιζάνει στον πυθμένα του καυστήρα ως τέφρα βάσης (σκωρία ή υγρή τέφρα) ενώ το 80% φεύγει ως ιπτάμενη τέφρα με τα καυσαέρια και το μεγαλύτερο ποσοστό της κατακρατείται στα φίλτρα. Οι μονάδες παραγωγής κατά την περίοδο εκπόνησης της έρευνας ήταν εξοπλισμένες με ηλεκτροστατικά φίλτρα που είχαν συντελεστή κατακράτησης της ιπτάμενης τέφρας περίπου 98%, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση μόνο του 2% της ιπτάμενης τέφρας στην ατμόσφαιρα. Η απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα του  $^{226}\text{Ra}$  ανά μονάδα παραγωγής ενέργειας εκτιμήθηκε σε περίπου 2.918 MBq/GW<sub>y</sub>.

Σύμφωνα με την έκθεση (UNSCEAR, 1982), η εκτιμώμενη ατμοσφαιρική απόρριψη  $^{226}\text{Ra}$  ανά μονάδα ενέργειας και ανά έτος ήταν περίπου 1.500 MBq/GW<sub>y</sub>. Αντίστοιχα, στη νεότερη έκθεση (UNSCEAR, 1988), αναφέρεται ότι για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής παλαιού τύπου εκτιμάται ότι απελευθερώνονται 5.000 MBq/GW<sub>y</sub>, ενώ για σύγχρονους σταθμούς 250 MBq/GW<sub>y</sub>. Η τιμή 2.918 MBq/GW<sub>y</sub> του  $^{226}\text{Ra}$  που διέφευγαν εκείνη την εποχή από τις μονάδες που λειτουργούσαν στην κοιλάδα της Πτολεμαΐδας είναι περίπου 12 φορές υψηλότερη από αυτή που αντιστοιχούσε στις τότε σύγχρονες μονάδες.

**Πίνακας 2.8** Ραδιενέργεια  $^{226}\text{Ra}$  που απελευθερώνεται από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής στην Πτολεμαΐδα

Σταθμός	Ισχύς Σταθμού σε MW	Καύση λιγνίτη σε $10^9$ kg/y	Καύση λιγνίτη $10^9$ kg/GW <sub>y</sub>	Ειδική ραδιενέργεια $^{226}\text{Ra}$				Απελευθέρωση $^{226}\text{Ra}$ MBq/GW <sub>y</sub>
				Λιγνίτης		Ιπτάμενη τέφρα		
				Εύρος Bq/kg <sup>-1</sup>	Μέση τιμή Bq/kg <sup>-1</sup>	Εύρος Bq/kg <sup>-1</sup>	Μέση τιμή Bq/kg <sup>-1</sup>	
<b>Πτολεμαΐδα</b>	620	6.60	10.65	44-173	105	193-299	257	3698
<b>Καρδιά</b>	1200	13.00	10.83	154-236	175	430-495	463	5250
<b>Άγιος Δημήτριος</b>	1200	12.35	10.29	188-206	160	570-605	592	2167
<b>Αμόνταιο</b>	600	7.60	12.67	69-142	92	142-165	453	557

Στον Πίνακα 2.9 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοσιμετρικών υπολογισμών που περιγράφονται στην εργασία (Papastefanou C., 1996) αναφορικά με την επιβάρυνση του πληθυσμού από την απελευθέρωση της ιπτάμενης τέφρας.

Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.9, στην περίπτωση των πνευμόνων, η συλλογική ισοδύναμη δόση για το  $^{226}\text{Ra}$  ήταν περίπου 3 φορές υψηλότερη από εκείνη που αναφέρεται στην έκθεση (UNSCEAR 1982) και 15 φορές υψηλότερη από εκείνη που αντιστοιχεί σε μια σύγχρονη για την εποχή εκείνη μονάδα (UNSCEAR 1988). Αυτό αποδίδεται στην υψηλότερη έκλυση  $^{226}\text{Ra}$  ανά μονάδα παραγωγής ενέργειας. Έτσι, η συλλογική ισοδύναμη δόση που οφείλεται στο  $^{226}\text{Ra}$  ανά έτος εκτιμάται ότι είναι στα 0.04 manSv. Τέλος, σύμφωνα με την παραπάνω εργασία, η κύρια αιτία της ισοδύναμης δόσης στον πνευμονικό ιστό ήταν η εισπνοή κατά τη διέλευση του νέφους. Η συλλογική ισοδύναμη δόση από την εισπνοή του  $^{226}\text{Ra}$  στον

πνευμονικό ιστό ήταν περίπου 34 φορές υψηλότερη από εκείνη που αντιστοιχεί στην εσωτερική ακτινοβολία λόγω της ραδιενέργειας που αποτίθεται στο έδαφος.

**Πίνακας 2.9** Συλλογική δεσμευμένη δόση και ισοδύναμη δόση στον πνευμονικό ιστό ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος εξαιτίας των ατμοσφαιρικών εκλύσεων <sup>226</sup>Ra

	Εισποχή κατά τη διάρκεια της διάρκειας της διέλευσης του νέφους		Εσωτερική ακτινοβολία λόγω της κατατεθείσας ραδιενέργειας		
	Έκλυση <sup>226</sup> Ra MBq (GW/y)	10 <sup>-3</sup> Gy/ (GW/y) ανά άτομο	10 <sup>-3</sup> Sv/ (GW/y) ανά άτομο	10 <sup>-3</sup> Gy/ (GW/y) ανά άτομο	10 <sup>-3</sup> Sv/ (GW/y) ανά άτομο
<b>Πτολεμαΐδα</b>	2.918	4.0	11.0	0.07	0.33
<b>UNSCEAR 1982</b>	1.500	1.4	4.0	0.2	9.0
<b>UNSCEAR<sup>a</sup></b>	5.000	-	13.0	-	30.0
<b>UNSCEAR<sup>b</sup></b>	250	-	0.7	-	1.5

a: Παλιού τύπου ηλεκτροπαραγωγός σταθμός

b: Νέου τύπου ηλεκτροπαραγωγός σταθμός

#### 2.2.4.4. Μελέτη της κατανομής ραδιενεργών ισοτόπων στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα της ιπτάμενης τέφρας

Η συμπεριφορά των διαφόρων ραδιενεργών ισοτόπων κατά τη διάρκεια της καύσης είναι διαφορετική, λόγω των διαφορετικών φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των αντίστοιχων στοιχείων, με συνέπεια και η συγκέντρωσή τους να μην είναι η ίδια στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα της ιπτάμενης τέφρας. Καθώς κατά μήκος του συστήματος απαγωγής καυσαερίων ενός ΑΗΣ συλλέγονται τέφρες με διαφορετικά γενικά χαρακτηριστικά, αλλά και διαφορετική κοκκομετρία, έχει ενδιαφέρον να μελετηθεί η διαφοροποίηση της ειδικής ραδιενέργειας της ιπτάμενης τέφρας που συλλέγεται σε διάφορες θέσεις εντός του ΑΗΣ.

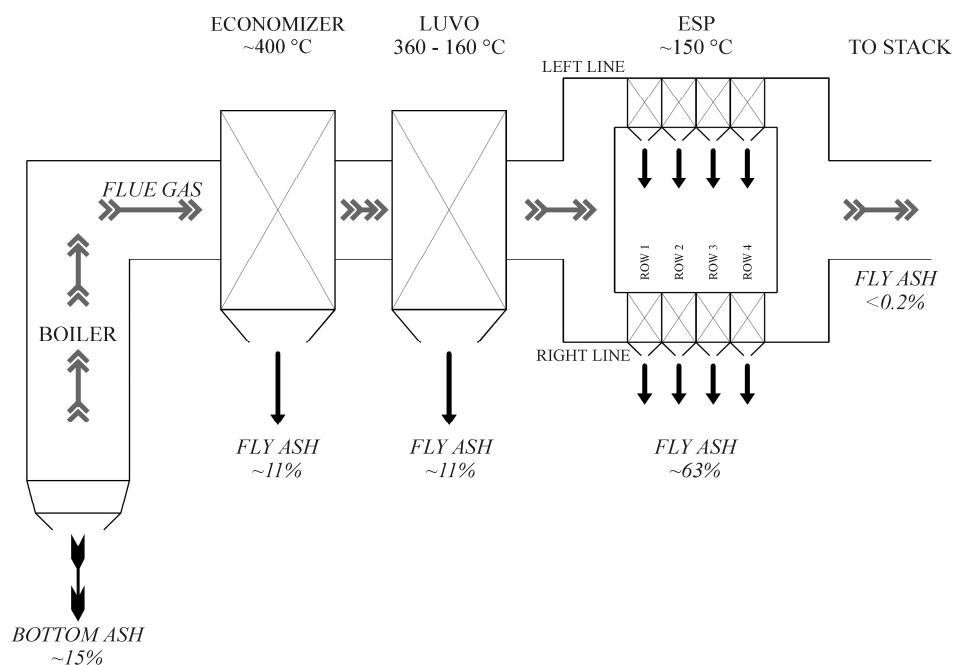


**Σχήμα 2.7** Χάρτης του λιγνιτικού πεδίου Μεγαλόπολης

Στη συνέχεια της παραγράφου παρατίθενται τα αποτελέσματα μίας εργασίας (Karangelos D.J. at al., 2004) που αφορούν στην μελέτη της κοκκομετρικής κατανομής των διαφόρων ραδιενεργών ισοτόπων στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης Β. Ο ΑΗΣ αυτός βρίσκεται στην περιοχή της Μεγαλόπολης στο κέντρο της Πελοποννήσου, περίπου 5 χιλιόμετρα βορειοδυτικά της πόλης. Στο Σχήμα 2.8 διακρίνονται οι θέσεις δειγματοληψίας μέσα στον ΑΗΣ Β Μεγαλόπολης, ενώ στον Πίνακα 2.10 παρατίθενται οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας της τέφρας που συλλέχθηκε από τις διάφορες θέσεις δειγματοληψίας μέσα στο σταθμό.

Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.10, η τέφρα από τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης περιέχει πράγματι σημαντικά επίπεδα ραδιενέργειας  $^{226}\text{Ra}$ , τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να υπερβούν ακόμη και τα 1000 Bq/kg. Ιδιαίτερα για τον  $^{210}\text{Pb}$ , θυγατρικό του  $^{226}\text{Ra}$  οι τιμές της ραδιενέργειας μπορεί να είναι πολύ υψηλότερες, ειδικότερα στα τελευταία στάδια της ροής των καυσαερίων όπου συλλέγεται και το πλέον λεπτόκοκκο κλάσμα της ιπτάμενης τέφρας, με αποτέλεσμα τη σημαντική διαταραχή της ραδιενεργού ισορροπίας. Η ειδική ραδιενέργεια της σειράς του θορίου είναι σημαντικά χαμηλότερη στην ιπτάμενη τέφρα, ενώ η ειδική ραδιενέργεια του  $^{40}\text{K}$  είναι γενικά συγκρίσιμη με τις τιμές που έχουν αναφερθεί για τους άλλους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.

Επιβεβαιώνεται λοιπόν ότι η ιπτάμενη τέφρα, ακόμη και όταν προέρχεται από ένα σταθμό ηλεκτροπαραγωγής δεν είναι ομοιογενής όσον αφορά τη ραδιενέργεια.



**Σχήμα 2.8** Θέσεις δειγματοληψίας μέσα στον ΑΗΣ Β Μεγαλόπολης

Αυτό οφείλεται εν μέρει στη μεταβλητότητα της ραδιενέργειας των συγκεντρώσεων στον λιγνίτη, καθώς και στις διακυμάνσεις των παραμέτρων λειτουργίας των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά κυρίως φυσικές και χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά μήκος της οδού καυσαερίων, όπως η εξάτμιση και συμπύκνωση των διαφόρων στοιχείων που βρίσκονται στο αρχικό καύσιμο.

**Πίνακας 2.10** Ειδική ραδιενέργεια της ιπτάμενης τέφρας σε διάφορες θέσεις μέσα στον ΑΗΣ Β Μεγαλόπολης

Θέση	Μέγεθος δείγματος	Ειδική ραδιενέργειας (Bq/kg) (εύρος τιμών, μέση τιμή ± σφάλμα(%))										
		<sup>238</sup> U		<sup>226</sup> Ra		<sup>210</sup> Pb		<sup>232</sup> Th		<sup>40</sup> K		
<b>Economiser</b>	12	689–842	771±7	763–922	863±7	396–638	538±17	54–61	56±5	464–583	508±7	
<b>LUVO</b>	15	609–968	794±10	685–1091	896±11	439–635	539±11	53–61	57±6	464–583	520±7	
<b>ESP lef line</b>	Row 1	27	747–926	859±10	754–1051	876±9	631–1662	1068±24	47–59	54±6	372–528	466±9
	Row 2	16	758–1030	934±9	690–1006	893±9	1373–1912	1717±10	47–56	53±6	414–513	444±6
	Row 3	13	743–1297	1053±16	747–1127	987±12	1568–3355	2119±29	41–56	53±10	299–413	387±10
	Row 4	4	781–1086	934±23	626–853	739±22	1974–2834	2404±25	44–54	49±14	465–508	487±6
<b>ESP right line</b>	Row 1	29	697–1037	870±12	670–1041	885±14	733–1746	1167±23	50–60	54±5	410–583	463±10
	Row 2	22	862–1132	1001±10	783–1110	963±10	1340–2549	1848±19	51–57	54±4	397–470	441±6
	Row 3	15	993–1443	1155±15	926–1288	1067±12	1783–3192	2252±21	52–57	55±3	397–435	424±3
	Row 4	3	698–1115	906±32	546–761	654±23	1825–2735	2380±28	53–55	54±3	545–642	594±11

Όσον αφορά τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας, μπορεί να λεχθεί ότι έχουν πραγματοποιηθεί ένα πλήθος από εργαστηριακές αναλύσεις και θεωρητικοί υπολογισμοί με στόχο την εκτίμηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας στην Ελλάδα στην παραγωγή τσιμέντου, κατασκευή οδικών έργων και κατασκευή πλίνθων. Τα αποτελέσματα δείχνουν σαφώς ότι η συνολική χρησιμοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στη χώρα είναι χαμηλότερη από το 40% της συνολικά παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας. Αν και η ελληνική ιπτάμενη τέφρα είναι γνωστό ότι περιέχει αυξημένα επίπεδα ραδιενέργειας, ιδιαίτερα <sup>226</sup>Ra, μελέτες δείχνουν ότι μπορεί να χρησιμοποιείται με ασφάλεια σε τσιμέντο σε λογικές ποσότητες. Επιπλέον, άλλα ιχνοστοιχεία περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος δεν εμφανίστηκαν σε ακραίες συγκεντρώσεις. Ωστόσο, πρέπει να διεξαχθεί λεπτομερέστερη έρευνα, καθώς τα αποτελέσματα μέχρι σήμερα δείχνουν ότι τα επίπεδα ραδιενέργειας στην ιπτάμενη τέφρα μπορεί ποικίλλουν σημαντικά, ανάλογα με τη θέση δειγματοληψίας εντός ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού. Για άλλες χρήσεις εκτός από τη βιομηχανία τσιμέντου, ελάχιστες έρευνες των ραδιολογικών επιπτώσεων έχουν μέχρι στιγμής πραγματοποιηθεί. Αυτό δεν προκαλεί έκπληξη, καθώς οι χρήσεις αυτές είναι μάλλον περιορισμένες στην Ελλάδα.

Καθώς – όπως προαναφέρθηκε – η ιπτάμενη τέφρα συνήθως χρησιμοποιείται στην παρασκευή τσιμέντου, έχει σημασία η μελέτη της ραδιοβιολογικής επιβάρυνσης εξαιτίας της χρήσης τέφρας στο τσιμέντο. Στον Πίνακα 2.11 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα εκτιμήσεων που έχουν γίνει στην εργασία (Karangelos D. et al., 2004) αναφορικά με το μέγιστο ποσοστό ιπτάμενης τέφρας που επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο κατά την παραγωγή τσιμέντου, προκειμένου να μην ξεπεραστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του Radiation Performance Index I για οικοδομικά υλικά.



**Πίνακας 2.11** Εκτιμώμενο μέγιστο επιτρεπόμενο κλάσμα ιπτάμενης τέφρας σε τσιμέντο

Προέλευση ιπτάμενης τέφρας	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	Μέγιστο ποσοστό τέφρας (%)
<b>Ειδική ραδιενέργεια (Bq/kg)</b>				
Καρδιά	600	49	218	100
<b>Μεγαλόπολη</b>				
ESP	904	52	454	68
Air preheater	869	57	520	70
Economiser	863	56	508	71
Πτολεμαΐδα	263	45	252	100

Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του πίνακα, η ιπτάμενη τέφρα από την Πτολεμαΐδα και την Καρδιά μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς περιορισμούς, ενώ η τέφρας της Μεγαλόπολης μπορεί να χρησιμοποιηθεί έως και 70%. Πάντως, επισημαίνεται ότι στην πράξη, τα όρια χρήσης της ιπτάμενης τέφρας στην παρασκευή τσιμέντου δεν υπερβαίνουν 20-30%. Το ποιοτικό συμπέρασμα που μπορεί να αντληθεί από τα παραπάνω είναι ότι από ραδιολογικής άποψης, η ελληνική ιπτάμενη τέφρα μπορεί ασφαλώς να χρησιμοποιηθεί σε σκυρόδεμα σε σημαντικό βαθμό. Ωστόσο, οι μετρήσεις ραδιενέργειας της ιπτάμενης τέφρας, ιδιαίτερα όταν αυτή χρησιμοποιείται ως πρόσθετο στην παραγωγή τσιμέντου πρέπει να πραγματοποιούνται συστηματικά, καθώς οι πηγές του λιγνίτη (ορυχεία) διαφοροποιούνται με το χρόνο, με προφανείς επιπτώσεις στα χαρακτηριστικά και τα επίπεδα ραδιενέργειας της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας. Επισημαίνεται ότι οι τιμές της ραδιενέργειας του <sup>226</sup>Ra στο ελληνικό μαύρο τσιμέντο κυμαίνονται από 29 έως 147 Bq/kg (Louizi A., et al., 1995).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΕΞΟΡΥΞΗ ΒΩΞΙΤΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

#### 3.1 Εισαγωγή

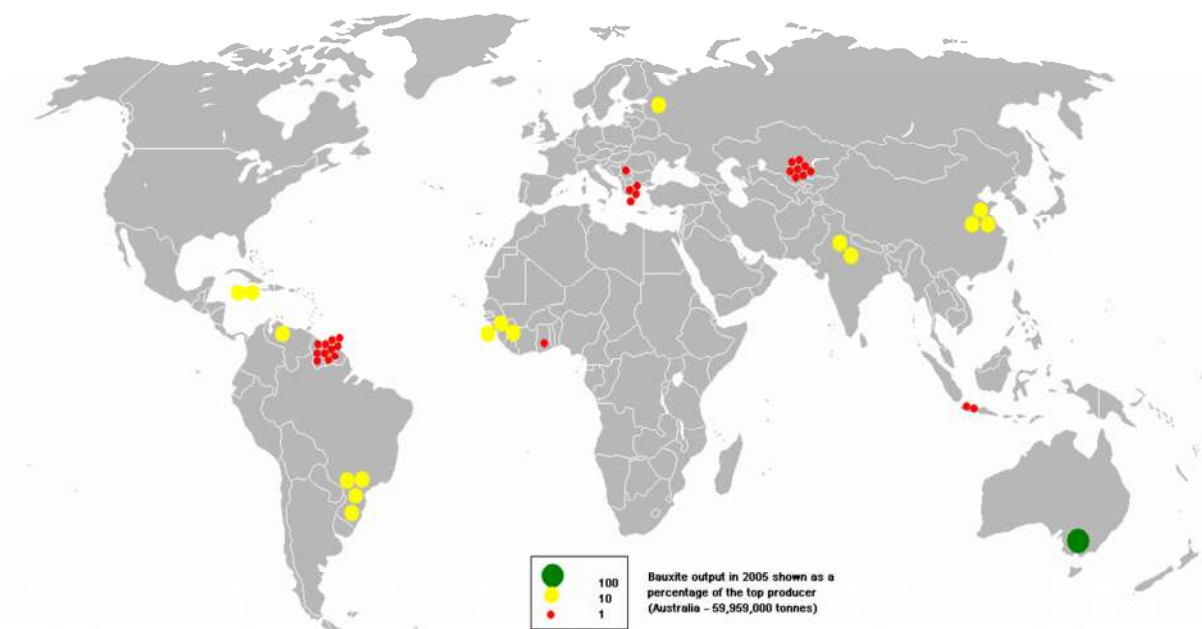
Ο βωξίτης είναι το κύριο μέταλλευμα για την παραγωγή αλουμινίου και δεν έχει συγκεκριμένη σύνθεση. Είναι ένα μίγμα από ένυδρα οξείδια αλουμινίου, υδροξείδιο αλουμινίου, ορυκτά αργίλου και αδιάλυτα υλικά όπως: χαλαζίας, αιματίτης, μαγνητίτης, σιδηρίτης κλπ. Τα μεταλλεύματα αλουμινίου στο βωξίτη μπορούν να περιλαμβάνουν ακόμα γύψο. Σχεδόν όλο το αλουμίνιο που έχει παραχθεί παγκοσμίως μέχρι σήμερα έχει εξαχθεί από βωξίτη.



**Σχήμα 3.1** Μέταλλευμα βωξίτη

Η παραγωγή βωξίτη γίνεται με εξόρυξη του βράχου. Στη συνέχεια, ο βωξίτης θρυμματίζεται και ακολουθεί πλύση πριν καταλήξει στην τελική επεξεργασία και απομόνωση του αλουμινίου. Ο βωξίτης εξορύσσεται σε αρκετές χώρες του κόσμου (Σχήμα 3.2), με τη μεγαλύτερη παραγωγή χώρα να είναι η Αυστραλία με παραγωγή περί τους 81000 τόνους ανά έτος, ακολουθούμενη από την Κίνα με παραγωγή 47000 τόνους ανά έτος. Η Ελλάδα βρίσκεται στην 11<sup>η</sup> θέση παγκοσμίως με 2100 τόνους ετησίως.

Η φυσική ραδιενέργεια που υπάρχει στο μέταλλευμα του βωξίτη, η οποία σχετίζεται με την περιεκτικότητα θορίου, ουρανίου και καλίου, μεταφέρεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στα στερεά κατάλοιπα της επεξεργασίας του βωξίτη. Τα κατάλοιπα αυτά περιλαμβάνουν κατά ένα μέρος λάσπη – η οποία είναι γνωστή ως «ερυθρά ιλύς» λόγω του χρώματός της – στην οποία μεταφέρεται το μεγαλύτερο ποσοστό της ραδιενέργειας του βωξίτη, και ένα μέρος υπολειμμάτων άμμου χαμηλής ραδιενέργειας. Συνεπώς, τόσο το μέταλλευμα βωξίτη, τα υλικά επεξεργασίας πριν από την κατακρήμνιση, τα υπολείμματα λάσπης και τα υπολείμματα άμμου παρουσιάζουν ραδιολογικό ενδιαφέρον. Οι πιθανές ραδιολογικές επιπτώσεις από την εξόρυξη και την επεξεργασία του βωξίτη οφείλονται κυρίως στην παρουσία των ισοτόπων των σειρών του  $^{232}\text{Th}$  και  $^{238}\text{U}$ , ενώ υπάρχει σχετικά μικρή συνεισφορά του  $^{40}\text{K}$ . Η κατά προσέγγιση μέση ραδιενέργεια  $^{40}\text{K}$  στο βωξίτη είναι χαμηλή, περί τα 0.062 Bq/g – πολύ χαμηλότερη από τη μέση τιμή για το χώμα – η οποία οδηγεί σε ασήμαντη ετήσια ενεργό δόση (0.005 mSv) ενός εργαζομένου για έκθεση 1920 ωρών.



1. **Σχήμα 3.2** Παγκόσμια παραγωγή βωξίτη κατά το 2005  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_countries\\_by\\_bauxite\\_production](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_bauxite_production)

Στον Πίνακα 3.1 παρατίθεται η τυπική σύσταση της ερυθράς ιλύος, ενώ στον πίνακα 3.2 που ακολουθεί παρατίθενται τυπικές τιμές της ειδικής ραδιενέργειας της ερυθράς ιλύος και του βωξίτη.

