



**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»

**Εκτίμηση της δοσιμετρικής κατανομής μέσα σε
δωμάτιο, εξαιτίας της ραδιενέργειας των
οικοδομικών υλικών, με χρήση τεχνικών
προσομοίωσης Monte-Carlo**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Βασίλειου Αντ. Παναγόπουλου

Επιβλέπων: Μ. Ι. Αναγνωστάκης

Αθήνα, Ιούνιος 2017

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 στα πλαίσια του ΔΠΜΣ Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές. Οι προσομοιώσεις διενεργήθηκαν στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Με την ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κύριο Μάριο Ι. Αναγνωστάκη για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω το μεταπτυχιακό φοιτητή Κώστα Αθανασόπουλο, ο οποίος με εισήγαγε στον κόσμο της προσομοίωσης, καθώς και το επιστημονικό προσωπικό του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας για τη φιλοξενία και τη στήριξη που μου προσέφεραν.

Θα ήθελα, επιπλέον, να ευχαριστήσω όσους πίστεψαν στις δυνατότητές μου και με ενθάρρυναν σε κάθε στάδιο των σπουδών μου, στηρίζοντας τις επιλογές μου.

Ο δρόμος ήταν ανηφορικός και δύσκολος, αλλά η θέα από ψηλά είναι σίγουρα υπέροχη.

Περίληψη

Όλα τα οικοδομικά υλικά περιέχουν ποσότητες ραδιοϊσοτόπων των φυσικών ραδιενεργών σειρών του ουρανίου και του θορίου, καθώς και του ραδιοϊσοτόπου του καλίου, συμβάλλοντας στην έκθεση του πληθυσμού σε φυσική ραδιενέργεια.

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η εκτίμηση της δοσιμετρικής κατανομής μέσα σε ένα δωμάτιο τυπικών διαστάσεων, εξαιτίας της ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών. Η δοσιμετρική αυτή κατανομή πραγματοποιήθηκε με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo και συγκεκριμένα με χρήση του κώδικα PENELOPE 2011.

Η εικονική γεωμετρική κατασκευή στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις είναι ένα δωμάτιο με εσωτερικές διαστάσεις $5m \times 4m \times 2.8m$, με πάχος τοίχων, οροφής και δαπέδου $20cm$, το οποίο διαθέτει μία πόρτα και ένα παράθυρο. Για τη συγκρότηση της πολύπλοκης γεωμετρίας του δωματίου χρησιμοποιήθηκαν δεκατρία διαφορετικά δομικά στοιχεία – “σώματα”. Τα δεκατρία σώματα, που συναποτελούν το δωμάτιο, ορίστηκαν ως πηγές όγκου. Ο κώδικας PENELOPE, με τη βοήθεια των “τυχαίων” αριθμών, κατανέμει ομοιόμορφα, σε όλο τον όγκο των πηγών, τους ραδιενεργούς πυρήνες και υπολογίζει τις τροχιές και τις πιθανές αλληλεπιδράσεις καθενός από τα εκπεμπόμενα από τους πυρήνες φωτόνια με τα δομικά συστατικά της ύλης. Στο εσωτερικό του δωματίου και σε απόσταση $140cm$ από το δάπεδο εκτείνεται σε όλο το μήκος και πλάτος του δωματίου ένας εικονικός ανιχνευτής δόσης, με το υλικό του οποίου αλληλεπιδρούν τα εκπεμπόμενα από τις πηγές όγκου φωτόνια (καθώς και πιθανά δευτερογενή σωμάτια), αποθέτοντας την ενέργειά τους. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η αποτιθέμενη ενέργεια στο χώρο και γίνεται η εκτίμηση της δόσης.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν οκτώ προσομοιώσεις· μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενων φωτονίων. Τρεις από αυτές εκπέμπονται από θυγατρικό πυρήνα της φυσικής ραδιενεργού σειράς του ^{238}U , τέσσερις από θυγατρικούς πυρήνες της φυσικής ραδιενεργού σειράς του ^{232}Th , ενώ μία από αυτές από το ραδιενεργό ^{40}K . Οι ενέργειες αυτές επιλέχθηκαν επειδή, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είναι οι ενέργειες με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη δόση. Για κάθε μία από τις οκτώ ενέργειες, ο κώδικας PENELOPE υπολόγισε τη δοσιμετρική

κατανομή στο δωμάτιο. Η γενική εικόνα που αποκομίζουμε είναι ότι όσο απομακρυνόμαστε από κάποιο τοίχο η αποτιθέμενη δόση μειώνεται.

Για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας δόσης, λάβαμε υπόψη τους συντελεστές εκπομπής των φωτονίων που εκπέμπονται από τους θυγατρικούς πυρήνες των φυσικών ραδιενεργών σειρών του ^{238}U και του ^{232}Th , καθώς και από το ^{40}K , ενώ θεωρήσαμε ότι ο μέσος χρόνος διαμονής του πληθυσμού στο εσωτερικό των κτηρίων ανέρχεται στις 7000 ώρες ετησίως.

Η μέση ετήσια δόση στο εσωτερικό του δωματίου εκτιμήθηκε στα $(0.22 \pm 0.03)\text{mSv}$. Η τιμή αυτή συγκρίθηκε με τη βιβλιογραφική τιμή των 0.25mSv που αντλήθηκε από την τεχνική έκθεση *Radiation Protection 112* της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

Η τιμή των 0.22mSv που υπολογίσαμε ήταν αναμενόμενο να βρίσκεται λίγο χαμηλότερα από τη βιβλιογραφική τιμή καθότι στην προσομοίωση δεν λάβαμε υπόψη το συνολικό πλήθος των ενεργειών που εκπέμπονται από τους ραδιενεργούς πυρήνες, παρά μόνο οκτώ ενέργειες. Επιπλέον, η γεωμετρία που χρησιμοποιήσαμε περιλαμβάνει και δύο ανοίγματα στους τοίχους (πόρτα και παράθυρο), σε αντίθεση με τη γεωμετρία στην οποία βασίζεται το αποτέλεσμα της τεχνικής έκθεσης *Radiation Protection 112* από όπου απουσιάζουν πόρτες ή παράθυρα, με συνέπεια την απόθεση και καταγραφή χαμηλότερων δόσεων καθώς ο συνολικός όγκος των πηγών όγκου εμφανίζεται μειωμένος. Πάντως, η βιβλιογραφική τιμή βρίσκεται εντός των ορίων της στατιστικής αβεβαιότητας που συνοδεύει τον υπολογισμό μας.

Abstract

Most of building materials are naturally radioactive because they contain natural radionuclides of the Uranium and Thorium series and the radioactive isotope of Potassium. These radionuclides emit gamma rays which can be a source of external radiation exposure.

This master thesis deals with the dosimetric distribution inside a typical room, as a result of the radioactivity of building materials. The dosimetric distribution was carried out using Monte Carlo simulation techniques, namely by using the PENELOPE 2011 code.

The virtual construction in which the simulations were carried out is a typical $5m \times 4m \times 2.8m$ room with $20cm$ wall, ceiling and floor thickness. It has a door and a window and it is created by thirteen bodies which were defined as volume sources. The PENELOPE code uses "random" numbers to distribute the radionuclides uniformly in the volume sources and it calculates the trajectories and the possible interactions of each of the emitted photons into matter. At a distance of $140cm$ from the floor, a virtual dose detector extends over the entire length and width of the room and its material interacts with the emitted, from the volume sources, photons. Photons as well as secondary particles deposit their energy to the dose detector and in this way the dose distribution is estimated.

We performed eight simulations in total· one simulation for each energy. Three of them are emitted from a daughter nucleus of the ^{238}U series, four of them from daughter nuclei of the ^{232}Th series and one of them is emitted from ^{40}K . The PENELOPE code estimates the dose distribution for each one of them. The higher doses become as a result of the superposition of the emitted radiation from two or more volume sources, while, generally the dose is reduced as the distance from the volume sources increases.

In order to calculate the average annual dose we took into account the emission factors for each one of the photon energies that are emitted. We also considered that the average time that is spent by a person indoors is about 7000 hours per year.

The estimation of the average annual dose indoors is $(0.22 \pm 0.03)mSv$. This value was compared with the $0.25mSv$ literature value from the technical report *Radiation Protection 112* by the European Commission.

We expected that the value of $0.22mSv$, that we calculated, was slightly lower than the literature value, because we didn't take into account the total number of the emitted photon energies, but only eight of them. Furthermore, the geometry that we used has a door and a window, in contrast with the European Commission's geometry which has no openings in the walls, so the total volume of the volume sources of our simulations is lower. However, the literature value is within the uncertainty limits of our calculation.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	1
2	Εξωτερική έκθεση στο εσωτερικό κατοικιών εξαιτίας της ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών.....	4
2.1	Φυσική ραδιενέργεια οικοδομικών υλικών	4
2.1.1	Εισαγωγή	4
2.1.2	Η τεχνική της γ-φασματοσκοπίας – Αυταπορρόφηση στα οικοδομικά υλικά. 8	
2.2	Εκτίμηση της δόσης στο εσωτερικό της κατοικίας με χρήση μοντέλων	12
2.2.1	Η εξάρτηση της δόσης από τη θέση στο χώρο.....	14
2.2.2	Η εξάρτηση της δόσης από τις διαστάσεις του δωματίου και την πυκνότητα των υλικών	16
2.2.3	Η επίδραση της γεωμετρίας του μοντέλου στη δόση	19
2.3	Κριτήρια Δόσης – Δείκτες.....	19
2.3.1	Η τεχνική έκθεση Radiation Protection 112 και ο δείκτης I.....	20
2.3.2	Μία ρεαλιστικότερη προσέγγιση για τον έλεγχο της φυσικής ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών.....	26
2.3.3	Σύγκριση των δεικτών I_{112} και $I(\rho d)$	31
2.4	Η βάση δεδομένων για τη φυσική ραδιενέργεια στα οικοδομικά υλικά	33
2.5	Φυσική ραδιενέργεια οικοδομικών υλικών στην Ελλάδα και σύγκριση με άλλες χώρες.....	40
2.5.1	Φυσική ραδιενέργεια οικοδομικών υλικών που χρησιμοποιούνται στον ελλαδικό χώρο.....	41
2.5.2	Φυσική ραδιενέργεια οικοδομικών υλικών σε διάφορες χώρες ανά τον κόσμο.....	43
2.6	Φυσική ραδιενέργεια σε υλικά επικάλυψης	47
2.6.1	Φυσική ραδιενέργεια σε δείγματα κεραμικών.....	48
2.6.2	Φυσική ραδιενέργεια σε δείγματα γρανίτη.....	51
2.6.3	Φυσική ραδιενέργεια σε δείγματα μαρμάρου – Σύγκριση με δείγματα γρανίτη.....	54