**Πίνακας 3.1** Τυπική σύσταση της ερυθράς ιλύος

Οξείδιο μετάλλου	Ποσοστό	Παρατηρήσεις
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (iron oxide)	40–45%	Δίνει το κόκκινο χρώμα της ιλύος
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (aluminium oxide)	10–15%	Μη εκχυλισμένο οξείδιο του αλουμινίου
SiO <sub>2</sub> (silicon dioxide)	10–15%	Εμφανίζεται ως αργιλοπυριτικό νάτριο ή ασβέστιο
CaO (calcium oxide)	6–10 %	
TiO <sub>2</sub> (titanium dioxide)	4–5 %	Προσμίξεις που υπάρχουν στο βωξίτη
Na <sub>2</sub> O	5–6 %	Υπεύθυνο για το υψηλό pH και τα χημικά εγκαύματα

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται μία σειρά από μελέτες σχετικές με τη ραδιοβιολογική επιβάρυνση από την εξόρυξη και επεξεργασία του βωξίτη, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες χώρες. Σε ορισμένες από τις μελέτες αυτές δίνονται και στοιχεία για τη ραδιενέργεια των σχετικών NORM υλικών, ενώ σε άλλες γίνονται απλώς εκτιμήσεις για τη γενικότερη επιβάρυνση των εργαζομένων του κοινού και γενικότερα του περιβάλλοντος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει μία μελέτη που έχει γίνει με την ευκαιρία της διαρροής ερυθράς ιλύος, μετά από ατύχημα σε εγκατάσταση απόθεσης.

**Πίνακας 3.2** Τυπικά επίπεδα ειδικής ραδιενέργειας της ερυθράς ιλύος και του βωξίτη (Konacs T. et al., 2013).

Υλικό	Συγκέντρωση ραδιενέργειας [kBq kg <sup>-1</sup> ]			Αναφορές
	<sup>238</sup> U	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	
Βωξίτη	0.25	-	0.20	UNSCEAR 1988
	0.4-0.6	-	0.3-0.4	UNSCEAR 2000
Βωξίτης από Κίνα	0.46	0.31	0.37	Scholten et al. 1993
Βωξίτης από Γουιάνα	0.08	0.05	0.23	Scholten et al. 1993
Βωξίτης (τυπικό)	0.50	0.40	0.40	Scholten et al. 1993
Ερυθρή ιλύς	0.28	-	0.18	UNSCEAR 1988
Ερυθρή ιλύς	0.26-0.54	0.12-0.34	0.34-0.50	Sorantin & Steger 1984

### 3.2 Αξιολόγηση της ραδιοβιολογικής επιβάρυνσης από την εξόρυξη και επεξεργασία του βωξίτη στην Αυστραλία

Καθώς η Αυστραλία είναι η πρώτη χώρα στον κόσμο σε παραγωγή αλουμινίου, ήταν αναμενόμενο να υπάρχει και έντονη ερευνητική δραστηριότητα αναφορικά με τις αντίστοιχες επιπτώσεις. Στην εργασία (O'Connor B.H. et al., 2013) παρουσιάζεται μία τέτοια έρευνα, που επικεντρώνεται στην ραδιολογική αξιολόγηση κατά την εξόρυξη βωξίτη και την παραγωγή του αλουμινίου. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν δύο ορυχεία και τρεις εγκαταστάσεις επεξεργασίας βωξίτη στη νοτιοδυτική Αυστραλία. Τα ορυχεία βρίσκονται στην περιοχή Darling ενώ η επεξεργασία πραγματοποιείται στην παράκτια πεδιάδα του Swan, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.



**Σχήμα 3.3** Θέσεις παραγωγής και επεξεργασίας βωξίτη που μελετήθηκαν

Οι παραλλαγές στην υποκείμενη γεωλογία της κάθε περιοχής έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις θορίου και ουρανίου ανάμεσα στα διάφορα ορυχεία, και κατά συνέπεια στο επίπεδο ακτινοβολίας του φυσικού υποβάθρου, το οποίο έχει ληφθεί υπόψη στη μελέτη αυτή. Οι θέσεις των διαφόρων εγκαταστάσεων, ταξινομημένες με βάση το επίπεδο γ-ακτινοβολίας του υποβάθρου είναι:

1. Huntly, Willowdale and Wagerup
2. Pinjarra
3. Kwinana

Στα πλαίσια της εργασίας (O'Connor B. Et al., 2013), οι μετρήσεις της γ-ακτινοβολίας και του ραδονίου που εκρέει από το έδαφος στον αέρα πραγματοποιήθηκαν με παθητικούς ανιχνευτές. Συγκεκριμένα, η μετρήσεις της δόσης λόγω γ-ακτινοβολίας έγιναν με Optically Stimulated Luminescence (OSL) monitor, ενώ οι μετρήσεις ραδονίου έγιναν με alpha track detectors. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν για τρεις περιόδους, από το Σεπτέμβριο 2008 έως τον Αύγουστο του 2009.

Στον πίνακα 3.3 παρατίθενται οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας του βωξίτη και των υπολειμμάτων επεξεργασίας για τα διάφορα ορυχεία και εργοστάσια επεξεργασίας της παραπάνω εργασίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τους πατρικούς πυρήνες των ραδιενεργών σειρών  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$  και υπογραμμίζουν την ανάγκη για συστηματική παρακολούθηση των υλικών αυτών, καθώς σε ορισμένα από αυτά η συγκέντρωση υπερβαίνει το 1 Bq/g και κατά συνέπεια πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα

**Πίνακας 3.3** Περιεκτικότητα σε ουράνιο και θόριο και ειδική ραδιενέργεια  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$  του βωξίτη και των υπολειμμάτων της επεξεργασίας του

Μονάδα επεξεργασίας	Ορυχείο	Υλικό	Th και U (ppm) *		Ραδιενέργεια (Bq /g)**	
			Th	U	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$
Kwinana	Huntly	Βωξίτης	99	5.7	0.40	0.07
		Υπολείμματα ιλύος	292	16	1.19	0.20
		Υπολείμματα άμμου	95	1.6	0.39	0.02
Pinjarra	Huntly	Βωξίτης	108	6,6	0.44	0.08
		Υπολείμματα ιλύος	257	15	1.05	0.19
		Υπολείμματα άμμου	94	3,4	0.38	0.04
Wagerup	Huntly	Βωξίτης	186	34	0.76	0.41
		Υπολείμματα ιλύος	442	54	1.80	0.66
		Υπολείμματα άμμου	174	14	0.71	0.17

\*Χημικές συγκεντρώσεις που προσδιορίστηκαν με φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων X - μέσες συγκεντρώσεις για την περίοδο 2001 - 2004 από περιοδική δειγματοληψία κάθε ρεύματος

\*\*Εκτιμούμενες ειδικές ραδιενέργειες των πατρικών πυρήνων της κάθε ραδιενεργού σειράς, υπό την προϋπόθεση ραδιενεργού ισορροπίας. Για τους πατρικούς πυρήνες ισχύει:  $^{232}\text{Th}$ : 0.004075 (Bq/g) ανά ppm και  $^{238}\text{U}$ : 0.012348 (Bq/g) ανά ppm

Στον Πίνακα 3.4 που ακολουθεί γίνεται σύγκριση της έκθεσης λόγω της φυσικής ραδιενέργειας του περιβάλλοντος και της μέσης ετήσιας επαγγελματικής έκθεσης για τις τοποθεσίες εξόρυξης και επεξεργασίας βωξίτη.

**Πίνακας 3.4** Έκθεση λόγω της ραδιενέργειας περιβάλλοντος και μέση ετήσια επαγγελματική έκθεση για τις τοποθεσίες εξόρυξης και επεξεργασίας βωξίτη

Τοποθεσία	Δόση υποβάθρου (ετήσιος μέσος όρος)			Ετήσια επαγγελματική έκθεση (mSv)			Σύνολο
	Δόση λόγω ακτινοβολίας-γ (μGy/h)	Ραδόνιο (Bq/m <sup>3</sup> )	Ολική ακτινοβολία-α	Ακτινοβολία-γ	Θυγατρικά ραδονίου	Ολική ακτινοβολία-α	
<b>Ορυχεία</b>							
Huntly	0.14	10	0.07	0.27	0.12	0.001	0.39
Willowdale	0.15	22		0.29	0.26		0.55
<b>Εγκαταστάσεις επεξεργασίας και διαχείρισης υπολειμμάτων</b>							
Kwinana	0.10	10	0.34	0.12	0.12	0.006	0.25
Pinjarra	0.10	12	0.32	0.19	0.14	0.005	0.34
Wagerup	0.14	15	0.44	0.27	0.18	0.008	0.46

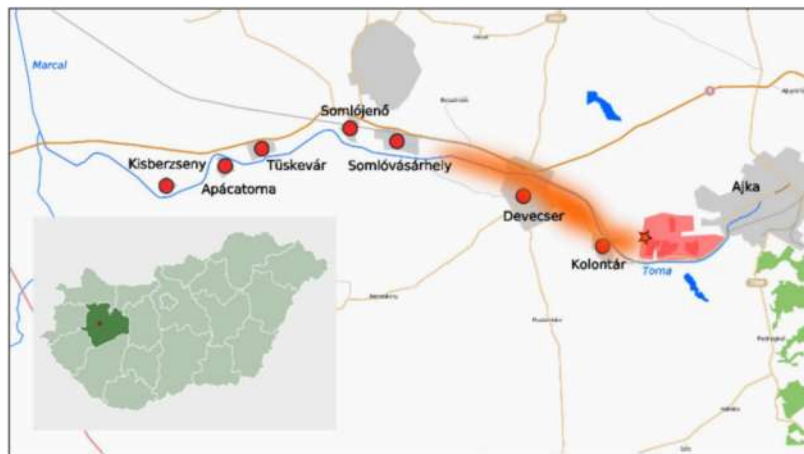
Οι δόσεις υποστρώματος του πίνακα αντιστοιχούν απλά και μόνο στην παρουσία των εργατών στο χώρο εργασίας κατά τη διάρκεια των κανονικών ωρών εργασίας, ανεξάρτητα από την ανάληψη συγκεκριμένης εργασίας. Η συνολική επαγγελματική δόση του υποβάθρου κυμαίνεται από 0.25 – 0.55 mSv/έτος. Για να συγκριθεί η δόση αυτή λόγω του υποβάθρου στο χώρο εργασίας πρέπει να αναφερθεί ότι η δόση λόγω της έκθεσης του κοινού εκτιμάται σε 1.1 – 2.5 mSv/έτος για συνεχή έκθεση πάνω από 8760 ώρες, η οποία είναι σε καλή συμφωνία με την τιμή 2.4mSv έτος (UNSCEAR, 2000 - Παράρτημα Β) που οφείλεται κυρίως στην εσωτερική έκθεση σε θυγατρικά ραδονίου και την εξωτερική έκθεση λόγω της γ-ακτινοβολίας του εδάφους.

Οι συνολικές ετήσιες δόσεις μπορούν τώρα να υπολογιστούν για τους εργαζόμενους σε αυτές τις εγκαταστάσεις οι οποίοι ζουν στην περιοχή Darling, κάτι που επιτρέπει να γίνουν μία σειρά από συγκρίσεις. Για παράδειγμα, όπως προκύπτει η συνολική ετήσια δόση ενός εργαζομένου στις εγκαταστάσεις της Pinjarra που ζει στην ακτή ή στην περιοχή Darling είναι συγκρίσιμη με εκείνη των ανθρώπων που εργάζονται και ζουν στις ίδιες κοινότητες. Αυτές οι συνολικές ετήσιες δόσεις είναι παρόμοιες ή χαμηλότερες από τον παγκόσμιο μέσο όρο των 2.4mSv/έτος (UNSCEAR, 2000).

### 3.3 Μελέτη της ραδιοβιολογικής επιβάρυνσης από το ατύχημα στην εγκατάσταση απόθεσης ερυθράς ιλύος στην περιοχή Alka της Ουγγαρίας

Εκτός από τα προβλήματα που παρουσιάζονται σε εγκαταστάσεις που παράγουν NORM σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, ιδιαίτερα προβλήματα μπορούν να εμφανισθούν σε έκτακτες

καταστάσεις ή σε συνθήκες ατυχήματος. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ένα ατύχημα που αφορά στην αστοχία δεξαμενής αποθήκευσης ερυθράς ιλύος, το οποίο συνέβη στις 4 Οκτωβρίου το 2010 στην περιοχή Ajka της Ουγγαρίας. Πιο συγκεκριμένα, η βορειοδυτική γωνία του φράγματος της δεξαμενής με αριθμό 10 κατέρρευσε, απελευθερώνοντας περίπου ένα εκατομμύριο κυβικά μέτρα υγρών αποβλήτων ερυθράς ιλύος. Η ιλύς απελευθερώθηκε ως κύμα με ύψος 1-2 m, πλημμυρίζοντας μεγάλη έκταση στην περιοχή, συμπεριλαμβανομένου του χωριού Kolontár και της πόλης Devcser. Εξαιτίας του ατυχήματος δέκα άτομα έχασαν τη ζωή τους και 150 τραυματίστηκαν. Εκτιμάται ότι από τη διαρροή επηρεάστηκαν περίπου 40 τετραγωνικά χιλιόμετρα αρχικά, ενώ μέχρι τις 7 Οκτωβρίου η διαρροή έφτασε στον Δούναβη.



**Σχήμα 3.4** Χάρτης της περιοχής, όπου διακρίνεται η διαδρομή της ερυθράς ιλύος

Η ερυθρά ιλύς περιέχει κυρίως οξείδιο του σιδήρου, όπου προέρχεται το κόκκινο χρώμα, άλλες ενώσεις που υπάρχουν στο μετάλλευμα βωξίτη και παραμένουν ως κατάλοιπο μετά τη διύλιση, υδροξείδιο του νατρίου που χρησιμοποιείται για τη διάλυση του οξειδίου του αλουμινίου και άλλα ιχνοστοιχεία. Οι κύριες επιπτώσεις της στην υγεία του ανθρώπου είναι χημικής προέλευσης καθώς αναφέρθηκαν ότι 80-90 άνθρωποι μεταφέρθηκαν στο νοσοκομείο με χημικά εγκαύματα.



**Σχήμα 3.5** Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής, όπου διακρίνεται η δεξαμενή που αστόχησε και τμήμα της διαδρομής της ερυθράς ιλύος



Στην εργασία (Kovacs T., 2013) εξετάσθηκε και το ενδεχόμενο ύπαρξης ραδιολογικού κινδύνου, καθώς η ερυθρά ιλύς θεωρείται υλικό φυσικό ραδιενεργό υλικό (NORM) με αυξημένη συγκέντρωση ραδιενέργειας  $^{226}\text{Ra}$  και ισοτόπων του θορίου. Η αυξημένη αυτή συγκέντρωση είναι αποτέλεσμα εμπλουτισμού κατά τη διαδικασίας επεξεργασίας του βωξίτη.



**Σχήμα 3.6** Φωτογραφίες από την πληγείσα περιοχή

Οι οικισμοί οι οποίοι είχαν υποστεί την υψηλότερη ρύπανση από το ατύχημα ήταν το Kolontár και το Devecser. Από τις περιοχές αυτές ελήφθησαν 10 δείγματα καθαρής ιλύος. Οι αναλύσεις των δειγμάτων έγιναν με την τεχνική της φασματοσκοπίας ακτίνων-γ. Προσδιορίσθηκαν τα ισότοπα  $^{238}\text{U}$  (μέσω του  $^{234}\text{Th}$ ),  $^{226}\text{Ra}$  μέσω των θυγατρικών του  $^{214}\text{Pb}$  και  $^{214}\text{Bi}$  σε ισορροπία και  $^{40}\text{K}$ . Στην περίπτωση του  $^{232}\text{Th}$  προσδιορίσθηκε το θυγατρικό του  $^{228}\text{Ac}$ . Άμεσες μετρήσεις του  $^{232}\text{Th}$  δεν πραγματοποιήθηκαν, καθώς αυτό δεν εκπέμπει ακτινοβολία-γ. Επιπλέον, από προηγούμενες παρόμοιες μετρήσεις έχει διαπιστωθεί ότι τα  $^{232}\text{Th}$  και  $^{228}\text{Ac}$  βρίσκονται σε ισορροπία στην ερυθρά ιλή. Το θόριο και το ράδιο είναι πρακτικά αδιάλυτα σε αλκαλικό μέσο και ως εκ τούτου παραμένουν στην κόκκινη λάσπη.

Επιπλέον, έγιναν μετρήσεις ακτινοβολίας-γ, κυρίως στις κατοικημένες περιοχές Kolontár και Devecser, κατά μήκος δρόμων, αυλών και κήπων, σε ύψος 1 μ. πάνω από το έδαφος. Για την αξιολόγηση των μετρήσεων αυτών ήταν πολύ σημαντικό να βρεθεί ένα αντιπροσωπευτικό σημείο μέτρησης του υποβάθρου ακτινοβολίας-γ χωρίς τη συμβολή της ερυθράς λάσπης στην περιοχή αυτή. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε μέτρηση υποβάθρου στο βόρειο τμήμα της εξεταζόμενης περιοχής, το οποίο δεν είχε ρυπανθεί. Στον πίνακα 3.5 παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών από όπου διαπιστώνεται ότι οι συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισοτόπων στην ερυθρή λάσπη ήταν γενικά υψηλότερες από τις μέσες συγκεντρώσεις τους στο έδαφος, ιδιαίτερα όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των ισοτόπων των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{232}\text{Th}$ , αλλά είναι σημαντικά χαμηλότερες από το Clearance level επίπεδα στερεών υλικών (UNSCEAR 2000).

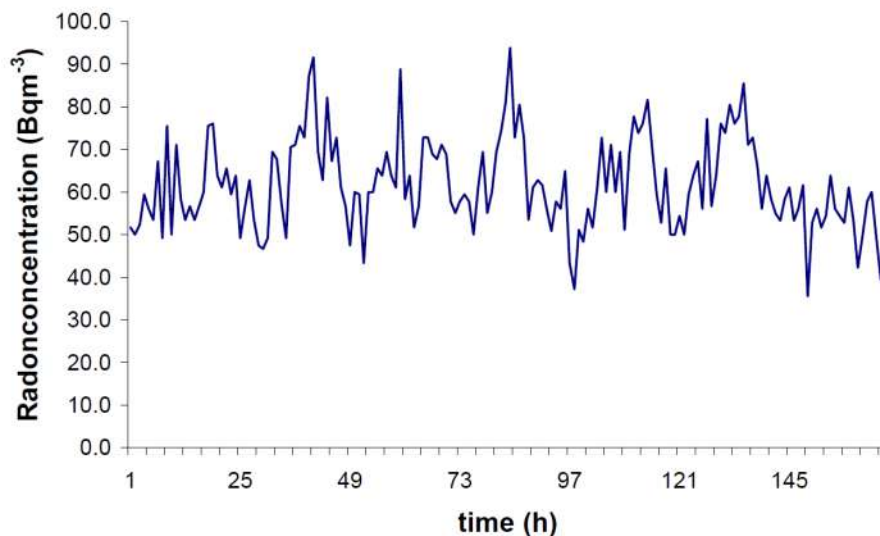
Καθώς η εξωτερική ακτινοβολία του πληθυσμού λόγω της απόθεσης της ερυθράς ιλύος εκτιμήθηκε ότι δεν ήταν υψηλή, το ενδιαφέρον εστιάστηκε στην επιβάρυνση λόγω εσωτερικής ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό εξετάσθηκε η επιβάρυνση λόγω του ραδονίου που εκρέει από την ερυθρά ιλή, καθώς και το ενδεχόμενο εισπνοής σκόνης, λόγω της ξήρανσης της ιλύος.



**Πίνακας 3.5** Μέσες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  σε δείγματα ερυθράς ιλύος (εύρος σε παρένθεση) και τα επίπεδα ραδιενέργειας για στερεά υλικά

	Ραδιενεργά ισότοπα			
	$^{238}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
Ερυθρά ιλύς [Bq/kg]	270 (197-332)	180 (143-237)	260 (194-337)	280 (228-360)
Έδαφος [Bq/kg]	33	33	45	420
Clearance activity [Bq/kg]	10000	10000	1000	100000

Από συστηματικές καθημερινές μετρήσεις ραδονίου που πραγματοποιήθηκαν στο εξωτερικό περιβάλλον επί σειρά ημερών μετά το ατύχημα, ελήφθησαν τα αποτελέσματα που παρατίθενται στο Σχήμα 3.7.



**Σχήμα 3.7** Διακύμανση της συγκέντρωσης του ραδονίου στο Devceser στο εξωτερικό περιβάλλον (7-14 Οκτωβρίου 2010).

Η μέση συγκέντρωση ραδονίου στο εξωτερικό περιβάλλον ήταν  $62 \text{ Bq/m}^3$ , με το ελάχιστο τα  $36 \text{ Bq/m}^3$  και το μέγιστο τα  $94 \text{ Bq/m}^3$ . Η τιμή αυτή είναι υψηλότερη από τον παγκόσμιο μέσο όρο των  $10 \text{ Bq/m}^3$ . Ωστόσο, είναι πολύ χαμηλότερη από την πρόσφατη Οδηγία του ICRP (International Commission on Radiological Protection) και τις συστάσεις του Π.Ο.Υ. για κατοικίες ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ). Οι συστάσεις του Π.Ο.Υ. για το επίπεδο ραδονίου ποικίλλουν μεταξύ 100 και  $300 \text{ Bq/m}^3$  για νέες κατοικίες (ΠΟΥ 2009), ενώ για το έτος 2009 το επίπεδο δράσης για την εφαρμογή της επαγγελματικής προστασίας  $1000 \text{ Bq/m}^3$  (ICRP, 2007).

Μέσω μετρήσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ και κατάλληλων δοσιμετρικών υπολογισμών εκτιμήθηκε η ενεργός δόση που προκύπτει από την εισπνοή

αιωρουμένων σωματιδίων ερυθράς ιλύος. Στον Πίνακα 3.6 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των σχετικών υπολογισμών.

Οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν υποθέτοντας ότι ο ρυθμός εισπνοής του ενήλικου πληθυσμού είναι  $7300 \text{ m}^3/\text{y}$  και ο συντελεστής παρουσίας είναι 0.2 για την παραμονή σε εξωτερικούς χώρους, η συγκέντρωση κόκκινης λάσπης στον αέρα υπολογίζεται σε  $1 \text{ mg}/\text{m}^3$  και καταλήγει σε ενεργό δόση  $36 \text{ nSv}/\text{y}$ . Λαμβάνοντας υπόψη τα υπάρχοντα δεδομένα συγκέντρωσης για τη σκόνη, μπορεί να αναμένεται μια ενεργός δόση των  $1.2 \text{ μSv}/\text{y}$ .

**Πίνακας 3.6** Ενεργός δόση εξαιτίας της εισπνοής μακρόβιων ραδιενεργών ισοτόπων

Ραδιενεργό ισότοπο	Υποτιθέμενη ισορροπία	Συντελεστής δόσης [ $\mu\text{Sv} / \text{Bq}$ ]	Ραδιενέργεια [ $\text{Bq} / \mu\text{g}$ ]	Ενεργός δόση [ $\text{pSv} / \mu\text{g}$ ]
<sup>238</sup> U	<sup>238</sup> U	2.9	$265 \cdot 10^{-9}$	5.4
	<sup>234</sup> U	3.5		
	<sup>230</sup> Th	14		
		20.4		
<sup>226</sup> Ra	<sup>226</sup> Ra	3.5	$180 \cdot 10^{-9}$	1.42
	<sup>210</sup> Pb	1.1		
	<sup>210</sup> Po	3.3		
		7.9		
<sup>232</sup> Th	<sup>232</sup> Th	25	$264 \cdot 10^{-9}$	17.85
	<sup>228</sup> Ra	2.6		
	<sup>228</sup> Th	40		
		67.6		
<sup>235</sup> U (~0.7%)		3.1	$1.85 \cdot 10^{-9}$	0.006
<b>Σύνολο</b>				24.72

Η εκτίμηση που παρουσιάζεται εδώ θεωρείται συντηρητική λόγω των πολλών υποθέσεων στις οποίες βασίζεται και οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- η σκόνη αποτελείται μόνο από κόκκινη λάσπη
- η δεδομένη συγκέντρωση σκόνης εφαρμόζεται για ολόκληρο το έτος (δηλαδή υπερεκτίμηση λόγω της αποκατάστασης της περιοχής),
- όλα τα σωματίδια σκόνης έχουν μέγεθος κόκκων που τους επιτρέπει να φτάσουν στους πνεύμονες και επομένως θέτουν σε κίνδυνο τον πληθυσμό.

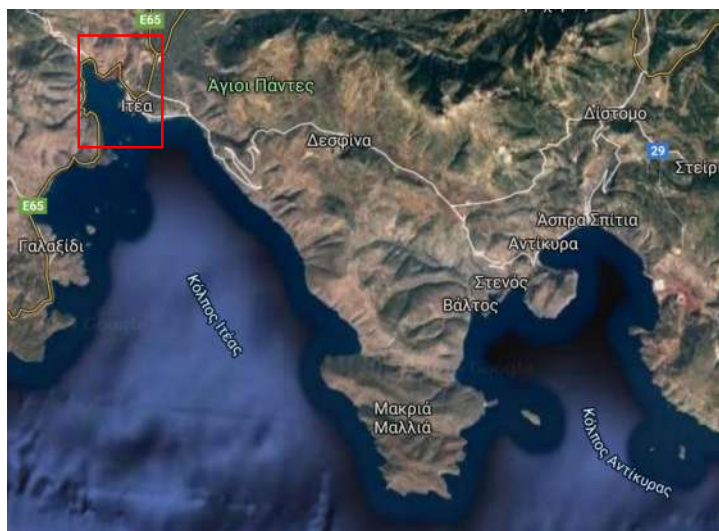
Από την παραπάνω διερεύνηση μπορούν να προκύψουν διάφορα συμπεράσματα σχετικά με την συνολική ραδιοβιολογική επιβάρυνση του πληθυσμού της περιοχής λόγω του ατυχήματος.

- Οι μέσες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των ισοτόπων <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th και <sup>40</sup>K ήταν 270, 180, 260 και 280 Bq/kg, αντίστοιχα, μέσα στα φυσιολογικά όρια των ισοτόπων αυτών στο περιβάλλον.
- Η μέση τιμή του ραδονίου στο εξωτερικό περιβάλλον ήταν  $62 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , η οποία είναι υψηλότερη από τον παγκόσμιο μέσο όρο των  $10 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , αλλά ακόμα πολύ κάτω από τα επίπεδα δράσης.

- Το μέγεθος των σωματιδίων στο 94.7% της κόκκινης λάσπης ήταν κάτω από 20 μm και τα περισσότερα από τα σωματίδια (> 68%) μπορούν να εισπνευστούν μέσω του αέρα. Η μέση συγκέντρωση σκόνης κατά την περίοδο παρακολούθησης ήταν 33.4 μg/m<sup>3</sup>.
- Συνεπώς, μπορεί να αναφερθεί ότι η κόκκινη λάσπη που πλημμύρισε το Κολοντάρ μπορεί να προκαλέσει μια ελαφρώς αυξημένη – πλην όμως αμελητέα – εξωτερική, καθώς και εσωτερική, έκθεση ακτινοβολίας. Η υψηλότερη έκθεση σε εξωτερική δόση οφείλεται στην αυξημένη έκθεση σε ραδιενεργά ισότοπα που εκπέμπουν ακτινοβολία-γ (<sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, και <sup>40</sup>K) και των θυγατρικών προϊόντων τους (<sup>214</sup>Pb, <sup>214</sup>Bi, <sup>228</sup>Ac, <sup>208</sup>Tl). Η εσωτερική έκθεση οφείλεται στην εισπνοή των σωματιδίων σκόνης που επιβαρύνουν τους πνεύμονες.

### 3.4 Επεξεργασία βωξίτη και διαχείριση ερυθράς ιλύος στην Ελλάδα

Η Ελλάδα διαθέτει από τις σημαντικότερες αποθέσεις βωξίτη στην Ευρώπη, με περιεκτικότητα 50-60% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O και παράγει περίπου 2 εκατομμύρια τόνους βωξίτη ετησίως. Οι σημαντικότερες εκμεταλλεύσιμες αποθέσεις βωξίτη βρίσκονται στο Νομό Φωκίδος και συγκεκριμένα στο όρος Παρνασσός, βόρεια του Κορινθιακού Κόλπου. Στη θέση αυτή και ειδικότερα στο βορινό άκρο του κόλπου της Ιτέας είναι εγκατεστημένη βιομηχανία επεξεργασίας αλουμινίου η οποία επί σειρά ετών απέρριπτε τα υπολείμματα επεξεργασίας του βωξίτη και την ερυθρά ίλη στον κόλπο της Αντικύρας, με αποτέλεσμα τη ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η πρακτική αυτή έχει πλέον σταματήσει και σήμερα η ιλύς αποτίθεται στην επιφάνεια του εδάφους, αφού προηγουμένως έχει ξηρανθεί. Στο σχήμα 3.8 παρατίθεται χάρτης της ευρύτερης περιοχής.

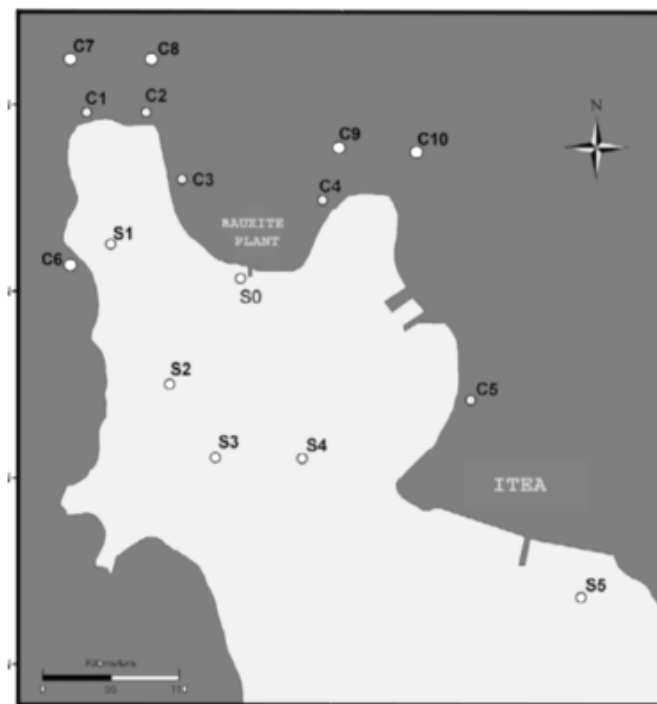


**Σχήμα 3.8** Χάρτης της ευρύτερης περιοχής του κόλπου της Ιτέας

Στα πλαίσια της εργασίας (Karagiannidi T. et al., 2009) για την εκτίμηση της έκτασης της ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή εξαιτίας της μακρόχρονης λειτουργίας του εργοστασίου έγινε σειρά δειγματοληψιών, τόσο στο έδαφος, όσο και στο θαλάσσιο περιβάλλον. Στο σχήμα 3.9 φαίνεται ο χάρτης του κόλπου της Ιτέας, όπου σημειώνονται και οι θέσεις δειγματοληψίας ιζήματος και χώματος, καθώς και το εργοστάσιο επεξεργασίας βωξίτη. Συγκεκριμένα ελήφθησαν:

- 6 δείγματα θαλασσιού ιζήματος στον Κόλπο της Ιτέας, με πάχος που κυμαίνεται από 5-16 εκατοστά από έξι θέσεις (S0-S5)
- 10 δείγματα εδάφους πάχους 0-5 cm γύρω από την εγκατάσταση εμπλουτισμού του μεταλλεύματος (C1-C10). Τα δείγματα ελήφθησαν σε δύο χρονικές περιόδους.
- 8 δείγματα βωξίτη, από τους σωρούς απόθεσης στην εγκατάσταση εμπλουτισμού του μεταλλεύματος Τα δείγματα ελήφθησαν σε δύο χρονικές περιόδους. Όλα τα δείγματα βωξίτη αναμίχθηκαν επιμελώς για να δώσουν ένα ο αντιπροσωπευτικό δείγμα.
- Δείγματα ιζήματος από το λιμάνι της Πάτρας και τον κόλπο της Αντίκυρας για λόγους σύγκρισης.

Μετά από την προβλεπόμενη επεξεργασία, τα δείγματα αναλυθήκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης σε ανιχνευτή HPGe με σχετική απόδοση 25% και τα ισότοπα που προσδιορίστηκαν ήταν τα φυσικά  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  και το ανθρωπογενούς  $^{137}\text{Cs}$ . Για όλα τα δείγματα εδάφους παρασκευάστηκαν και αναλύθηκαν δύο υπό-δείγματα. Αναλύσεις έγιναν επίσης και με την τεχνική ICP-MS για λόγους σύγκρισης.



**Σχήμα 3.9** Χάρτης τις περιοχής και θέσεις δειγματοληψίας στον κόλπο της Ιτέας

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δειγμάτων ιζήματος που έχουν γίνει στους πέντε πυρήνες ιζημάτων από τον κόλπο της Ιτέας καθώς και στο δείγμα βωξίτη παρατίθενται στον Πίνακα 3.7. Όπως παρατηρείται, οι τιμές ειδικής ραδιενέργειας για όλα τα ισότοπα τα οποία προσδιορίστηκαν είναι παρόμοιες με τις τιμές που ελήφθησαν από το λιμάνι της Πάτρας, στο οποίο δεν υπάρχει ρύπανση από φυσικά ραδιενεργά ισότοπα. Ο πυρήνας S0 που βρίσκεται πλησιέστερα στην ακτή και στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας παρουσιάζει τις σχετικά υψηλότερες τιμές ραδιενέργειας  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ .

Οι τιμές που μετρήθηκαν στον κόλπο της Ιτέας είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις τιμές που μετρήθηκαν στον κόλπο της Αντίκυρας, όπου, αν και η μέση τιμή της ραδιενέργειας για όλα τα

ισότοπα που αναλύθηκαν δεν είναι υψηλή στο θαλάσσιο ίζημα, εντούτοις παρατηρείται ότι υπάρχουν δείγματα όπου η τιμή της ραδιενέργειας των  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$  υπερβαίνει τα 400Bq/kg. Όσον αφορά τα δείγματα βωξίτη, η ραδιενέργεια των  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$  εμπίπτουν εντός των ορίων για τις τυπικές συγκεντρώσεις ραδιενέργειας στο μέταλλευμα του βωξίτη, ενώ η μέση συγκέντρωση  $^{40}\text{K}$  είναι πολύ χαμηλή.

Οι συγκεντρώσεις των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{137}\text{Cs}$  που μετρήθηκαν στα δείγματα επιφανειακού εδάφους παρουσιάζονται στον πίνακα 3.8. Ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει επίσης το λόγο  $^{226}\text{Ra} / ^{238}\text{U}$  και το ποσοστό οργανικής ύλης στα δείγματα TOC.

**Πίνακας 3.7** Ειδική ραδιενέργεια  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{137}\text{Cs}$  πυρήνων ιζημάτων που συλλέχθηκαν από τον Κόλπο της Ιτέας.

Πυρήνας	Βάθος (cm)	$^{238}\text{U}$ , Bq/kg	$^{232}\text{Th}$ Bq/kg	$^{226}\text{Ra}$ , Bq/kg	$^{40}\text{K}$ , Bq/kg	$^{137}\text{Cs}$ , Bq/kg	$^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$	TOC, %
S0	0-5	79.4±4.8	92.2±3.2	67.3±2.6	54.3±6.4	2.2±0.2	0.85	-
S1	0-5	15.9±3.2	20.0±0.7	12.7±2.3	277±19	2.9±0.3	0.80	0.087
	5-9	15.2±4.1	24.2±1	13.6±2	360±22	2.5±0.4	0.89	0.106
S2	0-5	18.3±6	28.5±1.1	19.5±4.1	479±32	7.6±0.6	1.07	0.186
	5-10	19.7±6	29.4±0.5	20.4±2.6	505±32	5.4±0.5	1.03	0.132
	10-15	23.6±2.9	29.3±1.1	19.1±1.5	546±34	2.4±0.2	0.81	0.158
S3	0-5	19.5±6	27.2±1.1	25.1±6.8	492±34	5.1±0.5	0.78	0.178
	5-10	19.2±3.3	28.5±0.8	24.0±2.4	486±31	3.5±0.3	1.25	0.253
	10-15	27.5±3.2	31.2±1.4	26.9±1.8	544±34	2.2±0.2	0.98	0.187
S4	0-7	15.3±3	22.9±1	15.6±2.6	384±28	3.4±0.4	1,02	0.115
	7-13	16.3±7	23.1±1	16.2±0.8	395±27	3.0±0.3	0.99	0.104
S5	0-5	11.3±2.6	22.6±1	15.5±2.2	373±25	4.8±0.4	1.37	0.112
	5-10	14.6±5.1	22.6±1	15,9±2.2	465±31	3.2±0.3	1.09	0.109
	10-15	19.9±3.7	30.8±1.4	18.2±2.7	535±34	2.4±0.3	0.91	0.255
Μέση τιμή		23±17	31±18	22±14	421±133	3.6±1.6	0.99	0.152±0.156
Κόλπος Αντίκυρας		79 13-400	86 15-412	49 13-185	319 28-540			
Λιμάνι Πάτρας		22 14-33	23 16-37	25 17-34	497 327-763			
Δείγματα βωξίτη		95.0±15	185±3	72.8±17	43±7.8	UDL	0.82	
Τυπικές τιμές βωξίτη		37-530	41-527					

Όπως φαίνεται, στα περισσότερα δείγματα επιφανειακών εδαφών (εκτός των C5, C6) η ειδική ραδιενέργεια των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{226}\text{Ra}$  είναι κατά 2 έως 6 φορές υψηλότερες, ενώ αυτή του  $^{40}\text{K}$  είναι 3 φορές χαμηλότερη από τις αντίστοιχες μέσες τιμές για το ελληνικό έδαφος. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι στο δείγμα C5, το οποίο είναι το πιο απομακρυσμένο δείγμα από τη μονάδα, η ειδική ραδιενέργεια των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{226}\text{Ra}$  βρίσκεται κοντά στον ελληνικό μέσο όρο για χώμα. Είναι επίσης ιδιαίτερα αξιοσημείωτο ότι ο μέσος όρος για τις τιμές των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{226}\text{Ra}$  συγκρίνεται καλά με τις αντίστοιχες τιμές των δειγμάτων βωξίτη, λαμβάνοντας υπόψη και τα σχετικά σφάλματα. Από την άλλη πλευρά, η ειδική ραδιενέργεια του  $^{40}\text{K}$  είναι πολύ χαμηλότερη στα δείγματα με αυξημένη ειδική ραδιενέργεια των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{232}\text{Th}$ . Η χαμηλή ραδιενέργεια του  $^{40}\text{K}$  θα μπορούσε να αποδοθεί στην "αραίωση" δειγμάτων επιφανειακού εδάφους με σκόνη βωξίτη, του οποίου η ραδιενέργεια  $^{40}\text{K}$  είναι χαμηλή, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.7.

**Πίνακας 3.8** Ειδική ραδιενέργεια  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{137}\text{Cs}$  στα δείγματα εδάφους

Δείγμα	$^{238}\text{U}$ Bq/kg	$^{232}\text{Th}$ , Bq/kg	$^{226}\text{Ra}$ , Bq/kg	$^{40}\text{K}$ , Bq/kg	$^{137}\text{Cs}$ , Bq/kg	$^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$	Δόση, nGy/h	TOC, %
C1	88.1±6.2	90.1±2.4	70.8±1.9	72.3±5.9	87±5	0.8	98	1.795
C2	131±8	273±4	128±2	113±20	0.8±0.3	0.98	230	0.502
C3	97.3±25	156±2	71.4±2.3	41.3±8.2	0.5±0.1	0.73	141	0.001
C4	103±17	108±5	82.3±1.8	104±11	3.7±0.6	0.8	117	0.096
C5	20.4±8.3	22.9±2.1	21.4±1.4	357±22	1±0.1	1.05	38	0.189
C6	43.1±4,3	63.1±2.3	28.9±1.2	82.9±11	49±4	0.67	61	1.013
C7	131±11	182±3	96.1±2.8	167±19	9±0.8	0.73	177	0.145
C8	148±35	222±3	106±2	98.1±13	5.4±0.5	0.72	207	0.112
C9	70.2±5.3	87.2±2.4	44.2±2.3	28.2±9.3	1.3±0.2	0.63	86	0.073
C10	102±25	121±0.8	73.2±1.1	97.8±11	8.2±0.7	0.72	124	0.117
Μέση τιμή ± τυπ. απόκλ.	93.4±40	133±76	72.2±34	116±93	17±29	0.78±0.13	128±62	0.404±0.574
Παγκόσμιες τιμές	35	30	35	400				
Ελληνικές τιμές	25	21	25	360				

Η χωρική κατανομή των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  στα δείγματα επιφανειακών εδαφών υποδηλώνουν ισχυρή σχέση μεταξύ της κανονικής κατανομής των ραδιενεργών ισοτόπων και της λειτουργίας του εργοστασίου επεξεργασίας βωξίτη. Οι μέγιστες τιμές της ειδικής ραδιενέργειας των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{232}\text{Th}$  παρατηρούνται γύρω από το εργοστάσιο του βωξίτη ενώ οι ελάχιστες βρέθηκαν στις απομακρυσμένες θέσεις δειγματοληψίας. Αντιθέτως, παρατηρήθηκαν μέγιστες τιμές  $^{40}\text{K}$  σε απομακρυσμένες τοποθεσίες – περίπου 2 Km μακριά από το εργοστάσιο – ενώ η ελάχιστη τιμή βρέθηκε κοντά στο εργοστάσιο.

Ο λόγος  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  κυμαίνεται από 0.63 έως 1.05. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στα περισσότερα δείγματα επιφανειακών εδαφών υπάρχει μια μικρή απόκλιση από τη ραδιενεργό ισορροπία μεταξύ  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{238}\text{U}$ , δεδομένου ότι το  $^{226}\text{Ra}$  είναι θυγατρικό του  $^{238}\text{U}$ . Γενικά, φυσικοί ή χημικοί παράγοντες (π.χ. διεργασίες διάβρωσης, διαδικασίες οξείδωσης/αναγωγής και η μεγαλύτερη κινητικότητα του ράδιου στο περιβάλλον σε σύγκριση με το ουράνιο) ευθύνονται για την εμφάνιση αυτής της ανισορροπίας, ιδιαίτερα στη ραδιενεργό σειρά του ουρανίου. Σύμφωνα με την δημοσίευση [Anagnostakis M.J. et al., 2005]. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ότι οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{226}\text{Ra}$  στο έδαφος έχουν επηρεαστεί από την μονάδα επεξεργασίας και εξόρυξης λόγω των διαδικασιών έκπλυσης του βωξίτη και της βροχής, μέχρι τη μεταφορά και κυρίως την απόθεση σκόνης βωξίτη, η οποία οδηγεί και στη μείωση της ραδιενέργειας του  $^{40}\text{K}$  στα ρυπασμένα εδάφη λόγω αραίωσης. Το γεγονός ότι η αναλογία  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  στα δείγματα εδάφους είναι παρόμοια με την αναλογία στο δείγμα βωξίτη, υποστηρίζουν το παραπάνω συμπέρασμα. Ότι δηλαδή η εναπόθεση σκόνης βωξίτη είναι η κύρια πηγή της ρύπανσης του επιφανειακού εδάφους. Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.8, η ραδιενέργεια του  $^{137}\text{Cs}$  ποικίλλει σημαντικά, κυμαινόμενη από 0.5 έως 87.5Bq/kg. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα C1 και C6 που είναι τα δείγματα με τις υψηλότερες τιμές  $^{137}\text{Cs}$  έχουν επίσης πολύ υψηλό ποσοστό TOC (ολικά οργανικά) σε σχέση με τα άλλα εδαφικά δείγματα. Η οργανική ύλη αυτών των δειγμάτων αποτελείται κυρίως από φύκια, καθώς συλλέχθηκαν τα δείγματα πολύ κοντά στην ακτογραμμή. Ως εκ τούτου, η χωρική η κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  σε τόση μικρή κλίμακα φαίνεται να ελέγχεται από δύο παράγοντες:

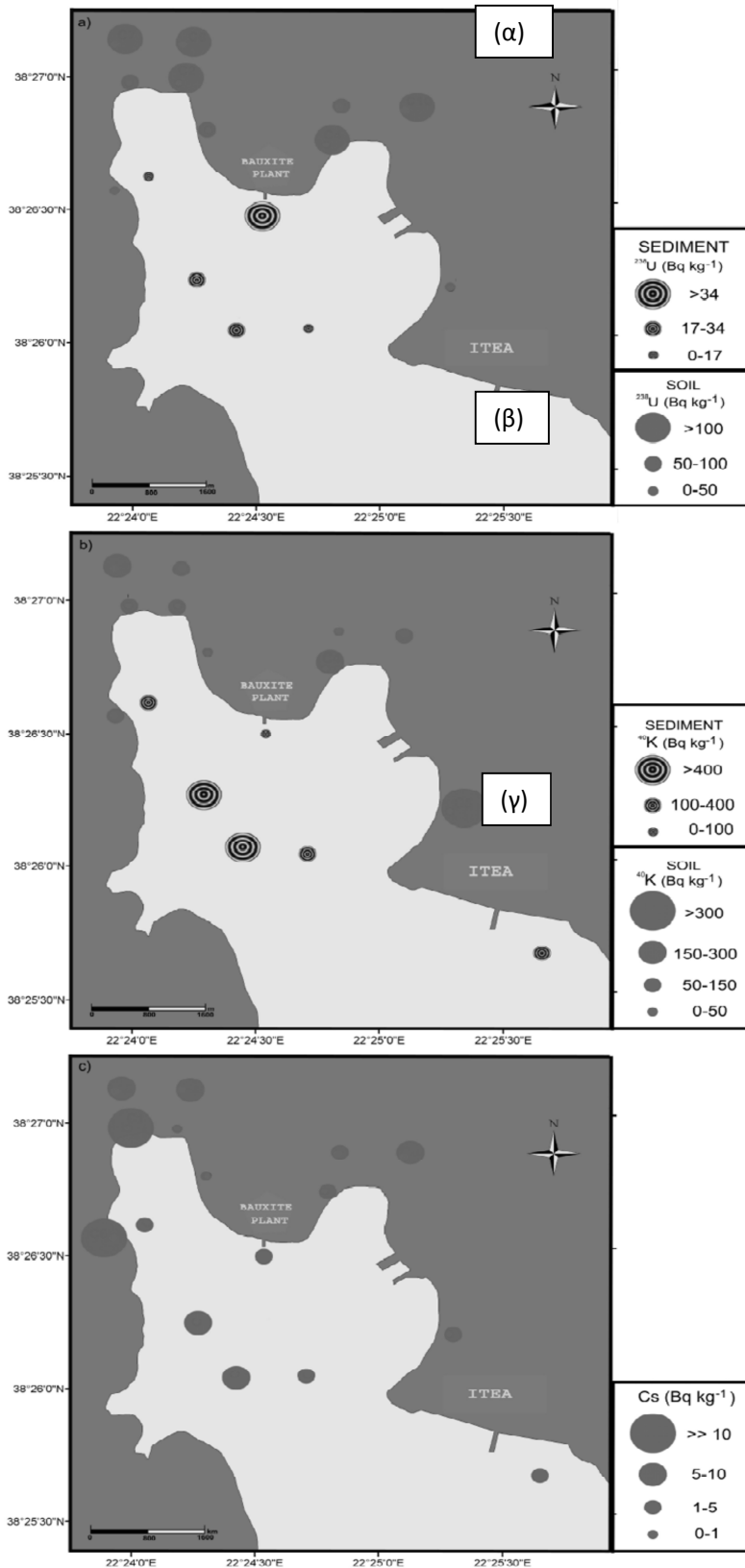
- την "αραίωση" του  $^{137}\text{Cs}$  στα φυσικά εδάφη λόγω της απόθεσης σκόνης βωξίτη που δεν περιέχει  $^{137}\text{Cs}$
- την τάση του  $^{137}\text{Cs}$  να δεσμεύεται με την οργανική ύλη

χωρίς όμως να μπορούν να εξαιρεθούν και φαινόμενα τοπικής διάβρωσης ή ιζηματογένεσης στο έδαφος.

Ο ρυθμός απορροφώμενης δόσης λόγω της ακτινοβολίας-γ του εδάφους κυμαίνεται στην περιοχή από 38 έως 230 nGy/h, με μέση τιμή  $128 \pm 62$  nGy/h. Αυτή η τιμή είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τον εκτιμώμενο ελληνικό μέσο όρο των 40-50 nGy/h. Πρέπει πάντως να επισημανθεί ότι τέτοιες τιμές έχουν μετρηθεί και σε άλλες περιοχές της χώρας, ενώ πολύ υψηλότερες τιμές, οφειλόμενες καθαρά στη φυσική ραδιενέργεια του εδάφους έχουν μετρηθεί σε διάφορες χώρες του κόσμου.

Στο σχήμα 3.10 παρατίθενται και γραφικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τα ισότοπα  $^{238}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ . Η χωρικές κατανομές των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{232}\text{Th}$  είναι συμβατές μεταξύ τους, ενώ η κατανομή του  $^{40}\text{K}$  και του  $^{137}\text{Cs}$  παρουσιάζουν διαφορετικά μοτίβα. Οι θυγατρικοί πυρήνες για τα  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{232}\text{Th}$  δείχνουν μια καθαρή αύξηση προς τα βόρεια κοντά στην εγκατάσταση αξιοποίησης. Το ανώτατο όριο των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{232}\text{Th}$  παρατηρήθηκε στο δείγμα S0 που βρίσκεται κοντά στο εργοστάσιο σε πολύ ρηχά νερά (0-2.0 m) ενώ η ελάχιστη τιμή βρέθηκε στο βόρειο (S1) και στο ανατολικό (S2) μέρος της περιοχής.