3	Εκτίμηση της δοσιμετρικής κατανομής μέσα σε δωμάτιο, με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte – Carlo	56
3.1	Εισαγωγή.....	56
3.2	Ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE.....	58
3.2.1	Το σύστημα αρχείων του κώδικα PENELOPE.....	58
3.2.2	Ανιχνευτής δόσης	59
3.3	Εκτίμηση δόσης από σημειακή πηγή.....	60
3.3.1	Θεωρητικός υπολογισμός δόσης από σημειακή πηγή.....	60
3.3.2	Εκτίμηση δόσης από σημειακή πηγή μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo	61
3.4	Εκτίμηση δόσης από πηγή όγκου.....	63
3.4.1	Θεωρητικός υπολογισμός δόσης από πηγή όγκου.....	63
3.4.2	Εκτίμηση δόσης από πηγή όγκου μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo	66
3.5	Εκτίμηση της δοσιμετρικής κατανομή μέσα σε δωμάτιο, μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo	68
3.5.1	Το αρχείο γεωμετρίας.....	68
3.5.2	Εκτίμηση της δοσιμετρικής κατανομής μέσα και έξω από το δωμάτιο	71
3.5.3	Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 609keV	73
3.5.4	Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 1120keV	76
3.5.5	Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 1764keV	77
3.5.6	Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 239keV	78
3.5.7	Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 338keV	79
3.5.8	Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 583keV	80
3.5.9	Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 911keV	81
3.5.10	Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 1460keV	82
3.5.11	Συνολική δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο	83
4	Συμπεράσματα – Προτάσεις για το μέλλον	90
	Βιβλιογραφία	94
	Παράρτημα Α.....	98
	Παράρτημα Β.....	113
	Παράρτημα Γ.....	124
	Παράρτημα Δ.....	134

1 Εισαγωγή

Ο αστικός πληθυσμός καταναλώνει περίπου το 80% του χρόνου ζωής του στο εσωτερικό των κτηρίων. Αυτό έχει ως συνέπεια την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής ενέργειας εξαιτίας της ύπαρξης ασταθών πυρήνων (ραδιενεργών) στα οικοδομικά υλικά. Η μεγαλύτερη συνεισφορά στην εκπεμπόμενη ραδιενέργεια οφείλεται στους θυγατρικούς ραδιενεργούς πυρήνες των ^{226}Ra και ^{232}Th καθώς και στο ^{40}K . Οι πυρήνες αυτοί είναι ασταθείς και διασπώνται, εκπέμποντας, πέραν των σωματιδίων- α ή β και φωτόνια υψηλής ενέργειας (ακτινοβολία- γ). Αυτά τα ασταθή ισότοπα βρίσκονται στις πρώτες ύλες από τις οποίες παρασκευάζονται τα οικοδομικά υλικά και για αυτό το λόγο τα επίπεδα της ραδιενέργειας και κατά συνέπεια και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας των οικοδομικών υλικών σχετίζονται άμεσα με τον τόπο εξόρυξης της πρώτης ύλης.

Η έκθεση του πληθυσμού σε φυσική ραδιενέργεια διακρίνεται σε εξωτερική και εσωτερική. Η εξωτερική έκθεση οφείλεται κυρίως στην απευθείας προσβολή του οργανισμού από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα οικοδομικά υλικά (ακτινοβολία- γ). Αντίθετα, η εσωτερική έκθεση γίνεται μέσω της αναπνευστικής οδού και οφείλεται κυρίως στα σωματίδια- α και β που εκπέμπονται από το ραδόνιο, και κυρίως από τα θυγατρικά του, τα οποία αποτίθενται στο αεροζόλ της ατμόσφαιρας.

Λαμβάνοντας υπόψη τους ραδιολογικούς κινδύνους και τις βιολογικές συνέπειες που έχει η έκθεση σε ραδιενέργεια, γίνονται προσπάθειες μείωσης της έκθεσης του πληθυσμού σε αυξημένες δόσεις. Με γνώμονα την αρχή ALARA (As Low As Reasonably Achievable – τόσο χαμηλά όσο είναι λογικά εφικτό), μία αρχή βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για την ακτινοπροστασία από ιονίζουσες ακτινοβολίες, η Ευρωπαϊκή Ένωση νομοθετεί θεσπίζοντας αυστηρά μέτρα για την έλεγχο των επιπέδων εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τα οικοδομικά υλικά. Προς αυτή την κατεύθυνση συνεισφέρουν και τα κριτήρια δόσης, τα οποία πρέπει να ικανοποιούνται, προκειμένου ένα οικοδομικό υλικό να χαρακτηριστεί ως

κατάλληλο από την άποψη της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας λόγω της φυσικής του ραδιενέργειας.

Όσον αφορά στη δόση που οφείλεται σε εσωτερική έκθεση, είναι δυνατό να μειωθεί εφαρμόζοντας συγκεκριμένες τεχνικές για τη μείωση του ραδονίου στο εσωτερικό της κατασκευής, ακόμα και μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής. Αντίθετα, ο μόνος τρόπος μείωσης της δόσης που οφείλεται σε εξωτερική έκθεση είναι η επιλογή, εκ των προτέρων, κατάλληλων οικοδομικών υλικών, με χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή.

Είναι σαφές πως η γνώση για τα επίπεδα της φυσικής ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών είναι σημαντική για τον έλεγχο και τον περιορισμό της έκθεσης του πληθυσμού σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Για αυτό το λόγο, τις τελευταίες δεκαετίες, η έρευνα που επικεντρώνεται σε αυτό το αντικείμενο προχωρά με γοργούς ρυθμούς και κερδίζει το ενδιαφέρον ολοένα και περισσότερων ερευνητών.

Η διεθνής ερευνητική δραστηριότητα που αφορά σε αυτό το αντικείμενο αποτελείται κυρίως από δύο σκέλη. Το πρώτο αφορά στον προσδιορισμό των επιπέδων της φυσικής ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών με χρήση τεχνικών γ-φασματοσκοπίας, ενώ το δεύτερο σχετίζεται με μεθόδους που στοχεύουν στην καλύτερη εκτίμηση των επιπτώσεων εξαιτίας της έκθεσης στην ακτινοβολία, κάτι που μελετάται, εκτός των άλλων, και με την τεχνική της προσομοίωσης Monte Carlo. Με τη γ-φασματοσκοπία ανιχνεύεται και καταγράφεται η ακτινοβολία-γ που εκπέμπεται κατά τη ραδιενεργό διάσπαση των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχονται στα οικοδομικά υλικά, ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων της, και κατά συνέπεια, προσδιορίζεται το είδος και η ενεργότητα των ισοτόπων. Από την άλλη πλευρά, με την προσομοίωση Monte Carlo επιχειρείται η εκτίμηση της δόσης εξαιτίας της ακτινοβολίας χωρίς τη χρήση αναλυτικών μεθόδων και αιτιοκρατικών νόμων. Συγκεκριμένα, με τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς, γίνεται μία εκτίμηση της δόσης που αποτίθεται στο εσωτερικό προτύπων δωματίων, εξαιτίας των οικοδομικών υλικών. Το πρόβλημα προσεγγίζεται με έναν καθαρά στοχαστικό τρόπο, ο οποίος βασίζεται σε μία ακολουθία “τυχαίων” αριθμών οι οποίοι παράγονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Με αυτόν τον τρόπο, η “πειραματική διαδικασία” και εν προκειμένω η απόθεση ενέργειας στον ιστό λόγω της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας πραγματοποιείται εικονικά, κάτω από “ιδανικές συνθήκες”, παρακάμπτοντας τις δυσκολίες που έχει η εκτέλεση του πειράματος με τον “κλασικό” τρόπο.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο, γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στο αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας. Στο δεύτερο,

παρατίθεται μία εκτεταμένη ανασκόπηση στη διεθνή βιβλιογραφία και επισημαίνονται τα βασικά σημεία των επιστημονικών προσεγγίσεων που παρουσιάζονται. Στο τρίτο, γίνεται μία εκτίμηση της κατανομής της δόσης στο εσωτερικό ενός δωματίου τυπικών διαστάσεων ($5m \times 4m \times 2.8m$) το οποίο διαθέτει πόρτα και παράθυρο, με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. Συγκεκριμένα, γίνεται χρήση του κώδικα PENELOPE 2011 (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons), ο οποίος βασίζεται σε ένα μοντέλο σκέδασης που συνδυάζει αριθμητικές βάσεις δεδομένων με μοντέλα ενεργών διατομών, για κάθε έναν από τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη. Με τη βοήθεια ενός εικονικού ανιχνευτή δόσης καταγράφουμε τη δόση και τον τρόπο κατανομής της στον αέρα που περιέχεται στο εσωτερικό του δωματίου. Ακολουθεί η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων, ο υπολογισμός της μέσης ετήσιας δόσης μέσα στο δωμάτιο και η σύγκρισή της με βιβλιογραφικές τιμές. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη μελέτη και προτείνονται μελλοντικά βήματα, στο πέμπτο κεφάλαιο, παρατίθενται οι βιβλιογραφικές πηγές, ενώ στις τελευταίες σελίδες παρουσιάζονται τέσσερα παραρτήματα. Το Παράρτημα Α περιλαμβάνει τα αρχεία γεωμετρίας που δημιουργήθηκαν, το Παράρτημα Β τα αρχεία εισόδου, το Παράρτημα Γ τα αρχεία αποτελεσμάτων και το Παράρτημα Δ μερικές τομές της γεωμετρίας με χρήση του προγράμματος gview.

2 Εξωτερική έκθεση στο εσωτερικό κατοικιών εξαιτίας της ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών

2.1 Φυσική ραδιενέργεια οικοδομικών υλικών

2.1.1 Εισαγωγή

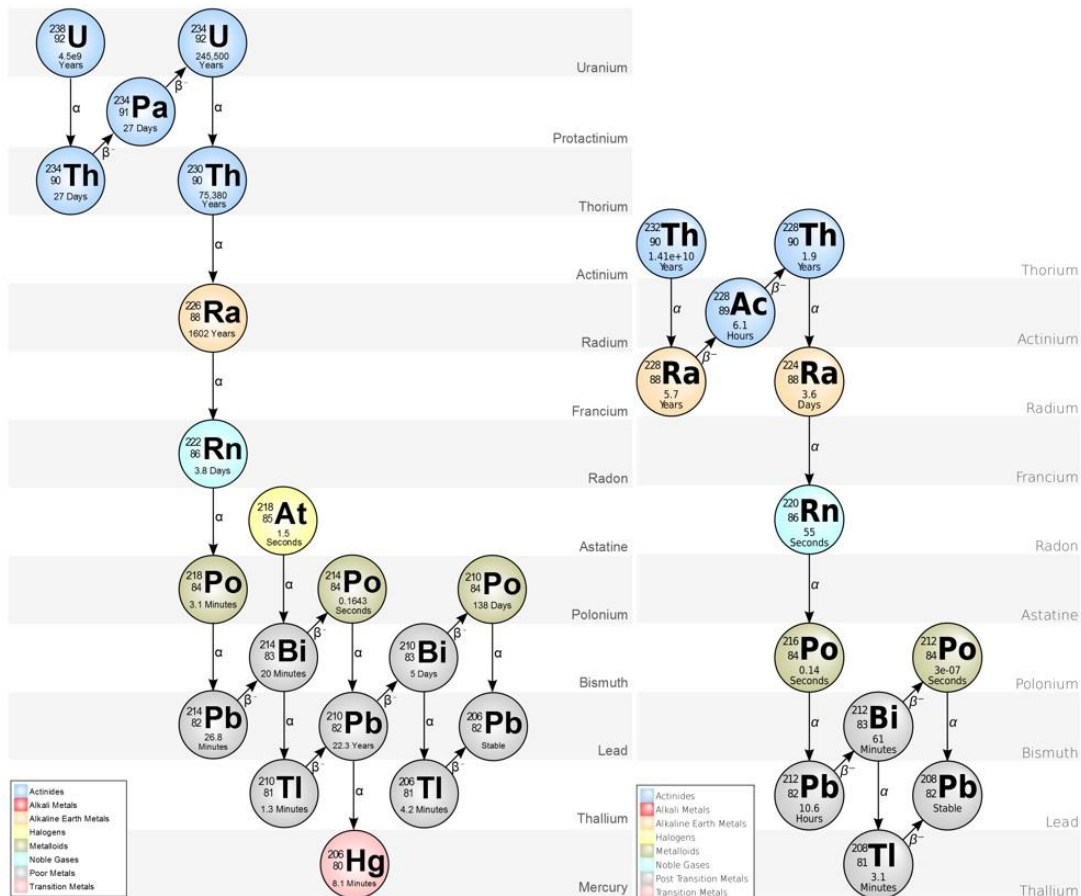
Όλα τα οικοδομικά υλικά περιέχουν ποσότητες φυσικών ραδιοϊσοτόπων συμβάλλοντας σε σημαντικό βαθμό στην έκθεση του πληθυσμού σε φυσική ραδιενέργεια. Τα φυσικά ραδιοϊσότοπα είναι ραδιενεργά στοιχεία που παράγονται από μη ανθρωπογενείς δραστηριότητες και αποτελούν πηγές τόσο εξωτερικής όσο και εσωτερικής έκθεσης του πληθυσμού σε ιονίζουσες ακτινοβολίες. Τα σημαντικότερα φυσικά ραδιοϊσότοπα, όσον αφορά στην εκπομπή ακτινοβολίας είναι: το ^{40}K καθώς και τα θυγατρικά ισότοπα των ραδιενεργών σειρών του ^{238}U και του ^{232}Th . Οι ραδιενεργές σειρές του ^{238}U και του ^{232}Th φαίνονται στο Σχήμα 2.1. Αποτελούν ακολουθίες ασταθών πυρήνων, καθένας από τους οποίους διασπάται παράγοντας νέους ασταθείς πυρήνες έως ότου σχηματιστεί ένα σταθερό ισότοπο. Να σημειωθεί ότι το ^{226}Ra χρησιμοποιείται ως ισότοπο αναφοράς για τον πατρικό πυρήνα της ραδιενεργού σειράς ^{238}U και το ^{232}Th ως ισότοπο αναφοράς για την αντίστοιχη σειρά. Επισημαίνεται ότι σε κάθε ραδιενεργό σειρά υπάρχουν ορισμένα ισότοπα τα οποία παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον λόγω της ακτινοβολίας- γ που εκπέμπουν, ενώ ορισμένα άλλα παρουσιάζουν μικρότερο ενδιαφέρον, όπως π.χ. ο ^{210}Pb ,

που εκπέμπει φωτόνια χαμηλών ενεργειών και με μικρό ποσοστό εκπομπής, τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη στους δοσιμετρικούς υπολογισμούς.

Πριν ξεκινήσει η συζήτηση για τη ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών πρέπει να αναφερθεί ότι τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα βρίσκονται παντού στο περιβάλλον και προφανώς και στο χώμα. Οι τυπικές συγκεντρώσεις χώματος στα ελληνικά εδάφη για τα ραδιοϊσότοπα ^{40}K , ^{226}Ra και ^{232}Th είναι $355 \pm 220\text{Bqkg}^{-1}$, $25 \pm 19\text{Bqkg}^{-1}$ και $21 \pm 16\text{Bqkg}^{-1}$, αντίστοιχα (Anagnostakis et al, 1996). Οι χρόνοι ημιζωής τους είναι $1.3 \cdot 10^9$ χρόνια για το ^{40}K , 1600 χρόνια για το ^{226}Ra και $1.4 \cdot 10^{10}$ χρόνια για το ^{232}Th .

Η έκθεση σε εξωτερική ακτινοβολία, με ακτινοβολία-γ, οφείλεται κατά κύριο λόγο στα θυγατρικά ισότοπα των ^{226}Ra και ^{232}Th , καθώς και στο ^{40}K , τα οποία περιέχονται στα οικοδομικά υλικά. Αντίθετα, η εσωτερική ακτινοβολία οφείλεται στο ραδόνιο (^{222}Rn) που βρίσκεται σε αέρια κατάσταση και εκρέει από τα οικοδομικά υλικά, περνώντας στον αέρα του εσωτερικού των κτηρίων, καθώς και στα περιορισμένου χρόνου ζωής προϊόντα διάσπασής του. Η δόση που οφείλεται σε εσωτερική ακτινοβολία προκαλείται μέσω της αναπνευστικής οδού και οφείλεται κατά κύριο λόγο στα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου, ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi και ^{214}Po (Mustonen, 1992) και λιγότερο στο ίδιο το ραδόνιο. Οι συγκεντρώσεις του ραδονίου επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, όπως ο ρυθμός εκροής του από τα οικοδομικά υλικά και ο ρυθμός εναλλαγής και ανανέωσης του αέρα στο εσωτερικό των κτηρίων. Μια τυπική αύξηση στη συγκέντρωση του ραδονίου εξαιτίας των οικοδομικών υλικών είναι της τάξης των λίγων δεκάδων έως λίγων εκατοντάδων Bqm^{-3} , ενώ σε πιο σπάνιες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει τα 1000Bqm^{-3} (European Commission, 1999). Τόσο η εξωτερική όσο και η εσωτερική ακτινοβολία συντελούν σε σημαντικό βαθμό στην έκθεση του πληθυσμού σε φυσική ραδιενέργεια, στους κλειστούς χώρους.

Τις τελευταίες δεκαετίες γίνονται σημαντικές προσπάθειες για τη μείωση της δόσης τόσο εξαιτίας της εσωτερικής, όσο και της εξωτερικής έκθεσης σε φυσική ραδιενέργεια. Η δόση που οφείλεται σε εσωτερική έκθεση είναι δυνατό να μειωθεί, εφαρμόζοντας συγκεκριμένες τεχνικές, ακόμα και μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής (Petrooulos et al, 2002). Αντίθετα, ο μόνος τρόπος μείωσης της δόσης που οφείλεται σε εξωτερική έκθεση είναι η επιλογή, εκ των προτέρων, κατάλληλων οικοδομικών υλικών, με χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή.



Σχήμα 2.1: Οι ραδιενεργές σειρές του ^{238}U και του ^{232}Th

Πολύ συχνά, κατά την Παρασκευή των οικοδομικών υλικών, υλικά φυσικής προέλευσης αναμιγνύονται με διάφορα παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών, για την επίτευξη συγκεκριμένων ιδιοτήτων των οικοδομικών υλικών ή απλά για οικονομία. Για παράδειγμα, η ιπτάμενη τέφρα (παραπροϊόν της καύσης γαιανθράκων στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) και η σιδηρούχος σκωρία (παραπροϊόν της παραγωγής χάλυβα) αναμιγνύονται με τσιμέντο προσδίδοντάς του αυξημένες μηχανικές αντοχές, μείωση διαπερατότητας κλπ. Η παραγωγή και πώληση αυτών των οικοδομικών υλικών μπορεί να επιφέρει πολλά κοινωνικά και οικονομικά οφέλη, αλλά, από την άλλη πλευρά, ενδεχομένως τα επίπεδα της ραδιενέργειάς τους να είναι αυξημένα. Η ιπτάμενη τέφρα, για παράδειγμα, περιέχει αυξημένες συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων της σειράς του ουρανίου και του θορίου, ενώ η βιομηχανική γύψος υψηλές συγκεντρώσεις ραδίου (Mustonen, 1992). Συνεπώς, είναι απαραίτητη η εκτίμηση των πιθανών ραδιολογικών κινδύνων που συνεπάγεται η χρήση αυτών των οικοδομικών υλικών σε μεγάλη κλίμακα. Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Ένωση θα μπορούσε να θεσπίσει αυστηρούς ελέγχους σε εκείνα τα βιομηχανικά παραπροϊόντα (τέφρες, σκωρίες κλπ) που εκπέμπουν ασυνήθιστα μεγάλα επίπεδα ραδιενέργειας, προτού αυτά περάσουν στην τσιμεντοβιομηχανία και γενικότερα στη βιομηχανία παραγωγής

οικοδομικών υλικών. Τα υλικά αυτά, που δεν θα πληρούν τις απαραίτητες προδιαγραφές όσον αφορά στη ραδιενέργειά τους, μπορούν να απορριφθούν με βάση τους κανόνες που θα επιβάλλει το κατάλληλο νομικό πλαίσιο.

Αξίζει να σημειωθεί πως στην πλειονότητα των περιπτώσεων γίνεται η παραδοχή της ραδιενεργού ισορροπίας μεταξύ των ραδιοϊσοτόπων – μελών των σειρών του ουρανίου και του θορίου, προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός της δόσης από εξωτερική έκθεση. Αυτή η παραδοχή ορισμένες φορές δεν ισχύει, ειδικά στις περιπτώσεις που στην παραγωγή των οικοδομικών υλικών χρησιμοποιούνται και βιομηχανικά παραπροϊόντα τα οποία δεν βρίσκονται σε ραδιενεργό ισορροπία με τα υπόλοιπα μέλη των φυσικών ραδιενεργών σειρών.

Στον Πίνακα 2.1 φαίνονται οι τυπικές καθώς και οι μέγιστες συγκεντρώσεις μερικών από τα πιο συνηθισμένα οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Commission, 1999). Παρατηρούμε ότι, εν γένει, το ^{40}K εμφανίζει μεγαλύτερη συγκέντρωση σε σχέση με τα ^{226}Ra και ^{232}Th , τόσο στα οικοδομικά υλικά χωρίς πρόσμικτα όσο και στα οικοδομικά υλικά με πρόσμικτα. Εξαιρεση αποτελεί το προμπετόν¹ στο οποίο το ^{226}Ra έχει πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση σε σχέση με το ^{40}K . Επιπλέον, όπως ήταν αναμενόμενο, η φωσφογύψος που είναι ένα τυπικό πρόσμικτο στη βιομηχανία οικοδομικών υλικών, όπως και η σκωρία υψικαμίνου καθώς και η ιπτάμενη τέφρα έχουν υψηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας (μία τάξη μεγέθους περίπου) σε σχέση με τα οικοδομικά υλικά χωρίς προσμίξεις.

Επίσης, όπου είναι απαραίτητο, στις μετρήσεις ραδιενέργειας μπορούν να συμπεριληφθούν και άλλα ραδιοϊσότοπα, πέραν των ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K , όπως το τεχνητό ραδιοϊσότοπο ^{137}Cs . Οι πυρήνες ^{137}Cs εναποτίθενται στο περιβάλλον μετά από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως πυρηνικές δοκιμές στην ατμόσφαιρα ή ατυχήματα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τα οικοδομικά υλικά, τα οποία παρασκευάζονται από φυσικές πρώτες ύλες, να περιέχουν και ίχνη, συνήθως αμελητέων ή και μη ανιχνεύσιμων, τεχνητών ραδιοϊσοτόπων. Σε κάθε περίπτωση, οι μετρήσεις ραδιενέργειας πρέπει να γίνονται στο τελικό προϊόν (European Commission, 1999).