**Σχήμα 3.10** Χωρική κατανομή των (α)  $^{238}\text{U}$ , (β)  $^{40}\text{K}$  και (γ)  $^{137}\text{Cs}$  στα εδάφη της παράκτιας ζώνης και τα επιφανειακά ιζήματα του κόλπου της Ιτέας





Ελαφρώς αυξημένες συγκεντρώσεις των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{232}\text{Th}$  παρατηρήθηκαν στο κεντρικό τμήμα (S2 και S3). Η χωρική κατανομή του  $^{40}\text{K}$  δείχνει ένα διαφορετικό μοτίβο. Ανώτατο όριο παρατηρήθηκε στο κεντρικό τμήμα (S2 και S3), ενώ η ελάχιστη τιμή του βρέθηκε στην περιοχή του εργοστασίου (S0). Όλα τα παραπάνω δεδομένα υποδεικνύουν μια άμεση σχέση μεταξύ των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  και της βιομηχανίας βωξίτη. Τα ιζήματα στη ζώνη κοντά στην εγκατάσταση (0-2.0 m νερό βάθος) είναι αρκετά ρυπασμένα με  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{232}\text{Th}$  ενώ τα ιζήματα του θαλασσινού νερού φαίνεται να μην επηρεάζονται από τη λειτουργία της εγκατάστασης. Η χαμηλή ραδιενέργεια του  $^{40}\text{K}$  φαίνεται να οφείλεται στην "αραίωση" των φυσικών επιφανειακών ιζημάτων από τον χαμηλής συγκέντρωσης  $^{40}\text{K}$  βωξίτη. Από την άλλη πλευρά, η κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  στα επιφανειακά ιζήματα του κόλπου της Ιτέας παρουσιάζει υψηλότερες τιμές ραδιενέργειας (5.1-7.6) στο κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας. Το ελάχιστο  $^{137}\text{Cs}$  από το δείγμα ιζήματος που συλλέχθηκε κοντά στην εγκατάσταση βωξίτη και υποδηλώνει "αραίωση" του φυσικού ιζήματος. Σε σχεδόν όλους τους πυρήνες ιζημάτων οι οποίοι αναλύθηκαν για τα  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας αυξάνουν με το βάθος.

Σε ένα περιορισμένο περιβάλλον, όπως ένας μικρός ημίκλειστος κόλπος, με περισσότερη ή λιγότερη σταθερή εναπόθεση ιζήματος από άποψη λιθολογίας και ορυκτολογίας, οι συγκεντρώσεις των  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$  στα ιζήματα θα πρέπει να παραμείνουν αρκετά σταθερές με το βάθος. Οι ειδική ραδιενέργεια του  $^{232}\text{Th}$  συσχετίζεται συνήθως με φάσεις αποκόλλησης και δείχνουν μόνο μικρές αλλαγές με το βάθος των ιζημάτων. Σε αυτό το πλαίσιο, οι υψηλές τιμές της ραδιενέργειας του  $^{232}\text{Th}$  στα βαθύτερα ιζήματα μπορεί να αποδοθούν σε δευτερεύοντες ορυκτολογικές αλλαγές.

Από την άλλη πλευρά, οι τιμές της ραδιενέργειας του  $^{238}\text{U}$  παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα με το βάθος των ιζημάτων σε σύγκριση με εκείνες του  $^{232}\text{Th}$ , υποδηλώνοντας την μεταφορά του  $^{238}\text{U}$  στα ιζήματα και το νερό στο κάτω μέρος του κόλπου της Ιτέας. Αυτό υποστηρίζεται περαιτέρω από το γεγονός ότι το ποσοστό του ουρανίου που συνδέεται με το λιθογόνο κλάσμα είναι σημαντικά χαμηλότερο από αυτό του θορίου. Επομένως, η αύξηση της ραδιενέργειας  $^{238}\text{U}$  με το βάθος ιζημάτων μπορεί να αποδοθεί σε μια προσθήκη  $^{238}\text{U}$  στα βαθύτερα στρώματα από άλλες διεργασίες. Η αύξηση αυτή – υπό την προϋπόθεση ότι είναι στατιστικά σημαντική – είναι μικρότερη από 2 (1.3-1.8) και είναι πιο έντονη στον πυρήνα S5. Στο υπερκείμενο θαλασσινό νερό η συγκέντρωση του διαλυμένου  $^{238}\text{U}$  διεισδύει αρκετά εκατοστά στα ιζήματα. Παρόμοια φαινόμενα έχουν αναφερθεί και σε άλλες περιοχές, όπως στα ιζήματα κόλπου της Ταϊλάνδης, τη Νότια Βαλτική Θάλασσα και το λιμάνι της Πάτρας (Ελλάδα). Το προφίλ του  $^{137}\text{Cs}$  στα ιζήματα του κόλπου της Ιτέας παρουσιάζει την αναμενόμενη μείωση με το βάθος.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή τη μελέτη έδειξαν ότι στον κόλπο της Ιτέας, κοντά στην περιοχή του εργοστασίου επεξεργασίας βωξίτη, υπάρχει ρύπανση με  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{226}\text{Ra}$ , ενώ η λειτουργία της εγκατάστασης προκαλεί μείωση στις συγκεντρώσεις των  $^{40}\text{K}$  και  $^{137}\text{Cs}$ , μέσω του μηχανισμού της αραίωσης. Η μελέτη αυτή δεν αποκάλυψε καμία σημαντική επίδραση της μονάδας επεξεργασίας στις τιμές συγκέντρωσης των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στα

ιζήματα του υπόλοιπου Κόλπου, καθώς οι τιμές συγκέντρωσης ραδιενέργειας ήταν κοντά στο φυσικό υπόβαθρο. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της διαδικασίας εξαγωγής βωξίτη δείχνουν ότι τα υψηλότερα ποσοστά ουρανίου και θορίου παρέμειναν στα υπολειμματικά κλάσματα, που σημαίνει ότι αυτά τα μέταλλα ήταν ισχυρά συνδεδεμένα με τα ιζήματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΥΛΙΚΑ NORM ΣΤΟΝ ΚΛΑΔΟ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

#### 4.1 Εισαγωγή

Όλες οι πρώτες ύλες και τα προϊόντα που προέρχονται από το έδαφος περιέχουν ποσότητες φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων, κυρίως των σειρών ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ) και θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ) και του ραδιενεργού ισότοπου του καλίου ( $^{40}\text{K}$ ). Στη σειρά  $^{238}\text{U}$ , το τμήμα της αλυσίδας που αρχίζει από το ράδιο ( $^{226}\text{Ra}$ ) είναι ραδιολογικά το πιο σημαντικό και ως εκ τούτου γίνεται συχνά αναφορά στο  $^{226}\text{Ra}$  αντί  $^{238}\text{U}$ . Είναι γνωστό ότι ορισμένα υλικά κατασκευής είναι εκ φύσεως πιο ραδιενεργά από άλλα. Η φυσική ραδιενέργεια στα δομικά υλικά προκαλεί εξωτερική και εσωτερική έκθεση. Η εξωτερική έκθεση οφείλεται στην ακτινοβολία-γ που εκπέμπεται από μέλη των αλυσίδων διάσπασης ουρανίου και θορίου και από το  $^{40}\text{K}$ . Η εσωτερική έκθεση οφείλεται κυρίως στο ραδόνιο το οποίο απελευθερώνεται από το οικοδομικά υλικά στον αέρα του δωματίου και στα θυγατρικά του τα οποία παράγονται στον αέρα από τη διάσπασή του. Κατά συνέπεια, σε εσωτερική ακτινοβολήση υπόκειται το αναπνευστικό σύστημα και κυρίως οι πνεύμονες. Είναι προφανές ότι, η γνώση των επιπέδων της ραδιενέργειας στα δομικά υλικά είναι σημαντική για την εκτίμηση των κινδύνων από την ακτινοβολήση εντός της κατοικίας. Η γνώση τόσο των επιπέδων ραδιενέργειας, αλλά και των ιδιοτήτων εξασθένησης της ακτινοβολίας που παρουσιάζει ένα οικοδομικό υλικό είναι σημαντικές για την εκτίμηση της ακτινοβολήσης του πληθυσμού, καθώς οι περισσότεροι άνθρωποι δαπανούν περίπου το 80% της ζωής τους μέσα σε σπίτια και γραφεία. Αυτή η γνώση είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών για τη χρήση αυτών των υλικών.

#### 4.2 Χρήση ιπτάμενης τέφρας στην παραγωγή τσιμέντου

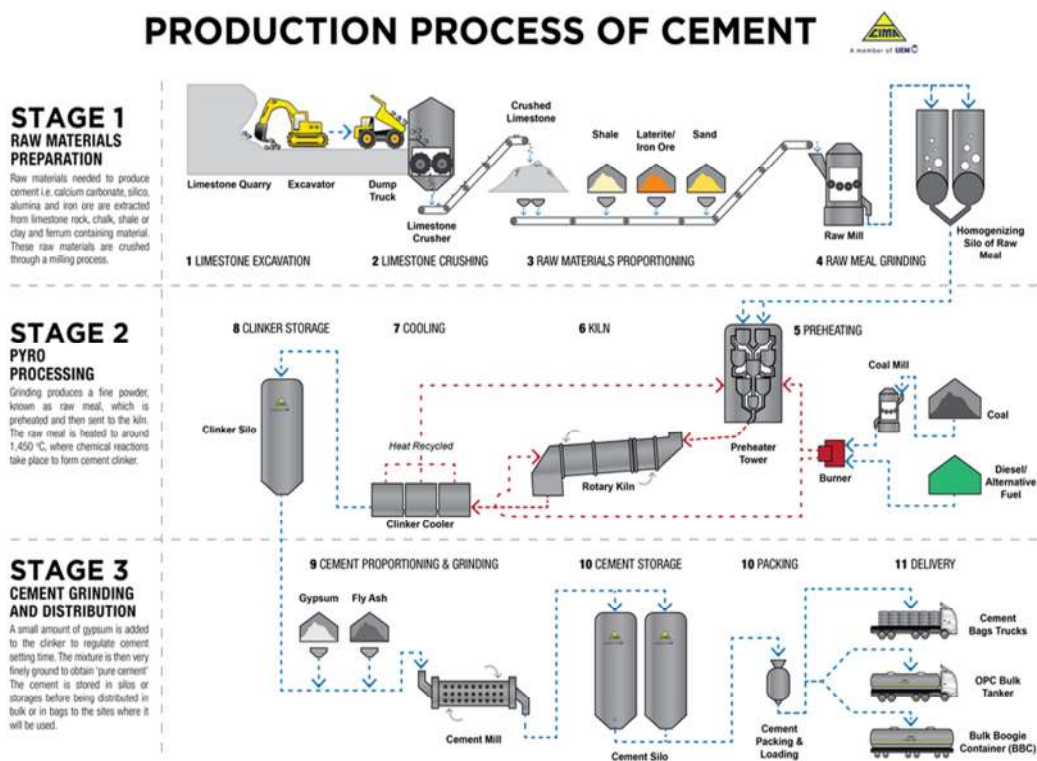
Το τσιμέντο είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο οικοδομικό υλικό. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να μελετάται, τόσο η ραδιενέργειά του, όσο και των πρώτων υλών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του. Τα ραδιενεργά ισότοπα που ανιχνεύονται στο τσιμέντο είναι αυτά των σειρών του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ) και του θορίου ( $^{232}\text{Th}$ ), καθώς και το κάλιο ( $^{40}\text{K}$ ). Στη σειρά  $^{238}\text{U}$ , η συμβολή των ισοτόπων του πρώτου μισού της σειράς, δηλαδή μεταξύ  $^{238}\text{U}$  και  $^{230}\text{Th}$  είναι αμελητέα, σε σχέση με το δεύτερο ήμισυ που περιλαμβάνει τα ισότοπα από το  $^{226}\text{Ra}$  έως το  $^{210}\text{Pb}$ . Συνεπώς, από αυτή τη σειρά ιδιαίτερη σημασία έχει η μέτρηση του  $^{226}\text{Ra}$ .

Κατά την παρασκευή του τσιμέντου χρησιμοποιούνται συχνά ως αδρανή υλικά υπολείμματα από βιομηχανικές διεργασίες, όπως η ιπτάμενη τέφρα. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται χαρακτηριστικά η διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου. Αυτή η διαδικασία μπορεί να αποφέρει τεχνολογικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, αλλά αν δεν υπόκεινται σε τακτικό έλεγχο, μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή τσιμέντου με αυξημένα επίπεδα ραδιενέργειας.

Η χρήση ιπτάμενης τέφρας στο τσιμέντο τύπου Portland (PCC) έχει πολλά οφέλη και βελτιώνει τις ιδιότητες του τσιμέντου, τόσο σε νωπή κατάσταση όσο και μετά τη σκλήρυνση του.

Επιπλέον, η χρήση τέφρας κατά την παραγωγή σκυροδέματος βελτιώνει την επεξεργασία του ελαστικού σκυροδέματος, καθώς και τη δύναμη και την αντοχή του σκληρού σκυροδέματος, ενώ είναι και οικονομικά αποδοτική, καθώς όταν προστίθεται ιπτάμενη τέφρα στο σκυρόδεμα, η ποσότητα τσιμέντου Portland που χρησιμοποιείται μπορεί να μειωθεί.

Σχήμα 4.1 Διαδικασία παραγωγής τσιμέντου



Συγκεκριμένα, η προσθήκη τέφρας στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα:

- Τη βελτιωμένη λειτουργικότητα, καθώς τα σωματίδια σφαιρικού σχήματος της ιπτάμενης τέφρας λειτουργούν ως μικροσκοπικοί τριβείς εντός του μίγματος σκυροδέματος, παρέχοντας έτσι ένα αποτέλεσμα λιπαντικού. Το ίδιο αποτέλεσμα βελτιώνει επίσης την αντλησιμότητα του σκυροδέματος μειώνοντας τις απώλειες λόγω τριβής κατά τη διαδικασίας άντλησης και οδηγώντας σε καλύτερες επιφάνειες.
- Τη μειωμένη ζήτηση νερού. Η αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου από την ιπτάμενη τέφρα μειώνει τη ζήτηση νερού. Όταν η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται στο 20% περίπου του συνολικού τσιμέντου, η ζήτηση νερού μειώνεται κατά περίπου 10%. Η μειωμένη ζήτηση νερού έχει ελάχιστη ή καθόλου επίδραση στη συρρίκνωση και στη ρηγμάτωση κατά την ξήρανση.
- Τη μειωμένη θερμότητα ενυδάτωσης. Η αντικατάσταση τσιμέντου με την ίδια ποσότητα ιπτάμενης τέφρας μπορεί να μειώσει τη θερμότητα ενυδάτωσης του σκυροδέματος, χωρίς μείωση της αντοχής. Η μειωμένη θερμότητα ενυδάτωσης μειώνει τα προβλήματα της αύξησης της θερμοκρασίας σε μεγάλους όγκους σκυροδέματος.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δύο εργασιών που αφορούν στη μελέτη της φυσικής ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών, καθώς και της

ραδιολογικής επίπτωσης από τη χρήση διαφόρων υλικών, όπως της ιπτάμενης τέφρας, ως πρόσθετο στην παραγωγή τσιμέντου.

#### 4.2.1 Μελέτη ραδιολογικών επιπτώσεων από τη χρήση διαφόρων πρώτων υλών για την παραγωγή τσιμέντου στην Β. Μακεδονία

Στην εργασία (Stojanovska Z. et al., 2010) παρατίθεται μία μελέτη των ραδιολογικών επιπτώσεων από τη χρήση διαφόρων πρώτων υλών στην παρασκευή τσιμέντου. Συνολικά 218 δείγματα πρώτων υλών και του τσιμέντου ως τελικού προϊόντος συλλέχθηκαν από τη βιομηχανία τσιμέντου της Β. Μακεδονίας κατά την περίοδο 2005-2007. Τα δείγματα τα οποία συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας αυτής περιλάμβαναν:

- 66 δείγματα τσιμέντου που συλλέχθηκε από το 2005 σε μηνιαία βάση από εργοστάσιο τσιμέντου στα Σκόπια.
- 49 δείγματα ιπτάμενης τέφρας από τις αποθέσεις δύο σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, REK Bitola ιπτάμενης τέφρας I και REK Oslomej ιπτάμενης τέφρας II,
- 45 δείγματα από Pozzolana,
- 16 φυσικά δείγματα γύψου,
- 42 δείγματα κλίνκερ

Κάθε δείγμα κονιοποιήθηκε και ξηράνθηκε στους 105°C για την απομάκρυνση της υγρασίας. Το αποξηραμένο υλικό ομογενοποιήθηκε και αναλύθηκε με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας σε δοχεία Marinelli των 500 ml. Οι προδιαγραφές των υπό έρευνα τσιμέντων δίδονται στον πίνακα 4.1, ενώ η ειδική ραδιενέργεια των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  των διαφόρων υλικών, όπως προέκυψε από τις αναλύσεις παρατίθενται στον Πίνακα 4.2.

**Πίνακας 4.1** Σύσταση των υπό μελέτη τσιμέντων

Τύπος τσιμέντου		Πρώτες ύλες
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ	Clinker 96-97%; Φυσικός γύψος 3-4%
CEM II/AeM	Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ	Τσιμέντο Πόρτλαντ με μέγιστο ποσοστό 15% σε ασβεστόλιθο και ιπτάμενη τέφρα (Pozzolana)
CEM II/BeM	Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ	Τσιμέντο Πόρτλαντ με μέγιστο ποσοστό 30% σε ασβεστόλιθο και ιπτάμενη τέφρα (Pozzolana)

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.2 είναι φανερό ότι οι χαμηλότερες μέσες τιμές ραδιενέργειας των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  βρέθηκαν στον γύψο, ενώ οι υψηλότερες τιμές για το  $^{226}\text{Ra}$  ( $140 \pm 89$  Bq/kg) βρέθηκαν στα δείγματα ιπτάμενης τέφρας I. Ομοίως, οι υψηλότερες τιμές για τις ειδικές ραδιενέργειες των  $^{232}\text{Th}$  ( $171 \pm 48$  Bq/kg) και  $^{40}\text{K}$  ( $786 \pm 134$  Bq/kg) βρέθηκαν για το υλικό Pozzolana II και την ιπτάμενη τέφρα II, αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με τις παγκόσμιες μέσες τιμές (50, 50 και 500 Bq/kg, για  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$ , αντίστοιχα) από το (UNSCEAR, 1993) διαπιστώνεται ότι οι τιμές που προέκυψαν στην εργασία (Stojanovska Z. et al., 2010) είναι υψηλότερες για τα υλικά (ιπτάμενη τέφρα και Pozzolana).

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν για την ιπτάμενη τέφρα και το τσιμέντο συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία (Πίνακας 4.3).

**Πίνακας 4.2** Ειδική ραδιενέργεια  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  σε πρώτες ύλες και τσιμέντα (σε Bq/kg).

Υλικό	Μέγεθος δείγματος	Ειδική ραδιενέργεια (Bq/kg)								
		$^{226}\text{Ra}$			$^{232}\text{Th}$			$^{40}\text{K}$		
		Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση τιμή	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση τιμή	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση τιμή
Γύψος	16	4.4	9	5.9±1.1	0.92	2.23	1.44±0.44	3.2	21.5	11±5.2
Ιπτ. τέφρα I	20	89	245	140±89	60	120	80±15	383	733	540±99
Ιπτ. τέφρα II	29	26	111	85±17	538	1131	129±18	538	1131	786±134
Pozzolana I	17	42	81	64±12	36	101	69±15	440	183	105±43
Pozzolana II	28	43	192	80±27	104	298	171±48	158	663	349±168
Clinker	42	21	46	31±6	15	29	20±3	176	322	234±46
Cem1	19	23	37	30±4	17	27	20±3	174	280	222±36
Cem 2 A-M	28	31	58	45±7	22	36	29±3	177	355	272±45
Cem 2 B-M	19	38	58	50±6	29	40	34±4	238	369	295±43

**Πίνακας 4.3** Σύγκριση της ειδικής ραδιενέργειας (α) της ιπτάμενης τέφρας και β) δειγμάτων τσιμέντου με τιμές της βιβλιογραφίας

	Ειδική ραδιενέργεια (Bq/kg)			Αναφορές
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	
	<b>Ιπτάμενη τέφρα</b>			
Ουγγαρία	760	117	441	Somlai et al. (2008)
Τουρκία	232	117	466	Turhan (2007)
Ελλάδα	273-1377	41-65	143	Πετρόπουλος et al. (2002)
Γερμανία	210	130	700	UNSCEAR (1982)
Β.Μακεδονία	107	109	685	Stojanovska Z. et al., 2010
<b>Τσιμέντο</b>				
Ελλάδα	63	24	284	Παπαστεφάνου et al. (2005)
Τουρκία	41	26	267	Turhan (2007)
Ιταλία	38	22	218	Rizzo et al. (2001)
Β.Μακεδονία	42	28	264	Stojanovska Z. et al., 2010

Καθώς η ραδιοβιολογική επίπτωση των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  που περιέχονται στα δομικά υλικά δεν είναι η ίδια και επιπλέον η συγκέντρωσή τους κυμαίνεται από υλικό σε υλικό, προκειμένου να μπορεί να γίνει σύγκριση των υλικών ως προς τη ραδιοβιολογική επίπτωσή τους εισάγεται το μέγεθος της ισοδύναμης συγκέντρωσης ραδίου  $Ra_{eq}$  το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1.43xC_{Th} + 0.077xC_k$$

όπου,  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$  και  $C_k$  είναι οι ειδικές ραδιενέργειες των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$ , αντίστοιχα.

Η παραπάνω σχέση βασίζεται στην εκτίμηση ότι το ραδιοβιολογικό αποτέλεσμα από την ακτινοβολία-γ που εκπέμπει ένα 1 Bq/kg  $^{226}\text{Ra}$  είναι το ίδιο με το ραδιοβιολογικό αποτέλεσμα εξαιτίας 1.43 Bq/kg  $^{232}\text{Th}$  και 0.077 Bq/kg  $^{40}\text{K}$ . Σύμφωνα με το (UNSCEAR, 1993) και (UNSCEAR, 2000) για την ασφαλή χρήση δομικών υλικών, η μέγιστη τιμή του  $Ra_{eq}$  θα πρέπει να είναι μικρότερη από 370 Bq/kg. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι τιμές  $Ra_{eq}$  που υπολογίσθηκαν για τις πρώτες ύλες και για το τσιμέντο του Πίνακα 4.2. Όπως διαπιστώνεται, η μέση τιμή του  $Ra_{eq}$  για τα τσιμέντα που μελετήθηκαν ( $111 \pm 22$  Bq/kg) είναι κάτω από το όριο των 370 Bq/kg αλλά είναι ελαφρά υψηλότερη για το Pozzolana II ( $372 \pm 74$  Bq/kg). Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η ισοδύναμη συγκέντρωση ραδίου σε ιπτάμενη τέφρα και Pozzolana βρέθηκε να είναι περίπου 3 με 4 φορές υψηλότερη από εκείνη στο τσιμέντο Πόρτλαντ.

Στον πίνακα 4.4 παρατίθενται ακόμα και τα αποτελέσματα από τους δοσιμετρικούς υπολογισμούς που έγιναν για τα υλικά του Πίνακα 4.2. Όπως παρατηρείται οι μέγιστες τιμές της ετήσιας ενεργού δόσης συνδέονται με τα δείγματα της ιπτάμενης τέφρας και του υλικού Pozzolana. Σύμφωνα με αυτό το σενάριο η μέση ετήσια ισοδύναμη δόση για έναν κάτοικο δωματίου κατασκευασμένου από σκυρόδεμα είναι  $200 \pm 89$  mSv/y, δηλαδή κάτω από το όριο των 300 mSv/y για ασφαλή χρήση.

**Πίνακας 4.4** Εκτιμώμενη ισοδύναμη συγκέντρωση ραδίου και ετήσια δόση

Δείγμα	N	$Ra_{eq}$ (Bq/kg)			Ισοδύναμη δόση (mSv/y)		
		Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση τιμή και σφάλμα	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση τιμή και σφάλμα
Γύψος	16	7.3	12.7	$9.1 \pm 1.5$	Κάτω από το φυσικό υπόβαθρο		
Ιπτ. τέφρα 1	20	232	468	$314 \pm 74$	687	1665	$130 \pm 314$
Ιπτ. τέφρα 2	29	232	44	$357 \pm 57$	629	1489	$1141 \pm 213$
Pozzolana I	17	111	239	$178 \pm 31$	202	684	$457 \pm 121$
Pozzolana II	28	266	555	$372 \pm 74$	774	1837	$1175 \pm 273$
Clinker	42	64	119	$85 \pm 13$	9	234	$94 \pm 52$
CEM I	19	69	100	$82 \pm 10$	31	155	$86 \pm 38$
CEM II/A-M	28	93	138	$116 \pm 13$	128	313	$224 \pm 53$
CEM II/B-M	19	115	148	$130 \pm 9$	213	351	$279 \pm 38$

Προκειμένου να εκτιμηθεί κατά πόσον πληρούνται οι απαιτήσεις ασφαλείας για τα οικοδομικά υλικά εξαιτίας της απευθείας ακτινοβολήσης λόγω της ακτινοβολίας-γ που εκπέμπουν χρησιμοποιείται ένας δείκτης ακτινοβολίας-γ που προτείνεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission, 1999). Για την εκτίμηση της ετήσιας ενεργού δόσης μέσα σε ένα δωμάτιο, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει προτείνει ένα σενάριο ακτινοβολήσης σε δωμάτιο

συγκεκριμένων διαστάσεων: 4m x 5m x 2.8m. Το πάχος και η πυκνότητα των τοίχων του δωματίου είναι 20 cm και 2350 kg/m<sup>3</sup> αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό του ρυθμού απορροφόμενης δόσης λόγω ακτινοβολίας-γ D (nGy/h) χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές 0.92 nGy/h ανά Bq/kg για το <sup>226</sup>Ra, 1.1 nGy/h ανά 1 Bq/kg για το <sup>232</sup>Th και 0.08 nGy/h ανά 1 Bq/kg για το <sup>40</sup>K. Έτσι, τελικά ο ρυθμός απορροφόμενης δόσης λόγω ακτινοβολίας-γ εκτιμάται από τη σχέση:

$$D = 0.92 \times C_{Ra} + 1.1 \times C_{Th} + 0.08 \times C_K$$

όπου  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$  και  $C_K$  είναι οι ειδικές ραδιενέργειες των <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th και <sup>40</sup>K, αντίστοιχα.

Για την εκτίμηση της ετήσιας ενεργού δόσης  $D_E$  (mSv/y), ο συντελεστής μετατροπής από απορροφημένη δόση στον αέρα σε ενεργό δόση θεωρήθηκε ότι είναι 0.7 Sv/Gy, και ο εσωτερικός χρόνος διαβίωσης στην κατοικία εκτιμάται σε 7000 ώρες ετησίως (European Commission, 1999), (UNSCEAR, 1993, 2000). Ως εκ τούτου, η ετήσια ενεργός δόση υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$D_E = D \times 0.7 \times 7000$$

Κατόπιν των παραπάνω, ο δείκτης ακτινοβολίας-γ ορίζεται ως:

$$I_\gamma = \frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000}$$

Ο δείκτης αυτός πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τις ποσότητες και τις ιδιαίτερες συνθήκες υπό τις οποίες το υλικό χρησιμοποιείται σε ένα κτίριο. Το όριο τιμών εξαρτάται από τα κριτήρια δόσης, την ποσότητα του υλικού και τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιήθηκε σε ένα κτίριο. Για ένα υλικό που χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες,  $I_\gamma \leq 1$  αντιστοιχεί σε δόση λόγω ακτινοβολίας-γ μικρότερη από 1 mSv/y (European Commission, 1990).

Η αξιολόγηση της εσωτερικής ακτινοβολίας από τα σωματίδια-α που εκπέμπονται λόγω κυρίως των θυγατρικών του ραδονίου, χρησιμοποιείται ο δείκτης άλφα ή δείκτης εσωτερικού κινδύνου. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης που υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση, που προτάθηκε από τους Righi και Bruzzi (2006):

$$I_\alpha = \frac{C_{Ra}}{200}$$

όπου,  $C_{Ra}$ , είναι η ειδική ραδιενέργεια του <sup>226</sup>Ra. Για την ασφαλή χρήση των υλικών κατά την κατασκευή κτιρίου απαιτεί να ισχύει  $I_\alpha < 1$ . Το όριο αυτό αντιστοιχεί στην τιμή συγκέντρωσης ραδιενέργειας του <sup>222</sup>Rn εντός της κατοικίας που είναι 200 Bq/m<sup>3</sup> για τις μελλοντικές κατασκευές κτηρίων (European Commission, 1990).

Στην υπόψη έρευνα διαπιστώθηκε ότι οι τιμές για τον μέσο όρο των: <sup>226</sup>Ra (107±45 Bq/kg), <sup>232</sup>Th (109±30 Bq/kg) και <sup>40</sup>K (685±171 Bq/kg) στην ιπτάμενη τέφρα είναι πάνω από τις παγκόσμιες μέσες τιμές για τα δομικά υλικά (50, 50 και 500 Bq/kg αντίστοιχα) σύμφωνα με το (UNSCEAR, 1993). Ωστόσο, οι μέσες ειδικές ραδιενέργειες των προϊόντων τσιμέντου για: <sup>226</sup>Ra (42±10 Bq/kg), <sup>232</sup>Th (28±6 Bq/kg) και <sup>40</sup>K (264±50 Bq/kg) είναι παρόμοιες με αυτές που αναφέρονται από άλλους ερευνητές (Papastefanou C. et al., 2005), (Rizzo et al., 2001), (Turhan, 2007).



Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η κύρια συνιστώσα της δόσης είναι η ιπτάμενη τέφρα και το υλικό Pozzolana, αν και αυτά τα ακατέργαστα υλικά χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα στην παραγωγή τσιμέντου, πρέπει να παρακολουθούνται προσεκτικά. Ωστόσο, η μέση τιμή του μεγέθους  $Ra_{eq}$  για τα τσιμέντα ( $111 \pm 22$  Bq/kg) είναι κάτω από το συνιστώμενο επίπεδο των 370 Bq/kg. Οι τιμές των συντελεστών  $I_\gamma$  και  $I_\alpha$  για τα τσιμέντα βρέθηκαν να είναι 0.37 και 0.21 αντίστοιχα, τιμές που είναι χαμηλότερες από τα αντίστοιχα όρια για ασφαλή χρήση. Αν και οι μέσες τιμές της ετήσιας ενεργού δόσης για το υλικό Pozzolana και την ιπτάμενη τέφρα εκτιμάται ότι είναι υψηλότερες από το αποδεκτό επίπεδο της αραιωμένης συγκέντρωσής τους (<30%) στα τσιμέντα, έχουν ως αποτέλεσμα μια ετήσια ενεργό δόση που δεν υπερβαίνει τα συνιστώμενα όρια. Λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι δεν υπάρχει σημαντικός κίνδυνος ακτινοβολίας από τη χρήση των τσιμέντων που εξετάστηκαν.

#### 4.2.2. Μελέτη της ραδιοβιολογικής επίπτωσης οικοδομικών υλικών από την περιοχή της Πελοποννήσου

Στην εργασία (Papaefthymiou H. and Gouseti O., 2008) παρουσιάζεται μία μελέτη αναφορικά με τη φυσική ραδιενέργεια και τους σχετιζόμενους με την ακτινοβολία κίνδυνους για οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην Πελοπόννησο, με έμφαση στο τσιμέντο. Πέντε διαφορετικά είδη οικοδομικών υλικών (τσιμέντα τύπου Pozzolanic και Portland, ασβεστόλιθος, λευκό τσιμέντο, μαρμαρόσκονη και άμμος) που χρησιμοποιούνται συχνά για την κατασκευή κτιρίων στην Πελοπόννησο, καθώς και οι πρώτες ύλες του τσιμέντου Portland, αναλύθηκαν για το περιεχόμενο τους σε φυσική ραδιενέργεια.

Τα φυσικά υλικά άμμος, ασβεστόλιθος και μαρμαρόσκονη ελήφθησαν από μεγάλους προμηθευτές σε όλη την Πελοπόννησο. Επιπλέον πάρθηκαν, πέντε δείγματα από δύο διαφορετικούς τύπους τσιμέντο Portland (Cem I και Cem II) και πέντε δείγματα από πρώτες ύλες, για την παρασκευή τσιμέντου. Τα δείγματα συλλέχθηκαν σε διαφορετικές περιόδους κατά τη διάρκεια ενός έτους από την τσιμεντοβιομηχανία TITAN. Τα δείγματα ξηράθηκαν θρυμματίστηκαν σε λεπτή σκόνη (200 mesh), και στη συνέχεια αναμίχθηκαν επιμελώς σε ένα μύλο για να δώσουν ένα πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα για κάθε υλικό. Όσον αφορά στα δείγματα τσιμέντου, αυτά αποτελούνται:

- Δείγμα Cem I: κλίνκερ (90%), γύψος (5%) και ασβεστόλιθος (5%).
- Δείγμα Cem II: κλίνκερ (64%), γύψος (5%), ασβεστόλιθος (5%), ποζολανικό υλικό (19%) και ιπτάμενη τέφρα (7%).

Ο γύψος προέρχεται από την Κρήτη, το ποζολανικό υλικό προέρχεται από την ηφαιστειογενή Μήλο, ενώ η ιπτάμενη τέφρα από τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης.

Η ιπτάμενη τέφρα από τη λειτουργία λιγνιτικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι ένα υλικό που συχνά χρησιμοποιείται στην Ελλάδα κυρίως στη βιομηχανία τσιμέντου αντικαθιστώντας το κλίνκερ τσιμέντου για την παραγωγή ειδικών τύπων τσιμέντου π.χ. Portland και Pozzolanic (το οποίο περιέχει ~7.3% ιπτάμενη τέφρα). Η ελληνική ιπτάμενη τέφρα, ειδικά εκείνη που προέρχεται από τη Μεγαλόπολη χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλό επίπεδο  $^{226}\text{Ra}$  (Papastefanou C. & Charalambous S., 1979), (Simopoulos S.E. and Angelopoulos M.G., 1987),

(Papaefthymiou H., 2007). Η παρουσία ραδιενεργών ισοτόπων στα οικοδομικά υλικά προκαλεί τόσο εσωτερική όσο και εξωτερική έκθεση. Η εσωτερική έκθεση στην ακτινοβολία οφείλεται στο ραδόνιο που απελευθερώνεται από τα υλικά στον αέρα, ενώ η εξωτερική έκθεση οφείλεται σε άμεση ακτινοβολία από τα ισότοπα των σειρών των  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$  και από το  $^{40}\text{K}$ . Και οι δύο εκθέσεις είναι σημαντικές και η σχετική συμβολή τους στην έκθεση στην ακτινοβολία ποικίλλει σημαντικά. Σύμφωνα με τη δημοσίευση (Stoulos S. et al., 2003), η εξωτερική έκθεση, η οφειλόμενη σε ακτινοβολία-γ από οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, είναι η κύρια πηγή ακτινοβολίας σε εσωτερικούς χώρους, καθώς η εσωτερική δόση αντιπροσωπεύει μόνο το 13-30% της συνολικής δόσης.

Για την αξιολόγηση του ραδιολογικού κινδύνου εξαιτίας των υλικών που εξετάστηκαν, χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης συγκέντρωσης ραδιενέργειας, ο οποίος υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$I_{\gamma} = \frac{C_{Ra}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{Th}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_K}{3000 \text{ Bq/kg}}$$

όπου  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$  και  $C_K$  είναι οι συγκεντρώσεις ραδιενέργειας ραδίου, θορίου και καλίου σε Bq/kg.

Στον Πίνακα 4.5 παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τα διάφορα δείγματα οικοδομικών υλικών.

**Πίνακας 4.5** Ειδική ραδιενέργεια  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  για οικοδομικά υλικά και αντίστοιχες τιμές του δείκτη συγκέντρωσης ραδιενέργειας,  $I_{\gamma}$

Υλικό	N	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$I_{\gamma}$
<b>Μέση τιμή ± σ (Bq/kg)</b>					
Ροζολανικό τσιμέντο	18	111 ± 17 (80–142)	19 ± 3 (16–27)	244 ± 30 (218–291)	0.51 ± 0.06 (0.44–0.63)
Άσπρο τσιμέντο	18	28 ± 9 (19–48)	16 ± 3 (11–22)	32 ± 18 (<DL.79)	0.18 ± 0.04 (0.14–0.25)
Άμμος	20	12 ± 3 (7.1–15)	2.6 ± 3.6 (<DL.9.9)	– (<DL.60)	0.05 ± 0.02 (0.03–0.09)
Μαρμαρόσκονη	20	1.8 ± 1.0 (<DL.2.6)	2.2 ± 0.5 (1.2–3.3)	– <DL	0.017 ± 0.004 (0.010–0.021)
Ασβεστόλιθος	20	14 ± 6 (2.3–21)	1.6 ± 0.5 (<DL.2.0)	– (<DL.25)	0.06 ± 0.03 (0.02–0.09)

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 4.5, η φυσική ραδιενέργεια των υλικών ποικίλλει σημαντικά, ανάλογα με την προέλευση και τα γεωχημικά χαρακτηριστικά τους. Στο ροζολανικό δείγμα τσιμέντου καθώς και στα λευκά τσιμέντα παρουσιάστηκαν οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$ , σε σύγκριση με τα υπόλοιπα οικοδομικά υλικά. Από την άλλη, τα δείγματα μαρμαρόσκονης, περιείχαν τη χαμηλότερη ραδιενέργεια  $^{226}\text{Ra}$ , ενώ ο ασβεστόλιθος είχε την χαμηλότερη ραδιενέργεια  $^{232}\text{Th}$ . Επιπλέον, με εξαίρεση τη

μαρμαρόσκονη, όλα τα δομικά υλικά που εξετάστηκαν παρουσίασαν συγκέντρωση  $^{226}\text{Ra}$  υψηλότερη από αυτήν του  $^{232}\text{Th}$ .

Στα πλαίσια της εργασίας (Papaefthymiou H. and Gouseti O., 2008) έγιναν και αναλύσεις των επιμέρους συνιστωσών δύο τύπων τσιμέντου (Portland Cem I και Cem II), προκειμένου να διαπιστωθεί ποια ήταν η κυρίαρχη πηγή της αυξημένης ραδιενέργειας τους. Οι συγκεντρώσεις των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  που μετρήθηκαν στα τσιμέντα Portland Cem I και Cem II, καθώς και σε όλες τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή τσιμέντου παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6.

**Πίνακας 4.6** Ειδική ραδιενέργεια  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  στα δείγματα τσιμέντου Portland (Cem I και Cem II) και στις πρώτες ύλες τους.

Υλικό	Ειδική ραδιενέργειας (Bq/kg $\pm S_{\text{tot}}$ )			
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$I_{\gamma}$
Ασβεστόλιθος	6.0 $\pm$ 0.4	6.6 $\pm$ 1.0	101 $\pm$ 9	0.09
Ποζολανικό υλικό	37 $\pm$ 1	31 $\pm$ 4	361 $\pm$ 21	0.40
Γύψος	6.8 $\pm$ 0.6	UDL	UDL	0.02
Clinker	15 $\pm$ 1	14 $\pm$ 3	141 $\pm$ 13	0.17
Ιπτάμενη τέφρα	1041 $\pm$ 6	55 $\pm$ 7	462 $\pm$ 24	3.90
Cem I	17 $\pm$ 1	15 $\pm$ 2	154 $\pm$ 13	0.19
Cem II	91 $\pm$ 1	18 $\pm$ 3	212 $\pm$ 15	0.46

$S_{\text{tot}}$ : συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.6, το Cem II παρουσιάζει την υψηλότερη ειδική ραδιενέργεια  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{40}\text{K}$  σε σύγκριση με το Cem I, ενώ η ραδιενέργεια του  $^{232}\text{Th}$  ήταν περίπου ίση και στους δύο τύπους τσιμέντου. Όσον αφορά τη ραδιενέργεια του  $^{226}\text{Ra}$  στις πρώτες ύλες, όπως διαπιστώθηκε η ιπτάμενη τέφρα, περιέχει μακράν την υψηλότερη τιμή, ενώ στον ασβεστόλιθο και τον γύψο την χαμηλότερη. Οι ειδικές ραδιενέργειες των  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  βρέθηκαν να είναι υψηλότερες στην ιπτάμενη τέφρα, ενώ και στα δύο ήταν κάτω από το όριο ανίχνευσης στον γύψο. Περίπου το 80% της ραδιενέργειας του  $^{226}\text{Ra}$  στο Cem II θα μπορούσε να αποδοθεί στην ιπτάμενη τέφρα. Στην πράξη, επειδή η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί μόνο περίπου το 7% του Cem II, η συμβολή της στη συνολική ειδική ραδιενέργεια τσιμέντου είναι σχετικά μικρή.

Οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας για το τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ, τους λευκούς τύπους τσιμέντου, καθώς και την άμμο παρουσιάζονται στον πίνακα 4.7, μαζί με αντίστοιχες τιμές από άλλους Έλληνες ερευνητές για σύγκριση. Στον ίδιο πίνακα παρατίθενται τυπικές παγκόσμιες μέσες τιμές για δομικά υλικά (UNSCEAR, 1993) και το έδαφος (UNSCEAR, 2000). Είναι προφανές από αυτόν τον πίνακα ότι οι ειδικές ραδιενέργειες των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  στα δείγματα τσιμέντου και λευκού τσιμέντου που μετρήθηκαν στην εργασία (Papaefthymiou H. and Gouseti O., 2008) είναι συγκρίσιμες με εκείνες που έχουν μετρηθεί από άλλους Έλληνες ερευνητές. Αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι το τσιμέντο και το λευκό τσιμέντο παράγονται από δύο κυρίως εταιρείες στην Ελλάδα. Ως προς τα δείγματα άμμου, υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας για το  $^{40}\text{K}$  βρέθηκαν σε δείγματα από τη Βόρεια Ελλάδα (Papastefanou C., 2005)

σε σύγκριση με αυτά που ελήφθησαν σε αυτή τη μελέτη και αυτά που δίνονται από τους (Petropoulos N.P. et al., 2002) και (Ρακου Α.Α. et al., 1994). Διαφορές στην τοπική γεωλογία θα μπορούσαν να εξηγήσουν αυτή τη διαφορά. Επιπλέον, οι ειδικές ραδιενέργειες των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  στα εξεταζόμενα υλικά, με εξαίρεση αυτά που αφορούν το  $^{226}\text{Ra}$  στα δείγματα τσιμέντου Portland, κυμαίνονται μέσα στις παγκόσμιες μέσες τιμές για τα οικοδομικά υλικά και το έδαφος.

**Πίνακας 4.7** Ειδική ραδιενέργεια  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  (Bq/kg) σε δομικά υλικά από διάφορες περιοχές της Ελλάδας και μέσες παγκόσμιες τιμές

	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	Αναφορές
Τσιμέντο Πόρτλαντ Ι	17 ± 1	15 ± 2	154 ± 13	(Papaefthymiou H. and Gouseti O., 2008) (Πελοπόννησος)
Τσιμέντο Πόρτλαντ Ι	15–25	8–16	141–320	(Papastefanou, 2005) (Βόρεια-Κεντρική Ελλάδα)
Τσιμέντο Πόρτλαντ ΙΙ	91 ± 1	18 ± 3	212 ± 15	(Papaefthymiou H. and Gouseti O., 2008)
Τσιμέντο Πόρτλαντ ΙΙ	34–140	14–46	218–388	(Papastefanou, 2005) (Βόρεια-Κεντρική Ελλάδα)
Λευκό τσιμέντο	20–48	11–20	<DL.79	(Papaefthymiou H. and Gouseti O., 2008)
	14–26	7–13	5–67	(Petropoulos, et al., 2002) (Ελλάδα)
Άμμος	7–15	<DL.9.9	<DL.60	(Papaefthymiou H. and Gouseti O., 2008)
	1–5	up to 3	1–37	(Petropoulos, et al., 2002) (Ελλάδα)
	11–27	8–26	167–656	(Papastefanou, 2005) (Βόρεια-Κεντρική Ελλάδα)
	<DL.81	<DL.11	<DL.100	(Ρακου Α.Α. et al., 1994) (Ηπειρος)
Μαρμαρόσκονη	<DL.2.6	1.2–3.3	<DL	(Papaefthymiou H. and Gouseti O., 2008)
	up to 1	up to 1	up to 23	(Petropoulos, et al., 2002) (Ελλάδα)
Παγκόσμιοι μέσοι όροι για τα δομικά υλικά	50	50	500	UNSCEAR (1993)
Παγκόσμιος μέσος όρος για το έδαφος	35 (17–60)	30 (11–64)	400 (140–850)	UNSCEAR (2000)

Όσον αφορά στις τιμές του δείκτη συγκέντρωσης ραδιενέργειας ( $I_\gamma$ ) για τα δύο είδη τσιμέντου Portland (Cem I και Cem II) και τις πρώτες ύλες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6, όπως φαίνεται

για την ιπτάμενη τέφρα ο δείκτης παρουσιάζει αυξημένη τιμή στο 3.9, που σημαίνει ότι υπάρχει υπέρβαση των κριτήριων για το επίπεδο ασφαλούς χρήσης. Παρ' όλα αυτά, η μικρή περιεκτικότητα της ιπτάμενης τέφρας σε αυτά δείγματα τσιμέντου οδηγεί σε αυξημένες, αλλά αποδεκτές τιμές  $I_\gamma$ . Οι υπόλοιπες πρώτες ύλες παρουσιάζουν τιμές του δείκτη χαμηλότερες από τις συνιστάμενες τιμές για εξωτερική έκθεση στην ακτινοβολία.

Στον Πίνακα 4.7 παρατίθενται επιπλέον και οι μέσες τιμές του δείκτη συγκέντρωσης ραδιενέργειας ( $I_\gamma$ ) για όλα τα δομικά υλικά που εξετάστηκαν. Στα δείγματα ποζολανικού τσιμέντου παρουσιάστηκαν οι υψηλότερες τιμές του  $I_\gamma$ , ενώ σε αυτά της μαρμαρόσκονης τα χαμηλότερα. Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει σαφώς ότι κανένα από τα εξεταζόμενα υλικά δεν υπερβαίνει το συνιστώμενο όριο εξαίρεσης για έκθεση σε εξωτερική ακτινοβολία.

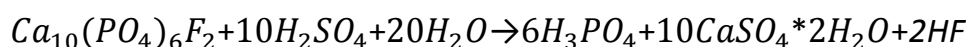
Τα αποτελέσματα της εργασίας (Papaefthymiou H. and Gouseti O., 2008) που παρουσιάστηκε στην παράγραφο αυτή έδειξαν ότι οι μετρηθείσες τιμές για όλα τα εξεταζόμενα υλικά εμπίπτουν στις παγκόσμιες τιμές για τα υλικά κατασκευής και το έδαφος, εκτός από εκείνες που αφορούν το  $^{226}\text{Ra}$  στο Πόρτλαντ και στο Ποζολανικό τσιμέντο. Η υψηλότερη συγκέντρωση σε  $^{226}\text{Ra}$  αυτών των τύπων τσιμέντου θα μπορούσε να αποδοθεί στην παρουσία της ιπτάμενης τέφρας ως πρόσθετο σε αυτούς τους τύπους τσιμέντου, δεδομένου ότι η τέφρα βρέθηκε να περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις ραδιενέργειας  $^{226}\text{Ra}$ , σε σύγκριση με τις άλλες εξεταζόμενες πρώτες ύλες. Οι υπολογισμοί του δείκτη συγκέντρωσης ραδιενέργειας ( $I_\gamma$ ) για όλα τα εξεταζόμενα δομικά υλικά έδειξαν ότι κανένα από τα δείγματα δεν υπερβαίνει τα συνιστώμενα επίπεδα εξωτερικής έκθεσης στην ακτινοβολία. Όσον αφορά τα παραπάνω αποτελέσματα, τα κοινά χρησιμοποιούμενα δομικά υλικά στην Πελοπόννησο που εξετάζονται σε αυτήν την εργασία θα μπορούσαν να χρησιμοποιούνται με ασφάλεια στις κατασκευές κτιρίων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

### ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΩΣΦΟΓΥΨΟΥ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΦΩΣΦΟΡΙΚΟΥ ΟΞΕΩΣ ΚΑΙ ΛΙΠΑΣΜΑΤΩΝ

#### 5.1 Εισαγωγή

Ο φωσφογύψος (PG) είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας φωσφορικών λιπασμάτων. Παράγεται κατά την χώνευση φωσφορικού πετρώματος με θειικό οξύ για την παραγωγή φωσφορικού οξέος. Το φωσφορικό οξύ λαμβάνεται κυρίως μέσω της λεγόμενης “υγρής χημικής επεξεργασίας” του φωσφορικού πετρώματος, οπότε παράγεται το φωσφορικό οξύ σύμφωνα με την ακόλουθη χημική αντίδραση:



Σύμφωνα με την USEPA (United States Environmental Protection Agency), για κάθε τόνο φωσφορικού οξέος που παράγεται, παράγονται πέντε τόνοι PG. Ο φωσφογύψος (PG), περιέχει επιπλέον βαρέα μέταλλα, φθορίδια αλλά και ραδιενεργά ισότοπα (κυρίως ισότοπα του ραδίου). Αν και ο φωσφογύψος, όπως ο φυσικός γύψος, είναι καταρχήν ένα σχετικά αβλαβές υλικό. Ο φωσφογύψος, ωστόσο, είναι πιο ραδιενεργός από το φυσικό γύψο, καθώς το ράδιο που βρίσκεται φυσικώς συνδεδεμένο με το φωσφορικό πέτρωμα, μετά την αντίδραση του πετρώματος με το θειικό οξύ συνδέεται με το φωσφογύψο.

**Σχήμα 5.1** Φωσφογύψος



Για το λόγο αυτό ο φωσφογύψος χαρακτηρίζεται ως υλικό TENORM, καθώς συνήθως περιέχει ποσότητες ουρανίου, θορίου και των θυγατρικών τους. Ο φωσφογύψος αποθηκεύεται σε εκτεταμένες σωρούς συνήθως κοντά στη βιομηχανική εγκατάσταση.