¹ Aerated concrete

Συνήθη οικοδομικά υλικά	Τυπικές συγκεντρώσεις ($Bqkg^{-1}$)			Μέγιστες συγκεντρώσεις ($Bqkg^{-1}$)		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Τσιμέντο	40	30	400	240	190	1600
Προμπετόν	60	40	430	2600	190	1600
Τούβλα	50	50	670	200	200	2000
Τούβλα άμμου/ασβέστη	10	10	330	25	30	700
Φυσική πέτρα	60	60	640	500	310	4000
Φυσική γύψος	10	10	80	70	100	200
Φωσφογύψος	390	20	60	1100	160	300
Σκωρία υψικαμίνου	270	70	240	2100	340	1000
Ιπτάμενη τέφρα άνθρακα	180	100	650	1100	300	1500

Πίνακας 2.1: Ραδιενέργεια οικοδομικών υλικών σε κράτη μέλη της Ε.Ε. (European Commission, 1999)

2.1.2 Η τεχνική της γ-φασματοσκοπίας - Αυταπορρόφηση στα οικοδομικά υλικά

Με τη γ-φασματοσκοπία ανιχνεύεται και καταγράφεται η γ-ακτινοβολία που εκπέμπεται κατά τη ραδιενεργό διάσπαση ραδιοϊσοτόπων, ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων της, και κατά συνέπεια, προσδιορίζεται το είδος και η ενεργότητα των ραδιοϊσοτόπων. Πρόκειται για μία μη καταστροφική τεχνική που πλεονεκτεί στο ότι τα δείγματα που αναλύονται δεν απαιτούν κάποια εργαστηριακή προεπεξεργασία. Το γεγονός ότι το ενεργειακό φάσμα των ακτίνων-γ των φυσικών ραδιοϊσοτόπων είναι μεγάλο και σε ορισμένες περιπτώσεις η διάκριση μεταξύ των ραδιοϊσοτόπων αυτών είναι δύσκολη, απαιτεί τη χρήση μετρητικών συστημάτων που συνδυάζουν υψηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα, μεγάλη απόδοση στη μέτρηση και χαμηλούς ρυθμούς υποστρώματος. Συγκεκριμένα, η χρήση ανιχνευτών Γερμανίου επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό του ραδιολογικού περιεχομένου οποιουδήποτε δείγματος.

Οι συγκεντρώσεις του ^{226}Ra και του ^{232}Th προσδιορίζονται εμμέσως από τα προϊόντα διάσπασής τους, με την παραδοχή ότι επικρατεί ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα δείγματα σφραγίζονται ερμητικά σε πλαστικά δοχεία, ώστε

να παρεμποδιστεί η διαφυγή αερίων από αυτά. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται αφού περάσουν τουλάχιστον τρεις εβδομάδες μετά το σφράγισμα των δειγμάτων. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπουμε στο ^{226}Ra και το ^{232}Th να έρθουν σε ραδιενεργό ισορροπία με τα βραχύβια θυγατρικά τους, μέσω των οποίων προσδιορίζονται, υπό την προϋπόθεση ραδιενεργού ισορροπίας, οι συγκεντρώσεις των πατρικών πυρήνων.

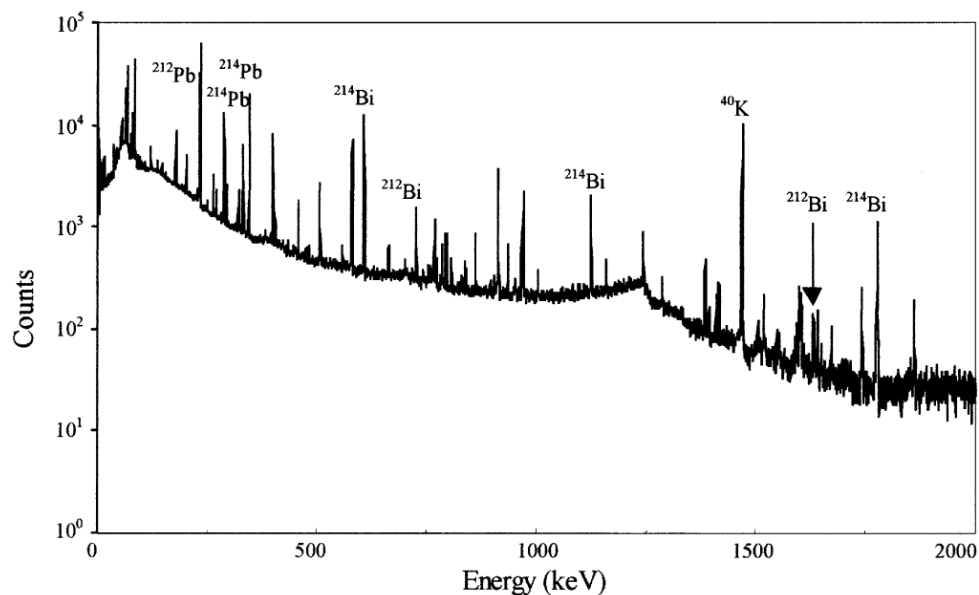
Η ενεργότητα του ^{226}Ra προκύπτει από το σταθμικό μέσο δύο φωτοκορυφών του ^{214}Pb (295.2 και 352.0keV) καθώς και τριών φωτοκορυφών του ^{214}Bi (609.3, 1120.3 και 1764.5keV). Όσον αφορά στο ^{232}Th , χρησιμοποιούνται δύο φωτοκορυφές του ^{228}Ac (338.4 και 911.1keV) καθώς και οι φωτοκορυφές του ^{212}Pb (238.6keV) και του ^{208}Tl (583.1keV). Τέλος, οι συγκεντρώσεις του ^{40}K εκτιμώνται από τη φωτοκορυφή του αντίστοιχου ραδιοϊσοτόπου στα 1460.8keV.

Οι (Petrooulos et al, 2002) προσδιόρισαν τις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{235}U , ^{232}Th καθώς και του ^{40}K για αρκετά δείγματα οικοδομικών υλικών, που χρησιμοποιούνται συχνά στον ελλαδικό χώρο, καθώς επίσης και για βιομηχανικά παραπροϊόντα που χρησιμοποιούνται ως πρόσμικτα στο τσιμέντο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται το ενεργειακό φάσμα, όπως αυτό μετρήθηκε με γ-φασματοσκοπία από τους (Bruzzi et al, 2000), για ένα δείγμα κεραμικού πλακιδίου. Παρατηρούμε ότι ένας ανιχνευτής με μεγάλη διακριτική ικανότητα επιτρέπει να διακριθούν ακόμα και φωτοκορυφές των σειρών του ουρανίου και του θορίου οι οποίες είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη. Επιπλέον, παρόλο που στο φάσμα απεικονίζεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός φωτοκορυφών, στην πράξη, οι φωτοκορυφές που λαμβάνονται κυρίως υπόψη στους δοσιμετρικούς υπολογισμούς είναι πολύ λίγες.

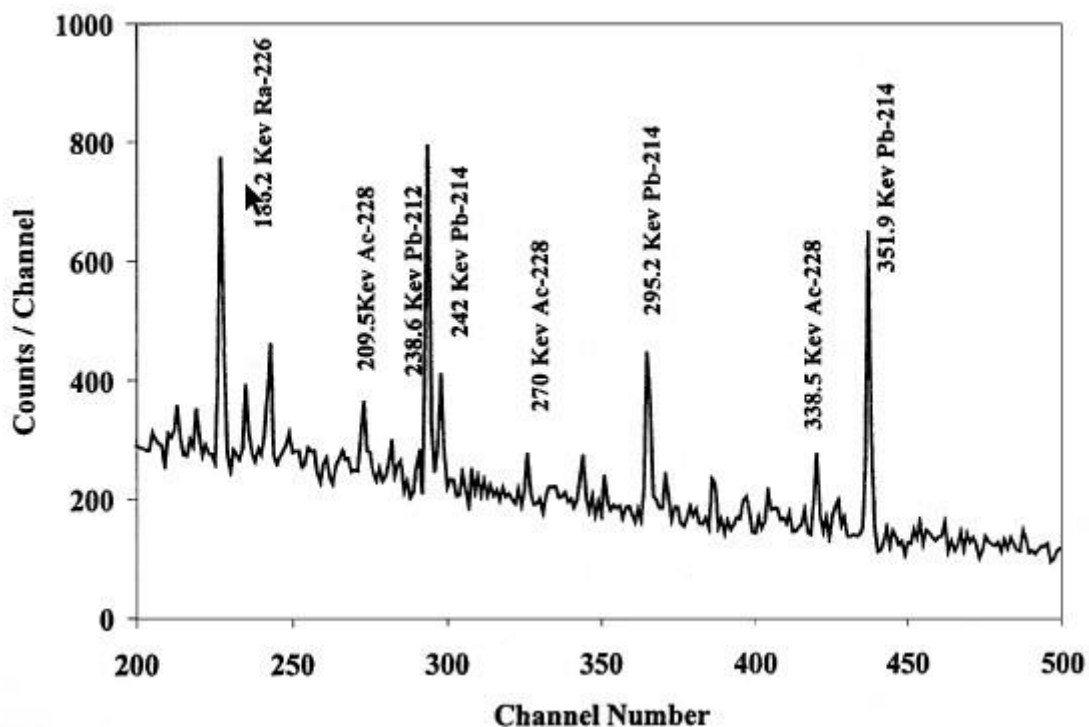
Οικοδομικά υλικά	Πλήθος δείγματος	Συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων ($Bqkg^{-1}$)				
		^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{232}Th	^{40}K
Μαύρο τσιμέντο	83	έως 173	29-147	έως 183	13-30	172-331
Λευκό τσιμέντο	10	-	14-26	-	7-13	5-67
Τούβλα	13	-	25-48	-	27-56	476-895
Άμμος θαλάσσης	6	-	7-13	-	8-16	145-302
Άμμος	13	-	1-5	-	έως 3	1-37
Μάρμαρο (σκόνη)	10	-	έως 1	-	έως 1	έως 25
Μωσαϊκό	7	-	1-4	-	1-3	έως 23
Γύψος	6	-	6-17	-	έως 10	5-40
Ελαφρόπετρα	5	έως 361	50-874	έως 1003	54-60	1048-1158
Άσβестος	2	-	9-32	-	έως 1	-
Περλίτης	1	-	46	-	56	1048
Πλακάκια	1	-	58	-	46	409
Ιπτάμενη τέφρα	~350	έως 1443	273-1377	έως 3986	41-65	143-661
Τέφρα	~60	έως 715	102-743	έως 290	20-49	111-480

Πίνακας 2.2: Φυσική ραδιενέργεια σε οικοδομικά υλικά στην Ελλάδα (Petrooulos et al, 2002)



Σχήμα 2.2: Ενεργειακό φάσμα δείγματος κεραμικού πλακιδίου (Bruzzi et al, 2000)

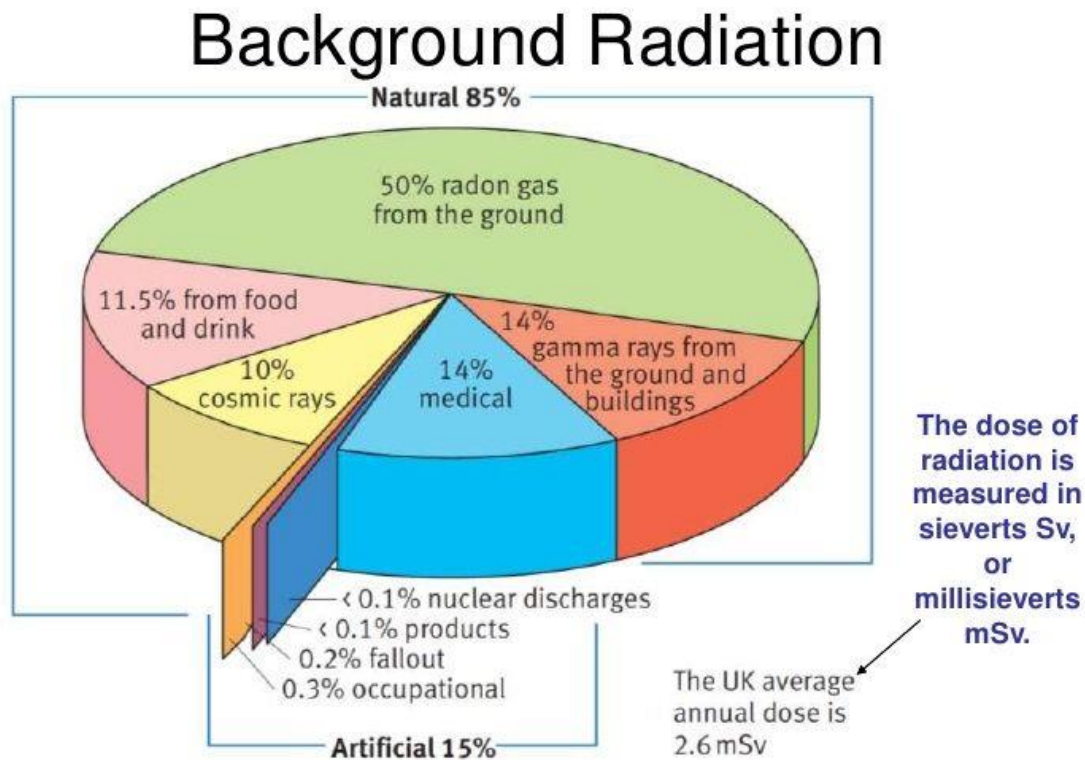
Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ένα μέρος του φάσματος για ένα δείγμα αιγυπτιακού μαρμάρου (El-Dine et al, 2001). Εμφανίζονται, κατά σειρά, οι φωτοκορυφές των ισοτόπων: ράδιο-226 (186.2keV), ακτίνιο-228 (209.5keV), μόλυβδος-212 (238.6keV), μόλυβδος-214 (242keV), ακτίνιο-228 (270keV), μόλυβδος-214 (295.2keV), ακτίνιο-228 (338.5keV), μόλυβδος-214 (351.9keV).



Σχήμα 2.3: Φάσμα δείγματος αιγυπτιακού μαρμάρου (El-Dine et al, 2001)

Η εφαρμογή τεχνικών γ-φασματοσκοπίας επηρεάζεται συχνά και σε σημαντικό βαθμό από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη, η οποία οδηγεί στην απορρόφηση των φωτονίων εντός του όγκου του δείγματος (αυταπορρόφηση), με αποτέλεσμα να καθίσταται δυσχερής η ανίχνευση των φωτονίων από τον ανιχνευτή. Η αυταπορρόφηση εξαρτάται από τη γεωμετρία του δείγματος, από το είδος και την πυκνότητα του υλικού, καθώς και από την ενέργεια των φωτονίων – εμφανίζεται κυρίως για φωτόνια χαμηλών ενεργειών. Για παράδειγμα, ισχυρή αυταπορρόφηση εντός του όγκου των δειγμάτων εμφανίζουν τα φωτόνια χαμηλής ενέργειας 63.29keV , 92.38keV και 92.80keV που εκπέμπονται από τον πυρήνα ^{234}Th (θεωρούμε ότι βρίσκεται σε ραδιενεργό ισορροπία με τον πατρικό πυρήνα ^{238}U) καθώς και τα φωτόνια 46.5keV που εκπέμπονται από τον πυρήνα ^{210}Pb .

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η εξωτερική έκθεση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4, παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο στη συνολική έκθεση (~14%) και για αυτό το λόγο δεν θα πρέπει να αγνοείται.



Σχήμα 2.4: Συνεισφορά επιμέρους πηγών ακτινοβολίας στη δόση

2.2 Εκτίμηση της δόσης στο εσωτερικό της κατοικίας με χρήση μοντέλων

Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα και έχουν δημοσιευθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για την εκτίμηση της έκθεσης του πληθυσμού στην γ-ακτινοβολία, εξαιτίας της ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών. Τα περισσότερα από αυτά κάνουν εκτεταμένες απλουστεύσεις και παραδοχές προκειμένου να φέρουν αποτελέσματα. Για παράδειγμα, ορισμένα από αυτά αναπαριστούν το δωμάτιο σαν ένα τσιμεντένιο κέλυφος με σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου, χωρίς ανοίγματα για πόρτες ή παράθυρα. Μία άλλη παραδοχή που γίνεται πολύ συχνά είναι η χρήση του ίδιου υλικού σε όλες τις επιφάνειες

του δωματίου. Αυτές οι παραδοχές μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές παρεκκλίσεις από την πραγματική τιμή της αποτιθέμενης δόσης, καθώς το είδος και το πάχος των υλικών που χρησιμοποιούνται επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό αρκετές παραμέτρους, όπως η απορρόφηση της ακτινοβολίας από την ύλη, το είδος της δευτερογενούς ακτινοβολίας που εκπέμπεται κ.ά. Τέλος, μία παραδοχή που πάντα γίνεται χωρίς να αναφέρεται είναι η ύπαρξη ραδιενεργού ισορροπίας μεταξύ των ισοτόπων των φυσικών ραδιενεργών σειρών του ^{238}U και ^{232}Th .

Με τη βοήθεια αυτών των μοντέλων γίνεται ο υπολογισμός του ρυθμού έκθεσης στον αέρα, με δεδομένες τις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων ^{238}U , ^{232}Th και ^{40}K στα οικοδομικά υλικά. Είναι γεγονός πως διαφορετικά μοντέλα, που βασίζονται στην ίδια γεωμετρία του χώρου (γεωμετρία ενός τυπικού δωματίου), παρουσιάζουν παραπλήσια αποτελέσματα, με μέγιστη διαφοροποίηση της τάξης του 30%, ακόμα και αν χρησιμοποιούνται διαφορετικοί παράγοντες επαύξεσης (build-up factors) (Mustonen, 1992).

Ο Πίνακας 2.3 συνοψίζει τα αποτελέσματα που έχουν δώσει ορισμένα μοντέλα και τα οποία είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία. Παρατηρούμε ότι παρόλο που τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι εν γένει διαφορετικά μεταξύ τους, δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα, με μέγιστη παρέκκλιση της τάξης του 30%, όταν εφαρμόζονται σε ίδιες ή σε παρόμοιες γεωμετρίες. Επιπλέον, παραμένουν ίδια ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί παράγοντες επαύξεσης (build-up factors) ή αν επιλεγούν διαφορετικές φωτοκορυφές ενέργειας των σειρών του ουρανίου και του θορίου (Mustonen, 1992). Σε όλα αυτά τα μοντέλα, βέβαια, γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ των ισοτόπων των φυσικών ραδιενεργών σειρών του ^{238}U και ^{232}Th . Αυτή η παραδοχή αποκλίνει εν γένει από την πραγματικότητα, αφού το ραδόνιο και το θορόνιο, ως αέρια, διαφεύγουν από τους τοίχους εμποδίζοντας την επίτευξη ραδιενεργού ισορροπίας ανάμεσα στα ασταθή ισότοπα. Συγκεκριμένα, ο Straden (Straden, 1979) υπολόγισε πως μία έντονη εκροή ραδονίου από τα οικοδομικά υλικά μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση του αποτελέσματος από τα μοντέλα της τάξης του 20%.

Ρυθμός δόσης ($\frac{nGy\cdot h^{-1}}{Bq\cdot kg^{-1}}$)			Γεωμετρία ($m \times m \times m$)	Πυκνότητα (kgm^{-3})	Πάχος υλικού (m)	Αναφορές
^{238}U	^{232}Th	^{40}K				
0.908	1.06	0.0767	$4 \times 5 \times 2.8$	2320	0.20	Markkanen, 1995
1.21	1.29	0.10	$4 \times 5 \times 2.8$	2350	0.20	Mirza et al, 1991
0.922	1.10	0.0806	$4 \times 5 \times 2.8$	2320	0.20	Mustonen, 1984
0.918	1.10	0.0775	$4 \times 5 \times 2.8$	-	0.20	Stranden, 1979
0.918	1.02	0.0777	$4 \times 5 \times 2.8$	2500	0.20	Koblinger, 1978

Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα από μοντέλα δωματίων στη βιβλιογραφία

2.2.1 Η εξάρτηση της δόσης από τη θέση στο χώρο

Το 2001 δημοσιεύτηκε μία μελέτη (Risica et al, 2001) στην οποία παρουσιάζεται ένα μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του ρυθμού δόσης στο εσωτερικό ενός δωματίου. Αυτό το μοντέλο υπολογίζει τον απορροφώμενο ρυθμό δόσης στον αέρα εξαιτίας της ακτινοβολίας-γ, που εκπέμπεται από τα οικοδομικά υλικά. Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στο μοντέλο Markkanen (διαστάσεις δωματίου $4m \times 5m \times 2.8m$, πάχος τοίχων, οροφής και δαπέδου $0.20m$, πυκνότητα $2320kgm^{-3}$) με κάποιες διαφοροποιήσεις, ώστε να προσεγγίζει με περισσότερο ρεαλισμό την πραγματικότητα. Αυτές οι διαφοροποιήσεις από το αρχικό μοντέλο εντοπίζονται στα πάχη και τις πυκνότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για τοίχους, δάπεδο και οροφή, καθώς και στην ύπαρξη ανοιγμάτων (πόρτες και παράθυρα). Επιπλέον, στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε λήφθηκαν υπόψη οι ενέργειες των φωτονίων που εκπέμπονται από τους ασταθείς πυρήνες ^{226}Ra και ^{232}Th , καθώς και παράγοντες επαύξησης (build-up factors), ώστε να προσμετρηθεί και η δευτερογενής ακτινοβολία λόγω σκέδασης.

Γενικά, ο όρος “απορροφώμενη δόση” αναφέρεται στην απόθεση ενέργειας στους ιστούς από δέσμη ιονίζουσας ακτινοβολίας. Μονάδα μέτρησης της απορροφώμενης δόσης, στο S.I., είναι το $1Gy$. Ισχύει ότι $1Gy = \frac{1J}{1kg}$. Η επίδραση της ακτινοβολίας, όμως, στα διάφορα όργανα του σώματος διαφέρει ανάλογα με το είδος των σωματίων της δέσμης. Τα σωματία-β, για παράδειγμα, έχουν παραπλήσια επίδραση με τα σωματία-γ. Αντίθετα, τα σωματία-α είναι αρκετά πιο επικίνδυνα. Για το λόγο αυτό εισάγεται ο όρος της ισοδύναμης δόσης – μονάδα μέτρησης το $1Sv$ – ώστε να λαμβάνονται υπόψη και οι διαφορετικές βιολογικές συνέπειες από την έκθεση σε διαφορετικά είδη ακτινοβολίας. Το $1Gy$ που οφείλεται σε σωματία-α, λόγω χάρη, είναι πολύ πιο επικίνδυνο από το $1Gy$ που οφείλεται σε σωματία-γ. Έτσι, εάν το $1Gy$ εξαιτίας σωματίων-γ αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη τιμή (σε Sv) ισοδύναμης δόσης, το $1Gy$ εξαιτίας σωματίων-α αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη τιμή (σε Sv) ισοδύναμης δόσης. Επιπλέον, επειδή οι διάφοροι ιστοί του ανθρώπινου σώματος είναι σε διαφορετικό βαθμό ευαίσθητοι στις ιονίζουσες ακτινοβολίες, εισάγεται και η έννοια της ενεργού δόσης, που εκφράζει τις βιολογικές συνέπειες από έκθεση σε ακτινοβολία για κάθε ιστό ή όργανο του σώματος. Η ενεργός δόση έχει και αυτή μονάδα μέτρησης το $1Sv$ και ορίζεται ως το γινόμενο της ισοδύναμης δόσης επί ένα συντελεστή επικινδυνότητας που χαρακτηρίζει έναν δεδομένο ιστό.