Οι έρευνες που έχουν γίνει και καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία δείχνουν ότι υπάρχουν πολλές περιβαλλοντικά ασφαλείς και οικονομικά εφικτές χρήσεις του φωσφογύψου, όπως:

- Στη γεωργία: Προσθήκη φωσφογύψου για τη βελτίωση εδαφών (κυρίως σε αλκαλικά εδάφη). Στην περίπτωση αυτή η εκτιμώμενη ραδιοβιολογική επίπτωση είναι αμελητέα. Αυτή η χρήση αυξάνει εκθετικά με το χρόνο σε χώρες όπως Ισπανία, Βραζιλία, Τυνησία, Ιορδανία κλπ.
- Στις κατασκευές, ως πρώτη ύλη στην κατασκευή τσιμέντου, τούβλων, πλακιδίων και δομικών στοιχείων (blocks). Και στην περίπτωση αυτή η έκθεση του πληθυσμού έχει εκτενώς μελετηθεί και έχει αποδειχθεί ότι δεν υπάρχει σημαντική ραδιοβιολογική επίπτωση. Προσοχή χρειάζεται μόνο στις περιπτώσεις που ο PG χρησιμοποιείται σε μεγάλη ποσότητα, π.χ. στην κατασκευή panel.
- Ως υπόστρωμα στην κατασκευή δρόμων.
- Σε θαλάσσιες εφαρμογές, όπως για την κατασκευή δομικών στοιχείων για την προστασία των ακτών από τη διάβρωση και πλημμύρες, καθώς βελτιώνει την αντοχή στο θαλάσσιο νερό.
- Σε εγκαταστάσεις υγειονομικής ταφής ως υλικό επικάλυψης, καθώς εκτός των άλλων ενισχύει τη βιολογική δραστηριότητα.
- Ως βελτιωτικό της ασφάλτου, καθώς βελτιώνει τα ρεολογικά χαρακτηριστικά της.

Τα σημαντικότερα προβλήματα που συνδέονται με τον PG προκύπτουν από την απόθεση του στο περιβάλλον, η οποία γίνεται συχνά κατά ανεξέλεγκτο τρόπο.

Στις παραγράφους που ακολουθούν συνέχεια παρατίθενται δύο μελέτες της ραδιοβιολογικής επίπτωσης από τη διαχείριση του φωσφογύψου.

## 5.2 Μελέτη των ραδιοβιολογικών επιπτώσεων από τις αποθέσεις φωσφογύψου στη Huelva της Ισπανίας

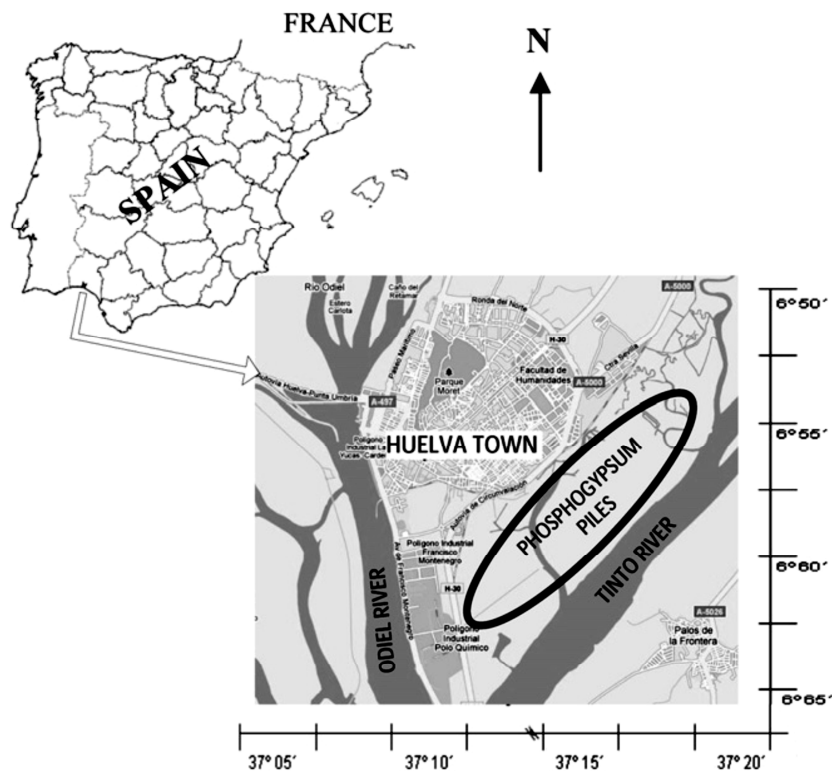
Στη Huelva (νοτιοδυτική Ισπανία) και στη συμβολή των ποταμών Tinto και Odiel, βρίσκεται ένα μεγάλο βιομηχανικό συγκρότημα, το οποίο περιλαμβάνει εκτός των άλλων και δύο εργοστάσια παραγωγής φωσφορικού οξέος. Ο PG που παράγεται σε αυτά αποθηκεύεται σε σωρούς που σχηματίζονται τα τελευταία 40 χρόνια. Στα πλαίσια της εργασίας (Dueñas C. et al., 2010) επιχειρήθηκε:

- Να προσδιοριστούν τα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας των ενεργών αποθέσεων PG, σε μη-αποκατεστημένες και αποκατεστημένες ζώνες στην περιοχή.

Να εκτιμηθεί η πιθανή έκθεση σε ακτινοβολία των εργαζομένων και του κοινού εξαιτίας των αποθέσεων φωσφογύψου.

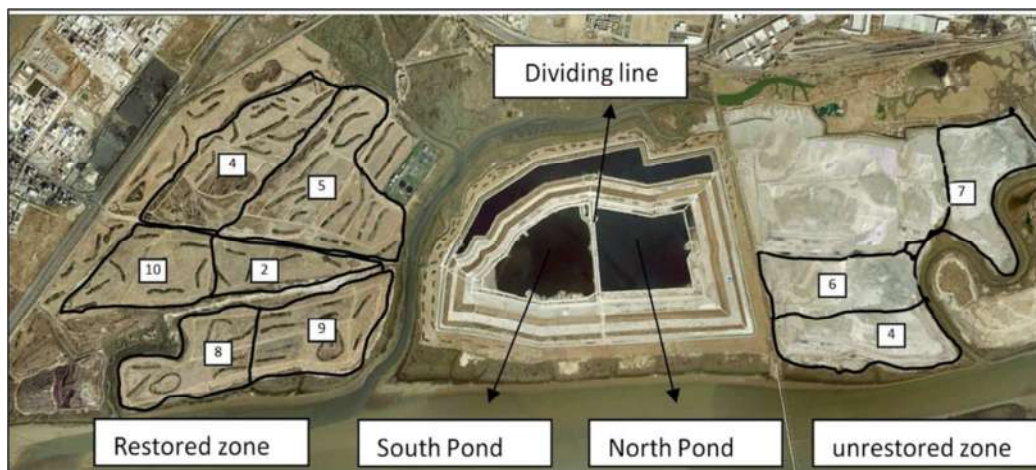
Για το σκοπό αυτό, στα πλαίσια της εργασίας των (Dueñas C. et al., 2010) έγινε συστηματική δειγματοληψία και ανάλυση δειγμάτων από τις αποθέσεις PG.

Σχήμα 5.2 Χάρτης της περιοχής των αποθέσεων φωσφογύψου στην πόλη Huelva



Στο Σχήμα 5.3 όπου εμφανίζεται χάρτης της περιοχής των αποθέσεων σημειώνονται οι διάφορες θέσεις δειγματοληψίας ΡG.

Σχήμα 5.3 Θέσεις δειγματοληψίας στην περιοχή Huelva



Οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  στα δείγματα που συλλέχθηκαν από τις διαφορετικές ζώνες προσδιορίστηκαν με τεχνικές  $\gamma$ -φασματοσκοπίας. Στον πίνακα 5.1 παρατίθενται οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  των δειγμάτων που αναλύθηκαν.



**Πίνακας 5.1** Μέσες τιμές ειδικής ραδιενέργειας των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  στις διάφορες ζώνες.

Ζώνη	Περιγραφή	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	Αριθμός δειγμάτων
Σωροί PG	South pond	560 ±80	30±3	8±2	5
	North pond	640±90	20±2	7±2	4
	Dividing line	740±60	50±6	<8	3
Μη-αποκατεστημένη ζώνη	Τεμάχιο 6	540±50	<35	<8	3
	Τεμάχιο 7	520±45	70±7	14±5	5
	Τεμάχιο 4	660±60	<35	<8	4
Αποκατεστημένη ζώνη	Τεμάχιο 10	23±3	360±40	14±5	4
	Τεμάχιο 5	50±10	230±25	13±5	5
	Τεμάχιο 9	180±60	170±20	<8	4
	Τεμάχιο 4	210±25	<90	10±4	4
	Τεμάχιο 2	18±5	200±20	25±6	3
	Τεμάχιο 8	17±5	300±25	20±5	4

Από τα αποτελέσματα του πίνακα συνάγεται ότι η ραδιενέργεια του  $^{226}\text{Ra}$  είναι υψηλότερη σε δείγματα από τις ενεργές αποθέσεις PG καθώς και στη μη αποκατεστημένη ζώνη, σε σχέση με εκείνη της αποκατεστημένης ζώνης. Οι μέσες τιμές κυμάνθηκαν από 560-740 Bq/kg στις ενεργές αποθέσεις PG και από 520-660 Bq/kg για τη μη αποκατεστημένη ζώνη. Αντίστοιχα, στην αποκατεστημένη ζώνη κυμαίνονται από 17-210 Bq/kg. Το  $^{226}\text{Ra}$  είναι η κύρια πηγή ραδιενέργειας σε ενεργές αποθέσεις PG, ενώ η ειδική ραδιενέργεια του  $^{232}\text{Th}$  είναι γενικά κάτω από 8 Bq/kg στις ενεργές αποθέσεις PG έως 25 Bq/kg στην αποκατεστημένη ζώνη. Η ειδική ραδιενέργεια του  $^{40}\text{K}$  ήταν πολύ χαμηλή στους σωρούς PG και στη μη αποκατεστημένη ζώνη, αλλά είναι υψηλότερη στην αποκατεστημένη ζώνη λόγω της προσθήκης του εδάφους, το οποίο εν γένει έχει υψηλότερη ειδική ραδιενέργεια  $^{40}\text{K}$ . Από τον πίνακα 5.1 προκύπτει ότι υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις της ειδικής ραδιενέργειας των  $^{226}\text{Ra}$  και  $^{40}\text{K}$  στα τμήματα 9 και 4 της αποκατεστημένης ζώνης. Το τεμάχιο 9 ειδικότερα παρουσιάζει ειδική ραδιενέργεια της τάξης των 170 Bq/kg για το  $^{40}\text{K}$  και 180 Bq/kg για το  $^{226}\text{Ra}$ . Αυτές οι τιμές είναι ενδιάμεσες μεταξύ ενός τυπικού εδάφους και του PG. Από αυτά τα δεδομένα προκύπτει ότι το χώμα στο τεμάχιο 9 είναι ένα μίγμα τυπικού εδάφους στο άνω μέρος και PG παρακάτω. Σύμφωνα με το (UNSCEAR, 1993) η μέση ειδική ραδιενέργεια στο έδαφος των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  είναι 30, 25, και 370 Bq/kg αντίστοιχα, ενώ για το χώμα από την αποκατεστημένη ζώνη η ειδική ραδιενέργεια για τα  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  εκτιμήθηκε σε 83, 15 και 225 Bq/kg αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τις αναφορές (Papastefanou C. et al., 2006) και (Abbadly et al., 2005) οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας του  $^{226}\text{Ra}$  σε άλλες χώρες κυμαίνονταν από 10 Bq/kg για τη Φινλανδία έως 5022 Bq/kg σε φωσφορικά ορυκτά της Τανζανίας (Arusha). Όσον αφορά στο  $^{40}\text{K}$ , όπως αναφέρεται από τους (Guimond and Hardin, 1989) η ειδική ραδιενέργεια κυμαίνεται από 4 Bq/kg στο Taiba-Togo έως 329.4 Bq/kg σε φωσφορικά ορυκτά από την Αίγυπτο (W. El-Mahamid). Τέλος το  $^{232}\text{Th}$  κυμαίνεται μεταξύ 2 Bq/kg στην Ιορδανία έως 329.4 Bq/kg σε φωσφορικό βράχο στην Αίγυπτο (W. El-Mahamid). Ένα σαφές συμπέρασμα από τις παραπάνω

τιμές είναι η μεγάλη διακύμανση των τιμές της ειδικής ραδιενέργειας για το  $^{226}\text{Ra}$ . Αυτή η ανομοιογένεια δεν πρέπει να προκαλεί έκπληξη καθώς μπορεί να αποδοθεί κυρίως στην πηγή του φωσφορικού ορυκτού.

Για την αξιολόγηση της δοσιμετρικής επιβάρυνσης εργαζομένων και κοινού, οι (Dueñas C. et al., 2010) χρησιμοποίησαν μία σειρά από δείκτες. Τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 5.2.

Καταρχήν, υπολογίσθηκε ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος η ισοδύναμη ραδιενέργεια ραδίου  $Ra_{eq}$  (Radiation Hazard Index). Η ισοδύναμη ραδιενέργεια ραδίου ( $Ra_{eq}$ ) είναι ένα σταθμισμένο άθροισμα της ραδιενέργειας των ραδιενεργών ισotόπων  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  με βάση την υπόθεση ότι 370 Bq/kg  $^{226}\text{Ra}$ , 259 Bq/kg  $^{232}\text{Th}$  και 4810 Bq/kg  $^{40}\text{K}$  έχουν ως αποτέλεσμα τον ίδιο ρυθμό δόσης λόγω ακτινοβολίας-γ. Η ισοδύναμη ραδιενέργεια ραδίου ( $Ra_{eq}$ ) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + (A_{Th} \times 1.43) + (A_K \times 0.077)$$

όπου  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  και  $A_K$  είναι οι ειδικές ραδιενέργειες των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$ , αντιστοίχως, σε Bq/kg.

Ένας άλλος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο δείκτης  $I_\gamma$  από τη σχέση:

$$I_\gamma = \frac{A_{Ra}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{A_{Th}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{A_K}{3000 \text{ Bq/kg}}$$

όπου  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  και  $A_K$  είναι οι ειδικές ραδιενέργειες των  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$ , αντιστοίχως, σε Bq/kg. Επισημαίνεται ότι ο δείκτης αυτός αφορά σε οικοδομικά υλικά και συνεπώς έχει νόημα η αξιολόγησή του μόνον εφόσον το υπό εξέταση υλικό χρησιμοποιείται ως έχει στις οικοδομές.

Τέλος, για τον υπολογισμό του ρυθμού απορροφώμενης δόσης στον αέρα, στην υπόψη εργασία χρησιμοποιήθηκε η σχέση (Beck et al., 1972):

$$D = 0.429A_U + 0.666A_{Th} + 0.042A_K$$

όπου  $A_U$ ,  $A_{Th}$ ,  $A_K$  οι ειδική ραδιενέργεια των  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{40}\text{K}$  στο έδαφος. Προκειμένου να εκτιμηθεί η ετήσια ενεργός δόση, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο συντελεστής μετατροπής από την απορροφώμενη δόση στον αέρα σε ενεργό δόση, οποίος σύμφωνα με το (UNSCEAR, 2000) είναι 0.7 Sv/Gy. Η ετήσια ενεργός δόση (E σε μονάδες nSv υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$E = D \cdot T \cdot F$$

όπου D είναι ο υπολογιζόμενος ρυθμός δόσης (σε nGy/h), T είναι η χρονική διάρκεια έκθεσης (occupancy factor) και F είναι ο συντελεστής μετατροπής (0.7 Sv/Gy).

Στους σωρούς φωσφογύψου, οι μέσες τιμές  $Ra_{eq}$  από τις ενεργές στοίβες PG, τις μη αποκατεστημένες και αποκατεστημένες ζώνες ήταν 660, 591 και 122 Bq/kg αντίστοιχα. Οι μέσες τιμές του  $I_\gamma$  για τις ανενεργές στοίβες PG, τις μη αποκατεστημένες και αποκατεστημένες ζώνες ήταν 2.2, 1.97 και 0.50 αντίστοιχα. Η απορροφώμενη δόση στις ανενεργές στοίβες PG ποικίλλει στην περιοχή στα 247-325 nGy/h με μέση τιμή τα 284 nGy/h.

**Πίνακας 5.2** Εκτίμηση της δοσιμετρικής επιβάρυνσης από τις αποθέσεις PG στη Huelva

Ζώνη	Περιγραφή	$Ra_{eq}$ (Bq/Kg)	$I_{\gamma r}$ (Bq/Kg)	Τιμές δόσεων (nGy/h)	Ενεργός δόση ( $\mu$ Sv/y) κοινό	Ενεργός δόση ( $\mu$ Sv/y) εργαζόμενοι
Σωροί PG	South pond	574	1.9	247	303	254
	North pond	652	2.2	280	344	289
	Dividing line	755	2.5	325	399	335
Μη αποκατεστημένη ζώνη	Τεμάχιο 6	554	1.8	239	293	246
	Τεμάχιο 7	545	1.8	235	289	242
	Τεμάχιο 4	674	2.3	290	356	299
Αποκατεστημένη ζώνη	Τεμάχιο 10	71	0.3	34	42	35
	Τεμάχιο 5	86	0.3		49	41
	Τεμάχιο 9	204	0.7	90	110	92
	Τεμάχιο 4	231	0.8	101	123	104
	Τεμάχιο 2	69	0.3	33	40	34
	Τεμάχιο 8	69	0.3	33	41	34

Για τις μη αποκατεστημένες και αποκατεστημένες ζώνες η απορροφώμενη δόση κυμαίνεται στην περιοχή των 235-290 nGy/h (μέση τιμή 255 nGy/h) και 33-101 nGy/h (μέση τιμή 55 nGy/h) αντίστοιχα. Ο μέσος ρυθμός απορροφώμενης δόσης των ανενεργών στοιβών PG είναι σχεδόν πέντε φορές υψηλότερος από την εκτιμώμενο μέσο ρυθμό δόσης των 55 nGy/h (UNSCEAR, 1993), ενώ για τις μη αποκατεστημένες ζώνες είναι σχεδόν τέσσερις φορές υψηλότερες από τα 55 nGy/h. Ο ετήσιος ρυθμός δόσης λόγω εξωτερικής  $\gamma$ -ακτινοβολήσης (mSv/y) που λαμβάνουν οι εργαζόμενοι εκτιμήθηκε λαμβάνοντας υπόψη 1840 ώρες εργασίας ετησίως και συντελεστή παρουσίας 0.8 και βρέθηκε ίσος με: 0.293, 0.262 και 0.057 mSv/y από τις ανενεργές στοίβες PG, μη αποκατεστημένες και αποκατεστημένες ζώνες αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι πολύ χαμηλότερες από το διεθνές όριο δόσης των 20 mSv/έτος για επαγγελματικά εκτιθέμενους (ICRP-60, 1990).

Όσον αφορά στη ετήσια δόση για το κοινό, αυτή υπολογίσθηκε με την παραδοχή του συντελεστή παρουσίας 0.2 και για 8766 ώρες ετησίως και βρέθηκε να έχει τις τιμές 349, 313 και 68  $\mu$ Sv, για τις ανενεργές στοίβες PG, μη αποκατεστημένες και αποκατεστημένες ζώνες αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι πολύ χαμηλότερες του 1 mSv/y συνιστώμενου ορίου μέγιστης ετήσιας δόσης για το κοινό από τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP-60, 1990) και του μέσου όρου της ετήσιας ενεργού δόσης από φυσικές πηγές (2.4 mSv/έτος).

### 5.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις αποθέσεις φωσφογύψου σε αποκατεστημένο χώρο απόβλητων στην περιοχή Σχιστού (Πειραιάς, Ελλάδα)

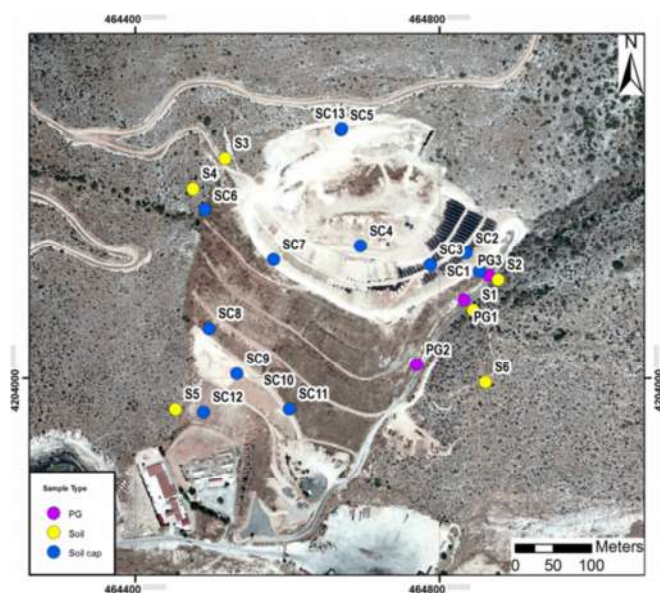
Από το 1979 έως το 1989, δέκα εκατομμύρια τόνοι φωσφογύψου, ένα υπόλειμμα της ελληνικής βιομηχανίας φωσφορικών λιπασμάτων αποτέθηκαν σε εγκαταλελειμμένο λατομείο

ασβεστόλιθου στο πρώην εργοστάσιο αποβλήτων του Σχιστού, στον Πειραιά. Το 2016 δημοσιεύθηκε η εργασία των (Parageorgiou F., et al, 2016) στην οποία μελετάται η περιβαλλοντική επίπτωση από τις αποθέσεις αυτές, χρησιμοποιώντας τεχνικές γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης σε συνδυασμό με χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. Συγκεκριμένα, χαρτογραφήθηκε η ειδική ραδιενέργεια στις αποθέσεις. Οι μετρήσεις που έγιναν δείχνουν αυξημένες συγκεντρώσεις του  $^{226}\text{Ra}$  σε μια συγκεκριμένη περιοχή στο απόκρημνο νοτιοανατολικό βράχο του αποκατεστημένου χώρου αποβλήτων, που περιλαμβάνει ακάλυπτο φωσφογύψο και είναι γνωστό ότι επηρεάζεται από τις τοπικές καιρικές συνθήκες. Οι συγκεντρώσεις του  $^{226}\text{Ra}$  κυμαίνονται από 162 έως 629 Bq/kg, με τη μέση ραδιενέργεια να απαντάται στη χαμηλή πλευρά.

Στο σχήμα 5.4 φαίνεται μία άποψη των αποκατεστημένων αποθέσεων, ενώ στο σχήμα 5.5 χάρτης με τα σημεία δειγματοληψίας.



**Σχήμα 5.4** Άποψη των αποκατεστημένων αποθέσεων



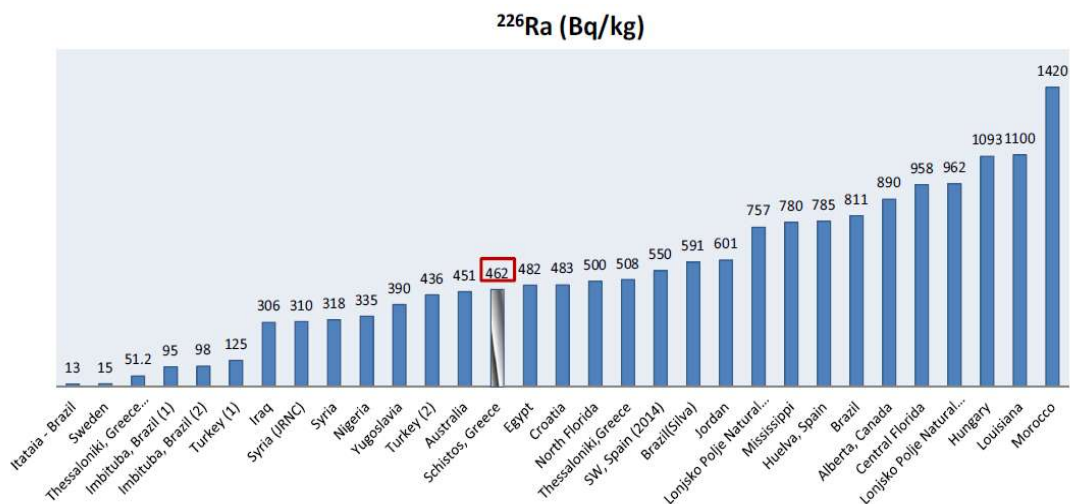
**Σχήμα 5.5** Σημεία δειγματοληψίας στο χώρο αποβλήτων Schistos PG (μοβ σημεία: PG · μπλε σημεία: χώμα από το κάλυμμα της απόθεσης · κίτρινα σημεία: έδαφος από τη γύρω περιοχή)

Στον πίνακα 5.3 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε όρους ειδικής ραδιενέργειας για τα δείγματα που αναλύθηκαν. Όπως διαπιστώνεται, η ειδική ραδιενέργεια  $^{226}\text{Ra}$  του PG που αποτέθηκε στην περιοχή του Σχιστού κυμαίνονται από 162-629 Bq/kg μέση τιμή 462 Bq/kg. Οι τιμές αυτές είναι σχετικά χαμηλές, σε σύγκριση με τους παγκόσμιους μέσους όρους, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6 όπου παρατίθενται τιμές της ειδικής ραδιενέργειας του  $^{226}\text{Ra}$  από διάφορες χώρες του κόσμου.

**Πίνακας 5.3** Ειδική ραδιενέργεια των δειγμάτων που αναλύθηκαν (Bq/kg)

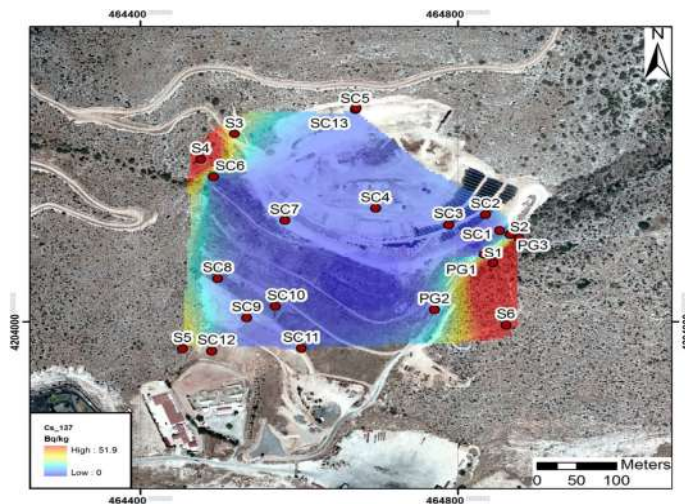
Δείγμα	$^{234}\text{Th}$	$^{235}\text{U}$	$^{214}\text{Pb}$	$^{214}\text{Bi}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{208}\text{Tl}$	$^{234}\text{Pa}$	$^{40}\text{K}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{137}\text{Cs}$
	Μέσος όρος									
<b>PG01</b>	32	1.49	550	505	10	15	36	10	597	0
<b>PG02</b>	100	8.89	505	470	6	4	94	14	629	0
<b>PG03</b>	13	0.92	146	138	8	9	26	103	162	0
<b>S1</b>	30	2.91	80	72	26	24	26	279	147	52
<b>S2</b>	55	0.12	97	88	31	33	89	356	149	35
<b>S3</b>	24	0.88	29	29	41	41	18	424	46	11
<b>S4</b>	18	0.36	48	43	40	38	39	438	91	50
<b>S5</b>	15	0.77	29	27	28	30	7	380	49	24
<b>S6</b>	16	1.46	25	23	37	35	18	388	40	9
<b>SC1</b>	17	1.21	26	23	47	44	12	880	40	0
<b>SC2</b>	2	0.01	17	16	18	17	2	276	33	0.6
<b>SC3</b>	5	0.25	13	12	18	16	2	249	19	0.4
<b>SC4</b>	4	0.18	14	13	18	18	2	248	23	0.5
<b>SC5</b>	11	0.15	12	12	12	10	7	168	13	0.5
<b>SC6</b>	3	0.60	10	11	17	16	3	249	16	0.1
<b>SC7</b>	6	0.08	11	11	15	15	9	246	16	0
<b>SC8</b>	6	0.51	15	14	21	21	10	406	27	0.7
<b>SC9</b>	3	0.15	12	11	19	14	10	229	28	0
<b>SC10</b>	7	0.30	16	15	26	25	10	452	28	0
<b>SC11</b>	12	0.15	15	14	23	18	17	287	21	0
<b>SC12</b>	0	0.29	14	12	15	15	2	312	24	0

Σε δύο από τα δείγματα χώματος που αναλύθηκαν (S1, S2) διαπιστώθηκε σχετικά αυξημένη ειδική ραδιενέργεια  $^{226}\text{Ra}$ . Αυτό πιθανά οφείλεται σε ρύπανση του εδάφους - πιθανόν από την αέρια μεταφορά του PG από κοντινή περιοχή που έχει αποκατασταθεί. Μελέτη του Υπο-Πελαγονιανού (Τριασικό) ασβεστόλιθου, που είναι στην πραγματικότητα το γεωλογικό υπόβαθρο του λατομείου το Σχιστού, υποδεικνύει αμελητέες ποσότητες U και Th στα βράχια (Godelitsas, αδημοσίευτα αποτελέσματα). Αυτό υποδεικνύει μικρή ή καθόλου παρεμβολή στη του φυσικού υποβάθρου του βράχου στη μετρηθείσα ραδιενέργεια του PG.



**Σχήμα 5.6** Οι μέσες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας των  $^{226}\text{Ra}$  του PG από διάφορες χώρες

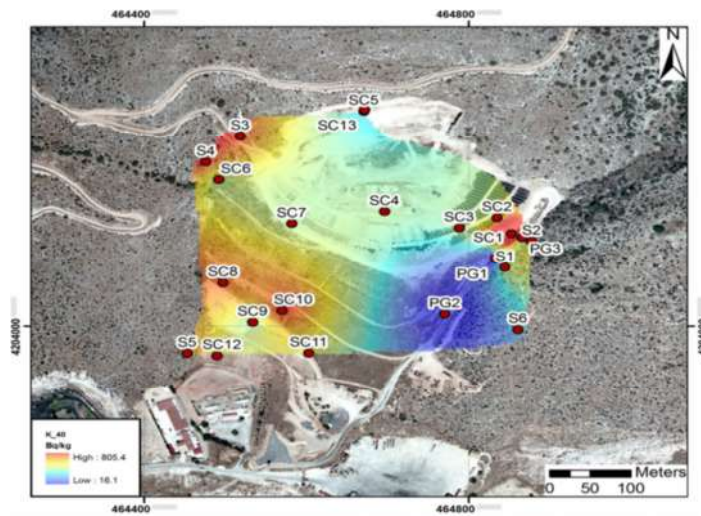
Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι όλα τα δείγματα εδάφους εμφανίζουν αυξημένες συγκεντρώσεις σε  $^{40}\text{K}$  (229-880 Bq/kg), καθώς και ίχνη  $^{137}\text{Cs}$  (0-52 Bq/kg) που οφείλεται στο ατύχημα του Chernobyl (Simopoulos 1989). Στα σχήματα 5.7, 5.8 και 5.9 φαίνεται η χαρτογράφηση της ειδικής ραδιενέργειας των  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ , και  $^{226}\text{Ra}$  αντίστοιχα στην περιοχή, ενώ στα σχήματα 5.10, 5.11 και 5.12 παρουσιάζεται η ειδική ραδιενέργεια των  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  και  $^{226}\text{Ra}$  σε κάθε θέση δειγματοληψίας.



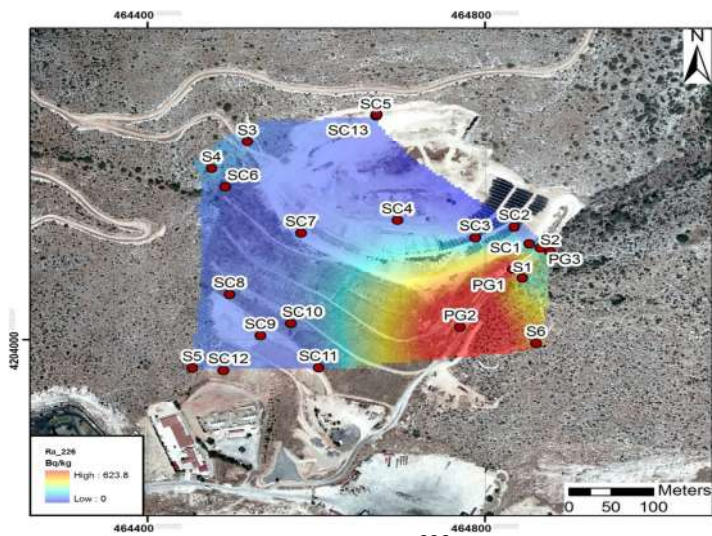
**Σχήμα 5.7** Η χωρική κατανομή των  $^{137}\text{Cs}$  στην περιοχή μελέτης

Από τα σχήματα 5.7 – 5.12 διαπιστώνεται ότι στο τμήμα της απόθεσης PG, το οποίο είναι εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα, δηλαδή δεν έχει καλυφθεί, παρατηρούνται από τις υψηλότερες συγκεντρώσεις  $^{226}\text{Ra}$ . Πρόκειται για ένα απομονωμένο τμήμα του νοτιοανατολικού βράχου της απόθεσης. Αυτή η περιοχή είναι γνωστό ότι επηρεάζεται τοπικά από άνεμους και βροχοπτώσεις, γεγονός που αυξάνει τη δυνατότητα για το  $^{226}\text{Ra}$  να διασκορπιστεί στο κοντινό περιβάλλον. Εκτιμάται ότι ο περιβαλλοντικός κίνδυνος ελαχιστοποιείται με μια μικρής κλίμακας αποκατάσταση αυτής της ακάλυπτης περιοχής, χρησιμοποιώντας γεωμεμβράνες και παχιά κάλυψη εδάφους με βλάστηση, όπως στην περίπτωση των υπόλοιπων αποθεμάτων PG. Οι συγκεντρώσεις  $^{226}\text{Ra}$  που παρατηρήθηκαν στην περιοχή Σχιστού είναι σχετικά χαμηλές σε σύγκριση με εκείνες που έχουν αναφερθεί για άλλες περιοχές απόρριψης PG σε όλο τον κόσμο.





Σχήμα 5.8 Η χωρική κατανομή των  $^{40}\text{K}$  στην περιοχή μελέτης



Σχήμα 5.9 Η χωρική κατανομή των  $^{226}\text{Ra}$  στην περιοχή μελέτης



Σχήμα 5.10 Η ποσοτικοποιημένη κατανομή του  $^{137}\text{Cs}$  στην περιοχή μελέτης



Σχήμα 5.11 Η ποσοτική κατανομή του  $^{40}\text{K}$  στην περιοχή μελέτης



Σχήμα 5.12 Η ποσοτικοποιημένη κατανομή του  $^{226}\text{Ra}$  στην περιοχή μελέτης



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

### ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΛΙΚΩΝ NORM – ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ – ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

#### 6.1 Εισαγωγή

Τα φυσικά ραδιενεργά υλικά (NORMs) αγγίζουν πολλές πτυχές της ζωής, αρχίζοντας από τον επαγγελματικό κίνδυνο, την ακτινοβόληση του κοινού εξαιτίας της χρήσης των NORM - κυρίως στην βιομηχανία οικοδομικών υλικών, δραστηριότητες αναψυχής που περιλαμβάνουν επισκέψεις σε spa και τελειώνει με τα τεράστια ποσά απόβλητων που απορρίπτονται συχνά στο περιβάλλον. Κάθε τύπος NORM καθορίζει συνήθως συγκεκριμένα σενάρια έκθεσης κοινού και εργαζομένων που διαφέρουν από τα αντίστοιχα των τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων.

Γενικά, η ανακύκλωση των υπολειμμάτων NORM, ή η χρήση τους σε άλλες εφαρμογές, αντί για την απόρριψή τους ως απόβλητα στο περιβάλλον, είναι μια ιδέα που κερδίζει έδαφος συνεχώς τα τελευταία χρόνια. Υπάρχουν πολλές δυνατότητες για την ανακύκλωση των υπολειμμάτων NORM. Ομοίως, υπάρχουν πολλές ευκαιρίες για την ασφαλή χρήση υπολειμμάτων NORM ως παραπροϊόντων. Τα υπολείμματα NORM πρέπει επομένως, να θεωρούνται περισσότερο ως πόρος παρά ως απόβλητα.

Όταν δεν είναι εφικτή η ανακύκλωση ενός υπολείμματος NORM, το υλικό πρέπει να αντιμετωπίζεται ως απόβλητο. Με αυτήν την έννοια θα πρέπει να υπόκειται στην ίδια γενική εθνική προσέγγιση όπως και για τα αλλιά ραδιενεργά απόβλητα ώστε να εξασφαλίζεται ότι η διαχείριση τους είναι ασφαλής, τεχνικά βέλτιστη και οικονομικά αποδοτική. Προκειμένου να αποκτηθούν οι απαραίτητες γνώσεις και πληροφορίες για τη θέσπιση εθνικής στρατηγικής για τα NORM και την διαχείριση των αποβλήτων, πρέπει πρώτα να γίνει χαρακτηρισμός της τρέχουσας κατάστασης. Μετά από αυτό το βήμα θα πρέπει να επιλεγεί η βέλτιστη διαχείριση αποβλήτων NORM. Η ανάπτυξη στρατηγικής για τη διαχείριση αποβλήτων NORM θα πρέπει να καθοδηγείται από την ανάγκη για τη διατήρηση των κινδύνων λόγω της ακτινοβολίας τόσο χαμηλά όσο σε λογικά εφικτό. Για κάθε επιλογή οι κίνδυνοι και τα οφέλη πρέπει να αξιολογούνται χρησιμοποιώντας ανάλυση όλων των τεχνικών παραμέτρων. Κατά την αξιολόγηση των διαφόρων επιλογών όσον αφορά τους κινδύνους για την υγεία, την ασφάλεια και τις περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις, οι επιλογές θα πρέπει να κατατάσσονται ξεχωριστά για το επιχειρησιακό κομμάτι και την περίοδο αποθήκευσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αποκατάσταση των περιοχών που έχουν ρυπανθεί με NORM μπορεί να αποτελέσει και σημαντική πηγή νέων αποβλήτων NORM.

Τα πρότυπα ασφάλειας του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (IAEA) αντικατοπτρίζουν μια διεθνή συναίνεση για το τι συνιστά υψηλό επίπεδο ασφάλειας για την προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος από τις επιβλαβείς επιπτώσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Καθορίζουν τις απαιτήσεις για την προστασία από την ακτινοβολία και την ασφάλεια των

ραδιενεργών πηγών στα Διεθνή Βασικά Πρότυπα Ασφαλείας (BSS). Αυτές οι απαιτήσεις διέπονται από τους στόχους, τις έννοιες και τις αρχές των θεμελιωδών αρχών ασφάλειας. Η υιοθέτηση των προτύπων ασφάλειας του ΔΟΑΕ κατά την καθιέρωση εθνικής προσέγγισης όσον αφορά τα NORM και την διαχείριση των καταλοίπων τους είναι σημαντική όχι μόνο για τη διασφάλιση του αναγκαίου επιπέδου προστασίας αλλά και για την επίτευξη εναρμονισμένης προσέγγισης μεταξύ των διαφόρων χωρών.

## 6.2 Νομοθεσία

Σε όλες τις χώρες του κόσμου τα τελευταία χρόνια έχουν νομοθετηθεί διατάξεις που αφορούν την προστασία από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Ιδιαίτερα σε χώρες όπου αξιοποιείται η πυρηνική ενέργεια και ήδη διέθεταν συγκεκριμένο νομικό πλαίσιο, το οποίο εμπλουτίστηκε τα τελευταία χρόνια λαμβάνοντας, υπόψη και άλλες βιομηχανικές διεργασίες που παράγουν ακτινοβολίες καθώς και ζητήματα των φυσικά ραδιενεργών υλικών (NORM).

Στις ΗΠΑ, η EPA (Environmental Protection Agency) έχει την ευθύνη για προτάσεις στον συγκεκριμένο τομέα. Από τον Δεκέμβριο του 1963 μέχρι το Οκτώβριο του 1992 έχουν νομοθετηθεί 11 οδηγίες (acts) που αφορούν την προστασία από τη ραδιενέργεια και τα φυσικά ραδιενεργά υλικά:

1. The Clean Air Act (αφορά την ατμοσφαιρική ρύπανση όπου συμπεριλαμβάνει και ρύπους με αυξημένα επίπεδα ραδιενεργών ισοτόπων)
2. Reorganization Plan No. 3 (περιλαμβάνει την αρχή για τη μέτρηση των επιπέδων ακτινοβολίας του περιβάλλοντος, την ανάπτυξη οδηγιών προστατευτικής δράσης και την παροχή σχετικής βοήθειας)
3. The Clean Water Act (ρυθμίζει τις απορρίψεις ρύπων συμπεριλαμβανομένων ορισμένων ραδιενεργών ισοτόπων στα ύδατα)
4. The Marine Protection, Research and Sanctuaries Act (απαγορεύει συγκεκριμένα τη διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας σε ωκεανούς)
5. The Safe Drinking Water Act (αφορά την έκδοση και εφαρμογή πρότυπων για ρύπους στα δημόσια συστήματα ύδρευσης, συμπεριλαμβανομένων των ραδιενεργών ισοτόπων)
6. Uranium Mill Tailings (ορίζει υγειονομικά και περιβαλλοντικά πρότυπα τόσο σε ενεργούς όσο και σε ανενεργούς χώρους απορριμμάτων ουρανίου)
7. Superfund (αφορά την άμεση ανταπόκριση από την απελευθέρωση επικίνδυνων ουσιών περιλαμβανομένων και ραδιενεργών)
8. Low Level Waste (ισχύει για την προτεινόμενη αποθήκη ραδιενεργών αποβλήτων στο βουνό Yucca)
9. Nuclear Waste (περί Πολιτικής Πυρηνικών Αποβλήτων θεσπίζει διαδικασίες για την επιλογή βάθους γεωλογικών αποθετηρίων για την ασφαλή αποθήκευση ή / και διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων)
10. The Energy Policy Act (περί ενεργειακής πολιτικής απαιτεί από την EPA να δημοσιεύσει πρότυπα για να εξασφαλίσει την προστασία της δημόσιας υγείας από τα ραδιενεργά απόβλητα υψηλού επιπέδου)
11. WIPP (αφορά την δημιουργία χωρών αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων)

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) η νομοθέτηση αντίστοιχων δράσεων ξεκίνησε τον 1987 με την Οδηγία 87/600/EURATOM που αφορά τις κοινοτικές ρυθμίσεις για την έγκαιρη ανταλλαγή πληροφοριών σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης λόγω ακτινοβολιών. Αυτές οι οδηγίες εντάσσονται ή συμπληρώνουν τους νομούς που έχει κάθε κράτος μέλος. Τον Δεκέμβριο του 2013 εκδόθηκε η Οδηγία 59 για τη θέσπιση βασικών προτύπων ασφαλείας (Basic safety Standards, BSS) για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από την έκθεση σε ιοντιζουσες ακτινοβολίες (2013/59/EURATOM). Τον Νοέμβριο του 2018 ολοκληρώθηκε η εναρμόνιση της εθνικής Νομοθεσίας και στην Ελλάδα, με την έκδοση του Προεδρικού Διατάγματος 101. Ήδη έχει ξεκινήσει και η έκδοση σειράς Κοινών Υπουργικών Αποφάσεων που προβλέπονται στο ΠΔ.

Το ΠΔ 101/2018 αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σχέδιο προστασίας από τις ιοντιζουσες ακτινοβολίες στη χώρα. Περιλαμβάνει 106 άρθρα που αφορούν – μεταξύ άλλων – στην προστασία από φυσικά και τεχνικά ραδιενεργά υλικά από την εξόρυξη την χρήση έως και την διαχείριση των αποβλήτων. Εισάγει βασικές έννοιες για την ακτινοπροστασία, τους ορισμούς, τις μονάδες μέτρησης καθώς και τα φυσικά και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα.

Όσον αφορά τα υλικά NORM, το άρθρο 54 που αφορά το ραδόνιο στους χώρους εργασίας καθορίζει το εθνικό επίπεδο αναφοράς για τη συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους εργασίας στα  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Στο άρθρο 103 αναπτύσσεται σχέδιο δράσης για το ραδόνιο όπου περιλαμβάνει τον περιορισμό του ραδονίου σε νέα κτήρια και την ευθύνη που έχει η ΕΕΑΕ (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας) για τις μετρήσεις σε περιοχές υψηλής συγκέντρωσης. Τέλος το άρθρο 75 αφορά την ακτινοβολία γάμμα από οικοδομικά υλικά και ορίζει το επίπεδο αναφοράς για την εξωτερική έκθεση σε ακτινοβολία γάμμα που εκπέμπεται από οικοδομικά υλικά στο εσωτερικό των κτιρίων στο  $1 \text{ mSv}$  ανά έτος.

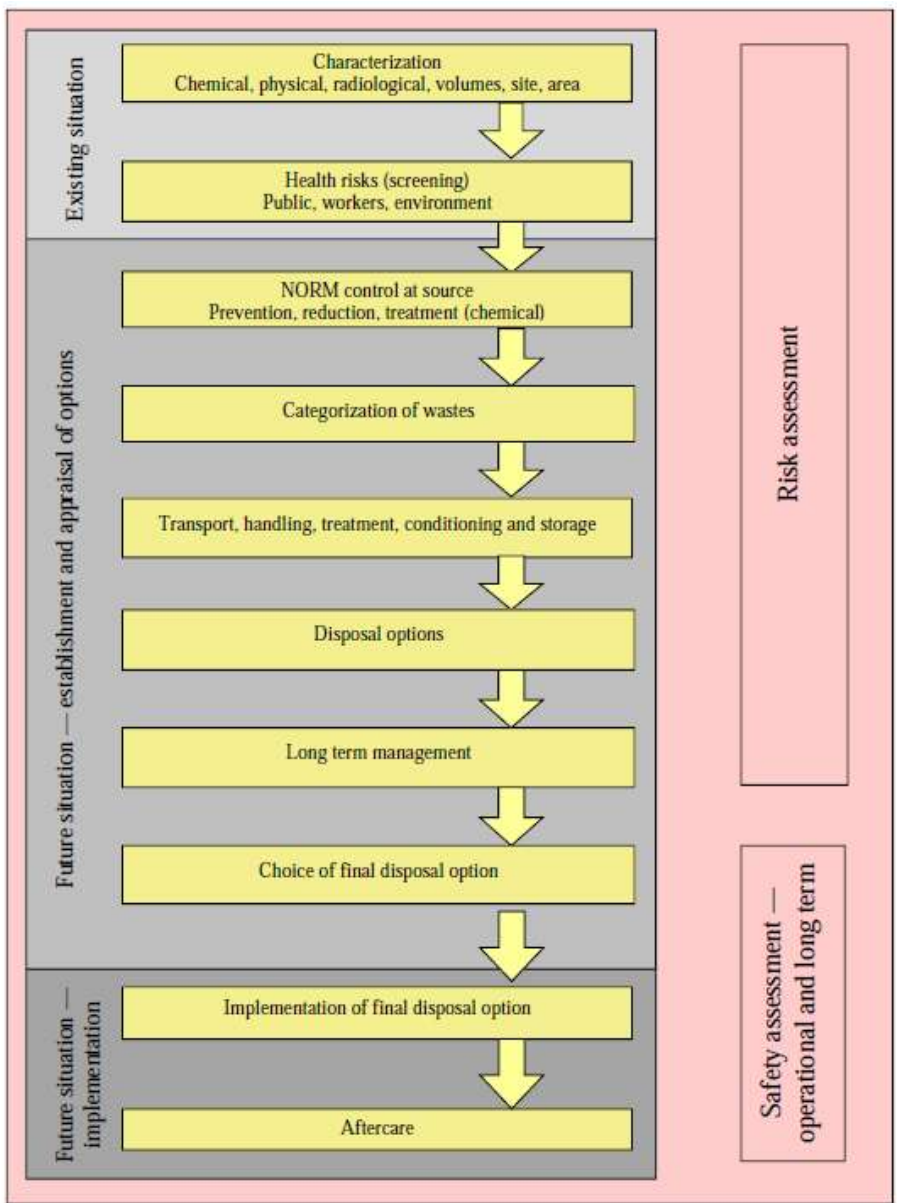
### 6.3 Διαχείριση Υλικών NORM

Ορισμένα υπολείμματα μεταλλευμάτων με τη μορφή «αποβλήτων» πετρωμάτων ενδέχεται να μπορούν να υποστούν νέα επεξεργασία στο μέλλον για να γίνει εξαγωγή του υπολειμματικού περιεχομένου μετάλλων, ανάλογα με το ορυκτό, τις τρέχουσες τιμές και τις εξελίξεις στην τεχνολογία εξόρυξης. Εν τω μεταξύ, τέτοια κατάλοιπα μπορούν γενικά να χρησιμοποιούνται με ασφάλεια ως υλικά κατασκευής με κάποιους περιορισμούς, όταν οι συγκεντρώσεις των περιεχομένων ραδιενεργών ισotόπων είναι συνήθως πολύ χαμηλές. Ορισμένες εφαρμογές όπως τα δομικά υλικά μπορεί να υπάρχουν στο ίδιο το ορυχείο. Για παράδειγμα, υπολείμματα πετρωμάτων (συμπεριλαμβανομένων εκείνων με σημαντικά αυξημένες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αναχωμάτων για τα υπολείμματα της εξόρυξης. Άλλες εφαρμογές εξαρτώνται από τον τύπο του υπολείμματος, όπως φαίνεται στη συνέχεια.

Ένα παράδειγμα είναι η ερυθρά ιλύς από την επεξεργασία του βωξίτη, η οποία έχει διάφορες πιθανές χρήσεις ως υποπροϊόν, αν και δεν είναι ακόμα ευρέως εκμεταλλεύσιμη. Μπορεί να υποστεί επεξεργασία για να ανακτηθούν μέταλλα όπως ο σίδηρος και το τιτάνιο. Μπορεί ακόμα να ενσωματωθεί σε δομικά υλικά όπως τούβλα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή

καταλυτών και κεραμικών. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βελτιωτικό εδάφους και για χώρους υγειονομικής ταφής.