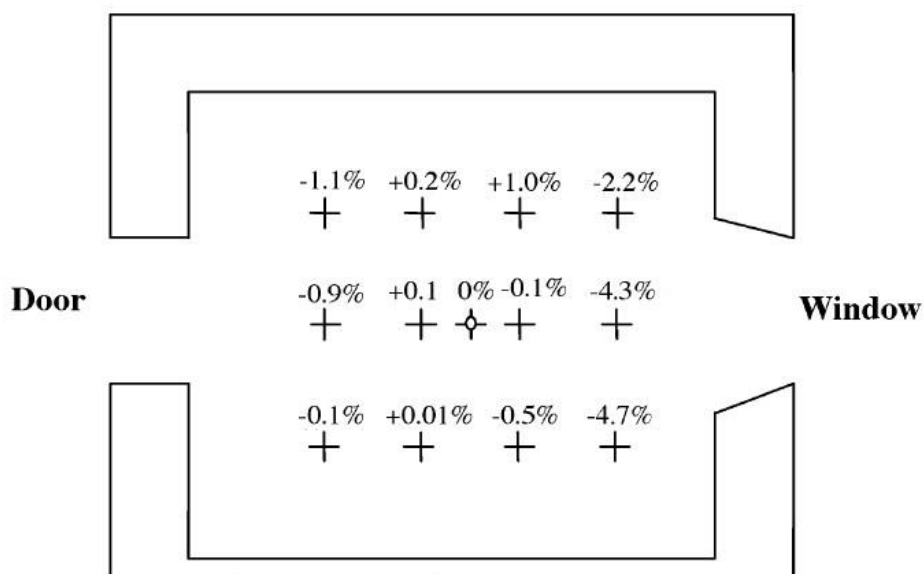
Η χωρική κατανομή της απορροφώμενης δόσης στον αέρα του δωματίου υπολογίστηκε με τη χρήση του παραπάνω μοντέλου, με σκοπό να εντοπιστεί το πώς και σε τι βαθμό επηρεάζει τις πειραματικές μετρήσεις.

Ο Mustonen (Mustonen, 1992) προκειμένου να μελετήσει και εκείνος τη χωρική κατανομή της δόσης στον αέρα ενός δωματίου χρησιμοποίησε ένα πολύ διαφορετικό μοντέλο από αυτό του Markkanen, με διαστάσεις $12 \times 6 \times 2.5m^3$, δύο τοίχους πάχους $0.13m$, δύο τοίχους πάχους $0.18m$ και δύο παράθυρα, ένα σε κάθε έναν από τους μικρότερους τοίχους. Συμπέρανε πως, καθώς μετακινούμαστε από το κέντρο του δωματίου προς τους μακρύτερους τοίχους, η δόση αυξάνεται έως και 3% (σε απόσταση έως $1m$ από αυτούς), ενώ η δόση μειώνεται έως και 13% όταν πλησιάζουμε κάθε ένα από τα δύο παράθυρα.

Από την άλλη πλευρά, οι Risica et al (Risica et al, 2001), χρησιμοποιώντας το τροποποιημένο μοντέλο Markkanen που περιγράψαμε παραπάνω, εκτίμησαν τη χωρική κατανομή της δόσης στον αέρα του δωματίου σε ύψος $1m$ από το έδαφος. Διαπίστωσαν πως, καθώς κινούμαστε από το κέντρο του δωματίου προς κάθε έναν από τους μακρύτερους τοίχους, η δόση στον αέρα αυξάνεται. Ωστόσο, για απόσταση έως $1m$ από τους τοίχους, η αύξηση αυτή δεν ξεπερνά το 10%.

Παράλληλα με το μοντέλο, οι Risica et al (Risica et al, 2001) πραγματοποίησαν και πειραματικές μετρήσεις σε ένα δωμάτιο διαστάσεων $5.4 \times 4.8 \times 3m^3$, με τρεις τοίχους πάχους $0.8m$ και έναν τοίχο πάχους $0.2m$. Σε αυτό το δωμάτιο μέτρησαν την αποτιθέμενη δόση στον αέρα σε ύψος $1m$ από το δάπεδο, σε δώδεκα διαφορετικά σημεία. Η ποσοστιαία διακύμανση του ρυθμού δόσης φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Είναι προφανές πως σε αποστάσεις έως και $1m$ από τους τοίχους οι διακυμάνσεις είναι μικρότερες του 3%, με εξαίρεση δύο σημεία κοντά στο παράθυρο και το λεπτό τοίχο στα οποία η μεταβολή (μείωση) είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Αυτό, σύμφωνα με τους Risica et al, μπορεί να εξηγηθεί με βάση το γεγονός ότι κοντά σε αυτά τα σημεία του χώρου ήταν εγκατεστημένο ένα μεταλλικό δοχείο που λειτουργεί ως απορροφητής της ακτινοβολίας.

Συμπερασματικά, οι Risica et al καταλήγουν στο ότι ο ρυθμός δόσης στον αέρα του δωματίου αυξάνεται καθώς προσεγγίζουμε κάθε έναν από τους παχύτερους τοίχους, ενώ, εν γένει μειώνεται καθώς προσεγγίζουμε παράθυρο ή πόρτα. Πάντως, η διακύμανση φαίνεται να περιορίζεται στο 10%, για αποστάσεις έως και $1m$ από τους τοίχους.

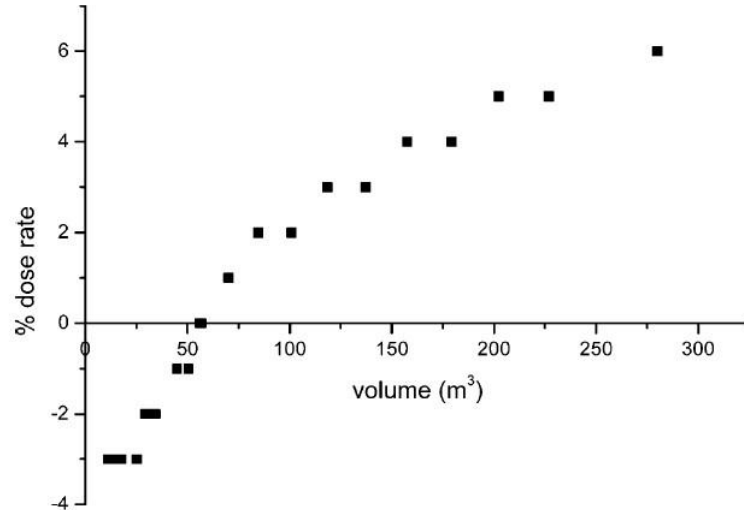


Σχήμα 2.5: Η ποσοστιαία διακύμανση του ρυθμού δόσης (Risica et al, 2001)

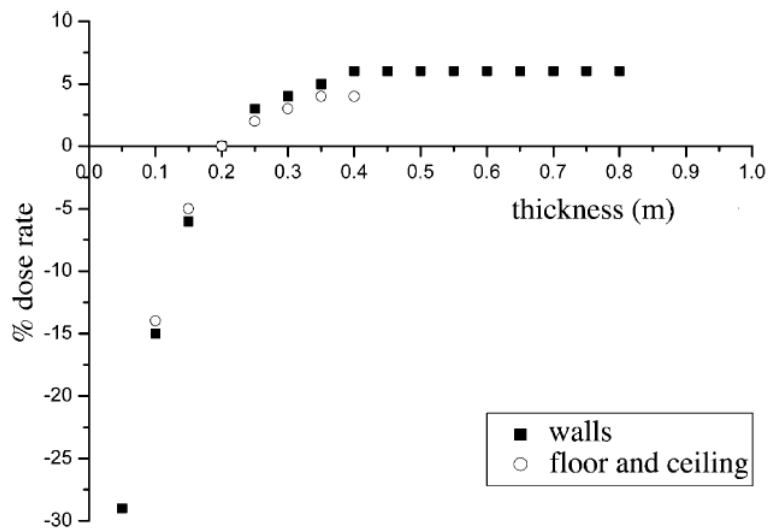
2.2.2 Η εξάρτηση της δόσης από τις διαστάσεις του δωματίου και την πυκνότητα των υλικών

Ξεκινώντας από τις παραδοχές που έκανε ο Markkanen και θεωρώντας πως οι τοίχοι – πηγές εκπέμπουν ομοιόμορφα, υπολογίστηκε ο ρυθμός αποτιθέμενης δόσης στον αέρα του δωματίου ως συνάρτηση του όγκου του δωματίου, γνωρίζοντας τις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων που περιέχονται στα οικοδομικά υλικά. Αυτό έγινε διατηρώντας σταθερό το ύψος, στα $2.8m$, και μεταβάλλοντας το μήκος και το πλάτος του δωματίου, δίνοντας τιμές από 2 έως και $10m$. Στο Σχήμα 2.6 βλέπουμε το πώς μεταβάλλεται η διακύμανση του ρυθμού δόσης στον αέρα σε σχέση τον όγκο των ορθογώνιων παραλληλεπίπεδων που σχηματίζονται, καθώς το μήκος και το πλάτος αλλάζουν. Η μέγιστη διακύμανση του ρυθμού δόσης για τη δεδομένη γεωμετρία με τοίχους, οροφή και δάπεδο πάχους $0.2m$ και πυκνότητας $2320kgm^{-3}$, εκτιμάται στο 6%.

Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται το πώς εξαρτάται η διακύμανση του ρυθμού δόσης στον αέρα από τα πάχη των τοίχων, του ταβανιού και του δαπέδου. Η αύξηση του πάχους από $0.05m$ έως και $0.40m$ αυξάνει σημαντικά το ρυθμό δόσης. Ωστόσο, για πάχος μεγαλύτερο των $0.40m$ ο ρυθμός δόσης δεν αυξάνεται περαιτέρω. Αυτό συμβαίνει επειδή το φαινόμενο της αυταπορρόφησης γίνεται όλο και πιο έντονο καθώς το πάχος του υλικού αυξάνει.



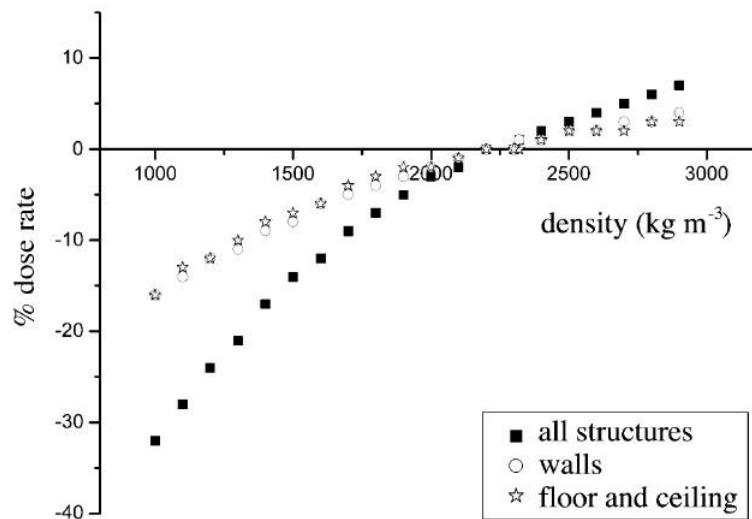
Σχήμα 2.6: Η διακύμανση του ρυθμού δόσης στον αέρα ως συνάρτηση του όγκου του δωματίου (Risica et al, 2001)



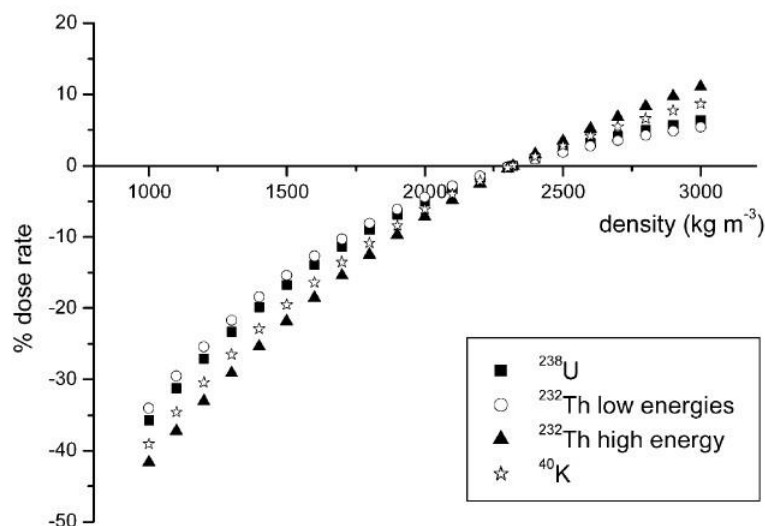
Σχήμα 2.7: Η διακύμανση του ρυθμού δόσης στον αέρα ως συνάρτηση του πάχους των τοίχων, ταβανιού και πατώματος (Risica et al, 2001)

Αρκετά σημαντικό ρόλο στο ρυθμό δόσης παίζει και η πυκνότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται. Η επίδραση της μεταβολής της πυκνότητας των τοίχων, του ταβανιού και του πατώματος (όλων μαζί, αλλά και καθενός ξεχωριστά) στο ρυθμό δόσης φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Σε αυτό το σημείο γίνεται η παραδοχή ότι η μεταβολή της πυκνότητας δεν συνεπάγεται και μεταβολή στη χημική σύσταση των υλικών. Η εξάρτηση του ρυθμού δόσης από την πυκνότητα μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητή εξετάζοντας το Σχήμα 2.9, όπου η επίδραση της αλλαγής της πυκνότητας όλων των οικοδομικών στοιχείων μαζί σχεδιάζεται

ξεχωριστά για κάθε ενέργεια της ακτινοβολίας- γ , η οποία απορρέει από τη ξεχωριστή συνεισφορά στη δόση των ραδιοϊσοτόπων που περιέχονται στα οικοδομικά στοιχεία. Το ισότοπο ^{40}K εκπέμπει ραδιενέργεια γ στα 1461keV , η σειρά του ^{238}U θεωρείται ότι εκπέμπει στα 810keV (σταθμικός μέσος), η σειρά του ^{232}Th θεωρείται ότι εκπέμπει σε χαμηλές ενέργειες στα 587keV (σταθμικός μέσος), ενώ σε υψηλές στα 2615keV (για το ^{209}Tl).



Σχήμα 2.8: Η διακύμανση του ρυθμού δόσης στον αέρα ως συνάρτηση της πυκνότητας των οικοδομικών στοιχείων του δωματίου (Risica et al, 2001)



Σχήμα 2.9: Η ξεχωριστή συνεισφορά καθενός από τα ραδιοϊσότοπα στη δόση, συναρτήσει της πυκνότητας των οικοδομικών στοιχείων (Risica et al, 2001)

2.2.3 Η επίδραση της γεωμετρίας του μοντέλου στη δόση

Η ύπαρξη ανοιγμάτων στους τοίχους (παράθυρα, πόρτες) επηρεάζει σημαντικά την αποτιθέμενη δόση. Η επίδραση αυτή στη δόση εξετάστηκε στην Ενότητα 2.2.1, όπου οι Risica et al εφάρμοσαν το μοντέλο Markkanen σε ένα δωμάτιο διαστάσεων $5.4 \times 4.8 \times 3m^3$, με τρεις τοίχους πάχους $0.8m$ και έναν τοίχο πάχους $0.2m$. Η συγκέντρωση του ^{226}Ra θεωρήθηκε ότι είναι $200Bqkg^{-1}$, ενώ για το ^{232}Th και το ^{40}K στα $400Bqkg^{-1}$ και στα $1000Bqkg^{-1}$, αντίστοιχα. Ο ρυθμός της αποτιθέμενης δόσης στον αέρα υπολογίστηκε στα $0.38\mu Gyh^{-1}$, με τη χρήση του μοντέλου, χωρίς παράθυρα ή πόρτες. Το ίδιο μοντέλο, με την εισαγωγή μιας πόρτας διαστάσεων $1.5 \times 2m^2$, έδωσε ρυθμό δόσης στα $0.35\mu Gyh^{-1}$. Είναι προφανές ότι η επίδραση μίας και μόνο πόρτας στο ρυθμό της αποτιθέμενης δόσης στον αέρα του δωματίου είναι αρκετά χαμηλή (~6%) αν συγκριθεί με την επίδραση άλλων παραγόντων, όπως η πυκνότητα και το πάχος των οικοδομικών υλικών, αλλά δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Αξίζει να σημειωθεί πως στη βιβλιογραφία δεν αναφέρονται μοντέλα με γεωμετρίες συγκροτημάτων δωματίων, τα οποία θα αντιπροσώπευαν σε καλύτερο βαθμό μια τυπική κατάσταση αστικής δόμησης. Η ύπαρξη επιπλέον δωματίων, γειτονικών με το προς μελέτη δωμάτιο, αναμένεται να επηρεάζει τη δόση που αποτίθεται σε αυτό, με την προϋπόθεση ότι οι τοίχοι της κατασκευής είναι λεπτότεροι από $0.40m$, όπως συμβαίνει συνήθως στην πράξη. Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει μερική απορρόφηση των φωτονίων από το υλικό των τοίχων, χωρίς να αποκόπτεται πλήρως η ακτινοβολία από τα γειτονικά δωμάτια. Αυτό συμβαίνει επειδή, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, τα δομικά στοιχεία λειτουργούν ως πλήρης ασπίδα, απορροφώντας το σύνολο των φωτονίων που εκπέμπονται από τα γειτονικά δωμάτια, μόνο όταν το πάχος τους είναι μεγαλύτερο ή ίσο των $0.40m$.

2.3 Κριτήρια Δόσης – Δείκτες

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει σημαντικά βήματα για την εκτίμηση και τον καθορισμό των επιπέδων της εκπεμπόμενης από τα οικοδομικά υλικά ραδιενέργειας. Το 1996 η ευρωπαϊκή οδηγία European Basic Safety Directive (BSS) έθεσε μεταξύ των άλλων και περιορισμούς όσον αφορά στη φυσική ραδιενέργεια στους χώρους εργασίας.

Διαπιστώθηκε ότι τα οικοδομικά υλικά αυξάνουν σε σημαντικό βαθμό την έκθεση του πληθυσμού σε ιονίζουσες ακτινοβολίες και προτάθηκαν κάποια όρια ασφαλείας για την προστασία της υγείας τόσο των εργαζομένων όσο και του κοινού. Ωστόσο, την αποκλειστική ευθύνη για τα επίπεδα ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών που παράγονται στην επικράτεια κάθε κράτους μέλους της Ευρωπαϊκής Ένωσης την έχει το εκάστοτε κράτος μέλος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, στην πράξη, να εφαρμόζονται διαφορετικά κριτήρια στον τρόπο παραγωγής των οικοδομικών υλικών, ανάλογα με το πόσο εύκολα το κάθε κράτος μέλος προσαρμόζεται στους περιορισμούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

2.3.1 Η τεχνική έκθεση Radiation Protection 112 και ο δείκτης I

Μία σημαντική προσπάθεια για την ελαχιστοποίηση αυτού του προβλήματος έγινε το 1999 με την τεχνική έκθεση *Radiation Protection 112* της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Σε αυτήν την τεχνική έκθεση προτάθηκε η επιβολή περιορισμών στα επίπεδα της εκπεμπόμενης ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών με σκοπό την περιστολή της έκθεσης του πληθυσμού σε αυξημένες δόσεις ραδιενέργειας. Οι δόσεις που δέχεται ο πληθυσμός θα πρέπει να υπακούουν στην αρχή ALARA (As Low As Reasonably Achievable – τόσο χαμηλά όσο είναι λογικά εφικτό), μία αρχή βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για την ακτινοπροστασία από ιονίζουσες ακτινοβολίες.

Είναι γεγονός πως τα οικοδομικά υλικά εμφανίζουν διαφορετικές συγκεντρώσεις στα ραδιοϊσότοπά τους, ανάλογα με την προέλευσή τους. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική σύσταση των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται σε κάθε κράτος για την παραγωγή των υλικών αυτών. Το επιθυμητό χαρακτηριστικό που πρέπει να έχουν οι περιορισμοί που επιβάλλονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση είναι να είναι ενιαίοι σε όλα τα κράτη μέλη, ώστε να ευνοείται η ελεύθερη διακίνηση και μεταφορά των οικοδομικών υλικών μέσα στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Αυτό οδηγεί στην αύξηση του εμπορίου μεταξύ των κρατών μελών και επιφέρει σημαντικά οικονομικά και κοινωνικά οφέλη τόσο σε τοπικό όσο και σε διεθνές επίπεδο.