Ένα άλλο υπόλειμμα είναι ο φωσφογύψος, οποίος έχει ένα ευρύ φάσμα εμπορικών χρήσεων, κυρίως στις γεωργικές εφαρμογές, όπως την βελτίωση του εδάφους, αλλά και σε εφαρμογές κατασκευών όπως γυψοσανίδες, ενισχυμένες ίνες, πρόσθετο σε τσιμέντο (2-5%) και υλικό για κατασκευή δρόμων. Δείχνει επίσης να είναι δυνατή η χρήση του και ως κάλυμμα και υλικό επένδυσης για εγκαταστάσεις χώρων υγειονομικής ταφής καθώς και σε θαλάσσιες εφαρμογές όπως η προστασία των ακτών και την δημιουργία τεχνητών υφάλων. Λόγω των χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας που συνήθως έχει αυτές οι χρήσεις του φωσφογύψου γενικά δεν έχουν σημαντικές ραδιολογικές επιπτώσεις.



**Σχήμα 6.1** Διαδικασία για την ανάπτυξη και την εφαρμογή μιας στρατηγικής διαχείρισης NORM (IAEA TECDOC 1712, 2013)

### 6.3.1 Μεταφορά NORM

Η αξιοποίηση ενός υλικού το οποίο έχει ενδεχομένως έχει αξιόλογα επίπεδα ραδιενέργειας απαιτεί τη μεταφορά του στον χώρο αξιοποίησης του. Κατά τη διάρκεια της μεταφοράς ραδιενεργών υλικών πρέπει να διασφαλιστεί η προστασία των εργαζομένων, του κοινού και του περιβάλλοντος (IAEA TECDOC 1728, 2013). Οι κίνδυνοι από την ακτινοβολία πρέπει να αξιολογούνται και να λαμβάνονται αποφάσεις σχετικά με τον έλεγχο που πρέπει να ασκηθεί για να εξασφαλιστεί η ασφαλής μεταφορά. Το σύστημα του ΔΟΑΕ για την απαλλαγή ραδιενεργών υλικών από ρυθμιστικό έλεγχο (Πρότυπα Ασφαλείας της σειράς TS-R-1, “Κανονισμοί για την ασφαλή μεταφορά ραδιενεργών ουσιών”) βασίζεται στην αρχή ότι οι τιμές απαλλαγής πρέπει να είναι ανάλογες με τον κίνδυνο που παρουσιάζει το υλικό. Με βάση τον κανονισμό IAEA Safety Series No. 6, “Κανονισμοί για η Ασφαλή Μεταφορά Ραδιενεργού Υλικού”, (αρχική έκδοση το 1985 και ενημερωμένη έκδοση το 1990), ορίζεται ραδιενεργό οποιοδήποτε υλικό έχει ειδική ραδιενέργεια μεγαλύτερη από 70 Bq/g. Αυτός ο ορισμός ήταν ανεξάρτητος από τα ραδιενεργά ισότοπα που περιέχονται στο υλικό και παρέχει μια βολική κατευθυντήρια γραμμή για την απαλλαγή ραδιενεργών υλικών από τον ρυθμιστικό έλεγχο.

Ως αποτέλεσμα, η έκδοση του κανονισμού περί μεταφορών του 1996 εισήγαγε ειδική απαλλαγή στα ραδιενεργά ισότοπα, αντί της μοναδικής τιμής των 70 Bq/g. Έκτοτε, μεταλλεύματα, απορρίμματα από μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις (π.χ. φωσφορικά άλατα, άνθρακας, ορυκτή άμμος κλπ) εντάχθηκαν στο πεδίο εφαρμογής των κανονισμών μεταφοράς. Με αυτή την αλλαγή στα επίπεδα εξαίρεσης, υλικά που προηγουμένως δεν εθεωρούντο ραδιενεργά υλικά για μεταφορά, έγιναν αντικείμενο περαιτέρω έρευνας. Αυτή η αλλαγή αύξησε σημαντικά το κόστος της αποστολής ορισμένων υλικών. Διεθνής διάσκεψη που έγινε τον Ιουλίου 2003 για την ασφάλεια της μεταφοράς ραδιενεργών υλικών αναγνώρισε την ανάγκη για πρόσθετη έρευνα, με στόχο τη μείωση του περιττού κανονιστικού φόρτου που σχετίζονται με τη μεταφορά ραδιενεργών υλικών που απαντούν σε φυσική κατάσταση και έχουν πολύ χαμηλή ραδιενέργεια. Απαντώντας σε αυτή την ανάγκη, ο ΔΟΑΕ ανέλαβε συντονισμένο ερευνητικό έργο για να προσδιορισθούν οι τύποι των μεταφερόμενων υλικών NORM και οι συνακόλουθες δόσεις ακτινοβολίας στους εργαζομένους και το κοινό ως αποτέλεσμα των μεταφορών.

### 6.3.2 Επεξεργασία και αποθήκευση NORM

Η επεξεργασία των αποβλήτων εν γένει έχει ως σκοπό την τροποποίηση των χαρακτηριστικών τους. Οι βασικές μέθοδοι επεξεργασίας είναι η μείωση του όγκου, η αφαίρεση ραδιενεργών ισοτόπων ή άλλων επικίνδυνων στοιχείων και η αλλαγή σύνθεσης. Η μείωση του όγκου είναι συνεπής με την καθιερωμένη προσέγγιση «συγκέντρωση και συγκράτηση» για την διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων. Καθιστά τα απόβλητα ευκολότερα στη διαχείριση, αλλά αυξάνουν τη συγκέντρωση των περιεχομένων ραδιενεργών ισοτόπων. Οι τεχνικές μείωσης του όγκου περιλαμβάνουν την αποτέφρωση και τη συμπίκνωση. Η απομάκρυνση ραδιενεργών ισοτόπων από υγρά απόβλητα μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η εξάτμιση, η διήθηση και η ανταλλαγή ιόντων. Επίσης η μεταβολή της σύνθεσης των υγρών αποβλήτων μπορεί να επιτευχθεί με καθίζηση ή κροκιδώση συγκεκριμένων χημικών ειδών. Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ενδέχεται να οδηγήσει σε διάφορους τύπους δευτερογενών

ραδιενεργών αποβλήτων (ενδεχομένως με υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας) που πρέπει επίσης να αντιμετωπιστούν, όπως μολυσμένα φίλτρα, χρησιμοποιημένες ρητίνες και λάσπη.

Η αποθήκευση αποβλήτων NORM ενδέχεται να χρειάζεται να εξεταστεί σε οποιοδήποτε σημείο του κύκλου ζωής τους μεταξύ των βημάτων διαχείρισης ή εντός αυτών. Μεγάλες ποσότητες αποβλήτων NORM όπως τα απορρίμματα ορυχείων και ο φωσφογύψος συνήθως πρέπει να παραμείνουν σε σχεδιασμένους χώρους στην επιφάνεια και στον τόπο στον οποίο δημιουργήθηκαν επειδή η μεταφορά τους εκτός του χώρου είναι υπερβολικά δαπανηρή και μπορεί να εισάγει πρόσθετους κινδύνους για την υγεία, την ασφάλεια και το περιβάλλον. Οι εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενδέχεται τελικά να καταστούν εγκαταστάσεις διάθεσης και πρέπει να σχεδιαστούν και με αυτόν τον τρόπο, καθώς ενδέχεται να προκύψουν ευκαιρίες για το αποθηκευμένο υλικό να υποστεί νέα επεξεργασία ή να χρησιμοποιηθεί ως παραπροϊόν. Απόβλητα NORM που παράγονται σε μέτριες ποσότητες (αλλά με ενδεχομένως σχετικά υψηλή ραδιενέργεια) συχνά αποθηκεύονται υπό κάλυψη στην τοποθεσία στην οποία παράγονται ή σε άλλη κατάλληλη τοποθεσία, εν αναμονή της διάθεσης σε εύλογο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, είναι απαραίτητο ένα σχέδιο διάθεσης, να συμπεριλαμβάνεται και να εφαρμόζεται από την αρχή. Διαφορετικά, όταν η εγκατάσταση παύσει να λειτουργεί, το κλείσιμο του χώρου ενδέχεται να μην είναι δυνατό. Εκτός από τη σκόνη κλιβάνου στην οποία τα κύρια ραδιενεργά ισότοπα ενδιαφέροντος είναι τα  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{210}\text{Po}$ , τα οποία έχουν σχετικά μικρό χρόνο υποδιπλασιασμού, η αποθήκευση δεν αποτελεί βιώσιμη επιλογή διαχείρισης για τα απόβλητα NORM επειδή τα ραδιενεργά ισότοπα που συνήθως περιέχουν έχουν πολύ μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού.

### 6.3.3 Απόρριψη NORM

Η απόρριψη στο περιβάλλον είναι έως σήμερα συχνά το τελικό βήμα στον κύκλο ζωής των ραδιενεργών αποβλήτων. Για τους περισσότερους τύπους ραδιενεργών αποβλήτων, η προσέγγιση της διαχείρισης συνεπάγεται συγκέντρωση ή και περιορισμό, με τα απόβλητα να τοποθετούνται σε εγκατάσταση διάθεσης με εύλογα επίπεδα ασφάλειας, χωρίς να υπάρχει πρόθεση για ανάκτηση στο μέλλον και κατά προτίμηση, χωρίς ανάγκη για μακροπρόθεσμη παρακολούθηση και συντήρηση της εγκατάστασης. Η ασφάλεια στην πλειονότητα των περιπτώσεων εξασφαλίζεται με την απομόνωση των αποβλήτων στη μονάδα διάθεσης με τη χρήση φραγμάτων, κάτω και γύρω από τα ραδιενεργά απόβλητα, προκειμένου να περιοριστεί η απελευθέρωση των ραδιενεργών ισωτόπων στο περιβάλλον. Τα φράγματα μπορούν να είναι είτε φυσικά είτε κατασκευασμένα και ένα σύστημα απομόνωσης μπορεί αποτελείται από ένα ή περισσότερα φράγματα. Ένα σύστημα πολλαπλών φραγμών παρέχει μεγαλύτερη εξασφάλιση όσον αφορά την απομόνωση και συμβάλλει στην εξασφάλιση ότι οποιαδήποτε έκλυση ραδιενεργών ισωτόπων στο περιβάλλον θα είναι σε ένα αποδεκτό ποσοστό. Τα φράγματα μπορούν να παρέχουν απόλυτη συγκράτηση για μια χρονική περίοδο, όπως είναι η θήκη για ένα μεταλλικό τοίχωμα ενός δοχείου. Εναλλακτικά, τα φράγματα ενδέχεται να επιβραδύνουν την απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον, όπως συμβαίνει με τα πήλινα στρώματα, τα θωρακισμένα με βράχο καλύμματα ή πετρώματα υποδοχής με υψηλή ικανότητα

απορρόφησης. Το σύστημα φραγής πρέπει να έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με την επιλογή που έχει γίνει για τη διάθεση και τις σχετικές μορφές ραδιενεργών αποβλήτων.

Τα απόβλητα πετρωμάτων τείνουν να παράγονται σε μεγάλες ποσότητες. Μερικές φορές δεν είναι εφικτό να χρησιμοποιούνται ως υποπροϊόν και πρέπει να απορριφθούν. Όπως συμβαίνει με τους μεγάλους όγκους NORM, υπάρχουν περιορισμένες επιλογές διάθεσης. Μπορεί να παραμείνουν στη θέση τους ως σωροί ή, όπου υπάρχει δυνατότητα, μπορεί να διοχετευθούν μέσα στο εξαντλημένο ορυχείο. Η έκταση των μέτρων – τεχνικών ή διοικητικών – που πρέπει να λαμβάνονται εξαρτώνται από τα επίπεδα των επικίνδυνων συστατικών που περιέχονται στα απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των ραδιενεργών ισotόπων.

Τα απορρίμματα βωξίτη (ερυθρά ιλύς) απορρίπτονται συνήθως ως πολτός (10-30% στερεά) σε μεγάλες ποσότητες μέσα σε δοχεία ή μεγάλες δεξαμενές (Σχήμα 6.2). Για τη συμπύκνωση των απορριμμάτων χρησιμοποιούνται ειδικά συστήματα αποστράγγισης. Άλλες επιλογές, ειδικότερα κατά το παρελθόν είναι η απόρριψη στη θάλασσα ή η απόθεση στο έδαφος μετά από αφυδάτωση. Σε κάθε περίπτωση ο κίνδυνος από τη ραδιενέργεια που περιέχεται στην ερυθρά ιλύ είναι μόνο ένας από τους πολλούς που ενέχει η πρακτική αυτή για το περιβάλλον.

Τα υπολείμματα από την επεξεργασία φωσφορικών ορυκτών (φωσφογύψος) συνήθως επιστρέφονται στο χώρο εξόρυξης ως λάσπη – εφόσον αυτό είναι εφικτό. Η συσσώρευση του φωσφογύψου πραγματοποιείται με υγρή εναπόθεση (ως πολτός) ή ξηρή εναπόθεση. Ο ραδιολογικός κίνδυνος εκτιμάται ότι είναι χαμηλός, λόγω των συνήθως χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας, σε σύγκριση με άλλα θέματα υγείας και ασφάλειας. Δεδομένου ότι η παραγωγή φωσφογύψου υπερβαίνει κατά πολύ τη ζήτηση για γεωργική και οικοδομική χρήση, ένα μεγάλο μέρος από αυτό απορρίπτεται τελικά ως απορρίμματα NORM.



**Σχήμα 6.2** Υγρή απόθεση ερυθράς ιλύος

Η διάθεση συνήθως πραγματοποιείται επιτόπου με τη μετατροπή των υφιστάμενων μεγάλων εγκαταστάσεων συγκράτησης σε μόνιμες εγκαταστάσεις διάθεσης, με ταυτόχρονη αποκατάσταση (σχήμα 6.3). Λιγότερο συχνά, και κυρίως κατά το παρελθόν ο φωσφογύψος απορρίπτεται σε υδάτινα σώματα (σχήμα 6.4), συνήθως σε μεγάλα ποτάμια, εκβολές ποταμών ή στη θάλασσα.



**Σχήμα 6.3** Αποθέσεις φωσφογύψου μετατρέπονται σε μόνιμη εγκατάσταση διάθεσης



**Σχήμα 6.4** Απόρριψη φωσφογύψου στο περιβάλλον



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Λεωνίδου Δ., Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολιών & ύλης – Δοσιμετρία – Θωράκιση, Ε.Μ.Π., 1984.
2. Προεδρικό Διάταγμα, 101/2018, “ Προσαρμογή της ελληνικής νομοθεσίας στην Οδηγία 2013/59/Ευρατόμ του Συμβουλίου, της 5ης Δεκεμβρίου 2013, για τον καθορισμό βασικών προτύπων ασφάλειας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες και την κατάργηση των Οδηγιών 89/618/Ευρατόμ 90/641/Ευρατόμ, 96/29/Ευρατόμ, 97/43/Ευρατόμ και 2003/122/Ευρατόμ (ΕΕ L13/17.1.2014) - Θέσπιση Κανονισμών Ακτινοπροστασίας”, Εφημερίδα της Κυβέρνησης της Ελληνικής Δημοκρατίας, 20/11/2019.
3. Abbady A.G.E., Uosif M.A.M., El-Taher, A., Natural radioactivity and dose assessment for phosphate rocks from Wadi El-Mashash and El-Mahamid Mines, Egypt. *Journal of Environmental Radioactivity*, 84, 2005, 65–78.
4. Amer H.A., Shawky S., Hussein M.I. and Abd El-Hady M. L., Radiological study of exposure levels in El Maghara underground, *Journal of Environmental Monitoring*, 4, ,(2002), 583-587.
5. Anagnostakis M.J., Hinis E.P. and Simopoulos S.E.,  $^{228}\text{U}$  and its daughter products in Greek surface soils, *Radioactivity in the Environment*, 7, 2005, 175-186.
6. Beck H.L., Decompo J., Gologak J., In-situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma ray spectrometry. Health and Safety Laboratory AEC, New York, 1972, Report HASL 258.
7. Dueñas C., Fernández M.C., Cañete S. and Pérez M., Radiological impacts of natural radioactivity from phosphogypsum piles in Huelva (Spain), *Radiation Measurements*, 45 2010, 242–246.
8. European Commission, Radiation protection 112 Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, 1999.
9. Fotakis M., Tsikritzis L., Tzimkas N., Kolovos N., Tsikritzi, R., Naturally Occurring Radionuclides of Ash Produced by Coal Combustion. The Case of the Kardias Mine in Northern Greece, AIP Conference Proceedings, 1034, 326 (2008); <https://doi.org/10.1063/1.2991239>
10. García-Tenorio R., Bolivar J.P., Gazquez M. J., Mantero J., Management of by-products generated by NORM industries: towards their valorization and minimization of their environmental radiological impact, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 306 (93), 2015, 641–648.
11. Guimond R.J., Hardin J.M., Radioactivity released from phosphate containing fertilizers and from gypsum. *Radiation Physics Chemistry*, 34, 1989, 309–315.
12. Hofmann J., Leicht R., Wingender H.J. and Wörner J., “Natural Radionuclide Concentrations in Materials Processed in the Chemical Industry and the Related Radiological Impact” EUR 19264, European Commission, 2000.
13. IAEA TECDOC Series, “Management of NORM Residues”, TECDOC-1712, 2013.
14. IAEA TECDOC Series, “Regulatory Control for the Safe Transport of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)”, TECDOC-1728, 2013.

15. ICRP Publication 60, Recommendations of the international commission on radiological protection, Annals of ICRP 21, 1990, 1–3.
16. ICRP Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
17. Karagiannidi T., Papaefthymiou H., Papatheodorou G., Radioactive impact of a bauxite beneficiation plant in the Itea Gulf (Gulf of Corinth, Greece), Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 279, No.3 (2009) 923–934.
18. Karangelos D.J., Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J., Hinis E.P. and Simopoulos S.E., Radiological characteristics and investigation of the radioactive equilibrium in the ashes produced in lignite-fired power plants, Journal of Environmental Radioactivity 77 (2004) 233–246.
19. Kovács T., Sas Z., Jobbágy V., Csordás A., Szeiler G. and Somlai J., Radiological Aspects of Red Mud Disaster in Hungary, Acta Geophysica, 61 (4), 2013, 1026-1037.
20. Lauer N.E., Hower J.C., Hsu-Kim H., Taggart R.K. and Vengosh A., Naturally Occurring Radioactive Materials in Coals and Coal Combustion Residuals in the United States, Environmental Science and technology, 15, 49 (18) (2015) 11227-11233.
21. Lebecka, J., Skubacz K., Chalupnik S., Tomza 1., Pluta I. and Skowronek J., Influence of mining activity on distribution of radium in the natural environment. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Working Meeting on Isotopes in Nature, Leipzig, Germany, September 1986.
22. Louizi A., Proukakis C., Petropoulos N.P. and Simopoulos, S.E., natural radioactivity content and radon exhalation rate of Greek building materials, International Workshop “Indoor Air – an Integrated Approach”, Gold Coast, Australia, 27/11-01/12/1994, Proceedings (1995) 131-134.
23. O’Connor B.H., Donoghue A.M., Manning T.J.H. and Chesson B.J., Radiological Assessment for Bauxite Mining and Alumina Refining, Annals of Occupational Hygiene, Vol. 57, No. 1, 2013, 63–76.
24. Pakou A.A., Assimakopoulos P.A. and Prapidis, M., Natural radioactivity and radon emanation factors in building material used in Epirus (northwestern Greece). Sci. Total Environ. 144, 1994, 255–260.
25. Papaefthymiou H., Symeopoulos B.D., Soupioni M., Neutron activation analysis and natural radioactivity measurements of lignite and ashes from Megalopolis basin, Greece. J. Radioanal. Nucl. Chem., 274 (1), 2007, 123–130.
26. Papaefthymiou H., Gouseti O., Natural radioactivity and associated radiation hazards in building materials used in Peloponnese, Greece, radiation Measurements, 43, 2008, 1453-1457.
27. Papageorgiou F., Godelitsas A., Mertzimekis T. J., Xanthos S., Voulgaris N. and Katsantonis G., Environmental impact of phosphogypsum stockpile in remediated Schistos waste site (Piraeus, Greece) using a combination of  $\gamma$ -ray spectrometry with geographic information systems, Environ Monit. Assess, 2016, 188: 133
28. Papastefanou C., Charalambous, S., On the radioactivity of fly ashes from coal power plants. Z. Naturforsch., 34a, 1979, 533–537.
29. Papastefanou C., Radiation impact from lignite burning due to  $^{226}\text{Ra}$  In Greek coal-fired power plants, Health Physics, 70(2), 1996, 187-191.

30. Papastefanou C., Stoulos S., Manolopoulou M., The radioactivity of building materials. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 266 (3), 2005, 367-372.
31. Papastefanou C., Stoulos S., Ioannidou A. and Manolopoulou M., The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact, *Journal of Environmental Radioactivity*, 89, 2006, 188–198.
32. Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J. and Simopoulos S.E., Photon attenuation, natural radioactivity content and radon exhalation rate of building materials. *J. Environ. Radioactivity*, 61, 2002, 257–269.
33. Righi S. and Bruzzi L., Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings. *Journal of Environmental Radioactivity*, 88, 2006, 158-170.
34. Rizzo S., Brai, M., Basile S., Bellia S., Hauser S., Gamma activity and geochemical features of building materials: estimation of gamma dose rate and indoor radon levels in Sicily. *Applied Radiation and Isotopes*, 55, 2001, 259-265.
35. Skubacz K., Lebecka J., Chalupnik S. and Wysocka M., Possible Changes in Radiation Background of the Natural Environment Caused by Coal Mine Activity, *Energy Sources*, 14, (1992) 149-153.
36. Skodras G., Grammelis P., Kakaras E., Karangelos D.J., Anagnostakis M.J. and Hiniš E.P., Quality characteristics of Greek fly ashes and potential uses, *Fuel Processing Technology*, 88 (2007) 77–85.
37. Scholten, L.C., L.M.M. Roelofs, and J. Van der Steen, A survey of potential problems for non-nuclear industries posed by implementation of new EC standards for natural radioactivity, KEMA Report, 40059-NUC 93-5203, Arnhem, (1993).
38. Simopoulos S.E., Angelopoulos M.G., 1987. Natural radioactivity releases from lignite power plants in Greece, *J. Environ. Radioact.* 5, 379–389.
39. Simopoulos, S. E., Soil sampling and <sup>137</sup>Cs analysis of the Chernobyl fallout in Greece. *Applied Radiation and Isotopes*, 40 (7), 1989, 607–613.
40. Somlai J., Jobbágy V., Kovács J., Tarján S., Kovács T., Radiological aspects of the usability of red mud as building material additive. *Journal of Hazardous Materials*, 150, 2008, 541-545.
41. Sorantin, H., and Steger F., Eigenradioaktivität von verschiedenen Materialien, *Atomkernenerg. Kernt.* 44, 4, (1984) in German.
42. Stojanovska Z., Nedelkovski D. and Ristova M., Natural radioactivity and human exposure by raw materials and end product from cement industry used as building materials, *radiation Measurements*, 45 (2010), 969-972.
43. Stoulos S., Manolopoulou M., Papastefanou C., Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece. *J. Environ. Radioactivity*, 69, 2003, 225–240.
44. Turhan S., Assessment of the natural radioactivity and radiological hazards in Turkish cement and its raw materials. *Journal of Environmental Radioactivity* 99, 2007, 404-414.
45. UNSCEAR, 1982. Sources and effects of ionizing radiation. Report to General Assembly with Scientific Annexes, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.

46. UNSCEAR, 1988. Sources and effects of ionizing radiation. Report to General Assembly with Scientific Annexes, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.
47. UNSCEAR, 1993. Sources and effects of ionizing radiation. Report to General Assembly with Scientific Annexes, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.
48. UNSCEAR, 1998. Sources and effects of ionizing radiation. Report to General Assembly with Scientific Annexes, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.
49. UNSCEAR, 2000. Sources and effects of ionizing radiation. Report to General Assembly with Scientific Annexes, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.

## ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx>
2. [https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=coal\\_home](https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=coal_home)
3. <https://www.worldenergy.org/data/resources/country/greece/coal/>
4. <https://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs163-97/FS-163-97.html>
5. <http://newenergybank.blogspot.com/2011/09/end-of-cheap-coal.html>
6. <http://www.aluminum.org/industries/production/bauxite>
7. [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_countries\\_by\\_bauxite\\_production](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_bauxite_production)
8. <https://academic.oup.com/annweh/article/57/1/63/211823>
9. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3881159/>
10. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/fach03.cfm>
11. <http://www.cima.com.my/process.aspx>
12. <https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphogypsum>
13. [https://www.epa.gov/radiation/radiation-regulations-and-lawshttps://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_countries\\_by\\_bauxite\\_production](https://www.epa.gov/radiation/radiation-regulations-and-lawshttps://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_bauxite_production)