Οι περιορισμοί που προτείνει η τεχνική έκθεση *Radiation Protection 112* αφορούν στη μέγιστη δόση στην οποία επιτρέπεται να εκτεθεί ο πληθυσμός της Ευρωπαϊκής Ένωσης και προτείνεται να βασιστούν στο ακόλουθο κριτήριο (European Commission, 1999): Η μέγιστη ενεργός δόση, που οφείλεται σε ιονίζουσες ακτινοβολίες, ορίζεται στο $1mSv\text{y}^{-1}$ και μπορεί να κυμανθεί μεταξύ $0.3 - 1mSv\text{y}^{-1}$. Όταν η ενεργός δόση περιορίζεται στο

$1mSvy^{-1}$, η συγκέντρωση του ^{226}Ra πρέπει να περιορίζεται και αυτή, πρακτικά, σε τέτοιο βαθμό που το παραγόμενο ραδόνιο να μην ξεπερνά το όριο των $200Bq m^{-3}$ που θέτει η ευρωπαϊκή οδηγία, οπότε περιορίζεται και η εσωτερική έκθεση σε ραδιενέργεια. Το χαμηλότερο και αυστηρότερο όριο των $0.3mSvy^{-1}$ μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε περιπτώσεις που δεν θα προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στη διακίνηση των οικοδομικών υλικών μεταξύ των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Υψηλότερες μέγιστες δόσεις μπορούν να γίνουν αποδεκτές μόνο σε ειδικές περιπτώσεις όπου τα οικοδομικά υλικά χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε τοπικό επίπεδο στα κράτη μέλη. Εναλλακτικά, θα προτεινόταν η οριστική διακοπή της χρήσης αυτών των οικοδομικών υλικών, κάτι που όμως απορρίφθηκε, αφού λήφθηκε υπόψη το οικονομικό και κοινωνικό κόστος που θα είχε ως συνέπεια. Αυτό δείχνει ότι η κοινωνία είναι δύσκολο να σταματήσει να χρησιμοποιεί οικοδομικά υλικά (πχ γρανίτες) που χρησιμοποιούνται για χρόνια ή και αιώνες στην κατασκευή και τη διακόσμηση των κατοικιών.

Επιπλέον, σημειώνεται ότι τα οικοδομικά υλικά που συνεισφέρουν στην ενεργό δόση σε επίπεδα χαμηλότερα των $0.3mSvy^{-1}$ εξαιρούνται από κάθε περιορισμό.

Επισημαίνεται ότι το παραπάνω κριτήριο αφορά στην επιπλέον δόση που λαμβάνει ο πληθυσμός, πέραν της δόσης υποβάθρου που εκτιμάται στα $50nGyh^{-1}$. Επιπλέον, επειδή στη δόση συνεισφέρουν περισσότερα του ενός ραδιοϊσότοπα, είναι χρήσιμο να ελέγχεται το εάν το κριτήριο δόσης ικανοποιείται ή όχι μέσω ενός δείκτη που θα λαμβάνει υπόψη τη συνεισφορά περισσότερων του ενός ραδιοϊσοτόπων.

Στην τεχνική έκθεση *Radiation Protection 112* προτείνεται η εισαγωγή ενός δείκτη (I_{112}) ο οποίος χρησιμοποιείται για να εξακριβωθεί αν το κριτήριο δόσης ικανοποιείται. Αυτός ο δείκτης (Activity Concentration Index, ACI) λαμβάνει υπόψη τη συνεισφορά τριών ραδιοϊσοτόπων στη δόση και δίνεται από τη σχέση:

$$I_{112} = \frac{C_{Ra}}{300Bqkg^{-1}} + \frac{C_{Th}}{200Bqkg^{-1}} + \frac{C_K}{3000Bqkg^{-1}} \quad (2.1)$$

όπου C_{Ra} , C_{Th} , C_K οι συγκεντρώσεις των ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K , αντίστοιχα, σε $Bqkg^{-1}$, στα οικοδομικά υλικά. Το ^{226}Ra χρησιμοποιείται ως ισότοπο αναφοράς για τον πατρικό πυρήνα ^{238}U .

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό του δείκτη I_{112} είναι το μοντέλο *Markkanen Room Model* (Markkanen, 1995). Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως ένα εργαλείο ελέγχου (screening tool) των οικοδομικών υλικών για την κατηγοριοποίησή τους ως προς τα επίπεδα της ραδιενέργειας που εκπέμπουν και δεν

πρέπει να υπερβαίνει τις τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 2.4, οι οποίες καθορίζονται από το κριτήριο δόσης.

Κριτήριο Δόσης	$0.3mSv\ y^{-1}$	$1mSv\ y^{-1}$
Οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες, π.χ. τσιμέντο	$I_{112} \leq 0.5$	$I_{112} \leq 1$
Υλικά που χρησιμοποιούνται στις επιφάνειες, π.χ. πλακάκια	$I_{112} \leq 2$	$I_{112} \leq 6$

Πίνακας 2.4: Αποδεκτές τιμές του δείκτη I_{112} , ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο δόσης

Οι παρονομαστές των κλασμάτων της σχέσης (2.1) υπολογίζονται ως εξής: το κριτήριο δόσης του $1mSv\ y^{-1}$ εξισώνεται με το γινόμενο του ρυθμού απορροφώμενης δόσης επί το χρόνο έκθεσης ανά έτος. Επομένως, μπορούμε να γράψουμε:

$$\text{Κριτήριο Δόσης} = \text{Ρυθμός Απορροφώμενης Δόσης} \times \text{Χρόνος Έκθεσης}$$

Επιπλέον, στο γινόμενο εισάγεται και ο συντελεστής μετατροπής των Gy σε Sv ($0.7SvGy^{-1}$), ενώ από το ρυθμό δόσης αφαιρείται το υπόβαθρο των $50nGyh^{-1}$. Ο ετήσιος χρόνος έκθεσης εκτιμάται στις $7 \cdot 10^3$ ώρες.

Συγκεκριμένα, για το ^{226}Ra :

$$1mSv\ y^{-1} = \left(0.92 \frac{nGy\ h^{-1}}{Bq\ kg^{-1}} \times C_{Ra} - 50nGyh^{-1} \right) \times 0.7SvGy^{-1} \times 7 \cdot 10^3\ hy^{-1} \quad (2.2)$$

όπου $0.92 \frac{nGy\ h^{-1}}{Bq\ kg^{-1}}$ ο συντελεστής που εκφράζει ρυθμό δόσης και δίνεται από τον Πίνακα 2.5.

Αντικαθιστώντας τα προθέματα και κάνοντας πράξεις, προκύπτει:

$$10^{-3}Sv\ y^{-1} = (0.92 \times C_{Ra} - 50) \times 10^{-9}Gyh^{-1} \times 0.7SvGy^{-1} \times 7 \cdot 10^3\ hy^{-1} \quad (2.3)$$

επιλύοντας ως προς C_{Ra} , προκύπτει:

$$C_{Ra} = 276Bqkg^{-1} \cong 300Bqkg^{-1} \quad (2.4)$$

όπου το αποτέλεσμα στρογγυλοποιήθηκε στις εκατοντάδες.

Με αντίστοιχο συλλογισμό, για το ^{232}Th ισχύει:

$$10^{-3}Sv\ y^{-1} = (1.1 \times C_{Th} - 50) \times 10^{-9}Gyh^{-1} \times 0.7SvGy^{-1} \times 7 \cdot 10^3\ hy^{-1} \quad (2.5)$$

όπου $1.1 \frac{nGy h^{-1}}{Bq kg^{-1}}$ ο συντελεστής που εκφράζει ρυθμό δόσης και δίνεται από τον Πίνακα 2.5.

Επιλύοντας ως προς C_{Th} , προκύπτει:

$$C_{Th} = 231Bqkg^{-1} \cong 200Bqkg^{-1} \quad (2.6)$$

όπου το αποτέλεσμα στρογγυλοποιήθηκε στις εκατοντάδες.

Παρόμοια, για το ^{40}K :

$$10^{-3}Svy^{-1} = (0.08 \times C_K - 50) \times 10^{-9}Gyh^{-1} \times 0.7SvGy^{-1} \times 7 \cdot 10^3hy^{-1} \quad (2.7)$$

όπου $0.08 \frac{nGy h^{-1}}{Bq kg^{-1}}$ ο συντελεστής που εκφράζει ρυθμό δόσης και δίνεται από τον Πίνακα 2.5.

Επιλύοντας ως προς C_K , προκύπτει:

$$C_K = 3176Bqkg^{-1} \cong 3000Bqkg^{-1} \quad (2.8)$$

όπου το αποτέλεσμα στρογγυλοποιήθηκε στις χιλιάδες.

Δομικά στοιχεία που εκπέμπουν ακτινοβολία	Ρυθμός Δόσης $\left(\frac{nGy h^{-1}}{Bq kg^{-1}}\right)$		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Δάπεδο, ταβάνι και τοίχοι	0.92	1.1	0.08
Υλικά επικάλυψης (πλακάκια, πέτρες κλπ - πάχους 3cm και πυκνότητας $2600kgm^{-3}$)	0.12	0.14	0.0096

Πίνακας 2.5: Συντελεστές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της δόσης.

Υπολογίζονται με υπολογιστικό πρόγραμμα.

Ακολουθώντας παρόμοιο συλλογισμό προκύπτουν οι αντίστοιχοι συντελεστές για το αυστηρότερο κριτήριο δόσης των $0.3mSvy^{-1}$. Ενδεικτικά, για το ^{226}Ra ισχύει:

$$0.3mSvy^{-1} = \left(0.92 \frac{nGy h^{-1}}{Bq kg^{-1}} \times C_{Ra} - 50nGyh^{-1}\right) \times 0.7SvGy^{-1} \times 7 \cdot 10^3hy^{-1} \quad (2.9)$$

από όπου

$$C_{Ra} = 121Bqkg^{-1} \quad (2.10)$$

Όμοια, για τις συγκεντρώσεις C_{Th} και C_K προκύπτουν:

$$C_{Th} = 101Bqkg^{-1} \quad (2.11)$$

και

$$C_K = 1390Bqkg^{-1} \quad (2.12)$$

Με παρόμοια επιχειρήματα προκύπτουν οι συγκεντρώσεις και κατά συνέπεια και ο αντίστοιχος δείκτης I_{112} για τα οικοδομικά υλικά επικάλυψης. Σημειώνεται ότι σε αυτήν την περίπτωση δεν αφαιρείται το υπόβαθρο των $50nGyh^{-1}$ αφού αυτά τα υλικά έχουν μικρό πάχος με αποτέλεσμα να μην περιορίζουν σημαντικά την ακτινοβολία υποβάθρου. Ενδεικτικά, για το ^{226}Ra ισχύει:

$$0.3mSvy^{-1} = 0.12 \frac{nGy h^{-1}}{Bq kg^{-1}} \times C_{Ra} \times 0.7SvGy^{-1} \times 7 \cdot 10^3 hy^{-1} \quad (2.13)$$

όπου $0.12 \frac{nGy h^{-1}}{Bq kg^{-1}}$ ο συντελεστής που εκφράζει ρυθμό δόσης και δίνεται από τον Πίνακα 2.5.

Μετά από πράξεις, προκύπτει:

$$C_{Ra} = 510Bqkg^{-1} \quad (2.14)$$

Παρόμοια, για τις συγκεντρώσεις C_{Th} και C_K προκύπτουν:

$$C_{Th} = 437Bqkg^{-1} \quad (2.15)$$

και

$$C_K = 6378Bqkg^{-1} \quad (2.16)$$

Οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις για οικοδομικά υλικά επικάλυψης και για το κριτήριο δόσης του $1mSvy^{-1}$, προκύπτουν:

$$C_{Ra} = 1710Bqkg^{-1} \quad (2.17)$$

$$C_{Th} = 1458Bqkg^{-1} \quad (2.18)$$

και

$$C_K = 21259Bqkg^{-1} \quad (2.19)$$

Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων των ραδιοϊσοτόπων πρέπει να γίνονται με τον κατάλληλο εξοπλισμό ο οποίος πρέπει να έχει τις απαιτούμενες πιστοποιήσεις ποιότητας καθώς και να έχει γίνει η απαραίτητη διακρίβωσή του. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, μετρήσεις των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας στα οικοδομικά υλικά πρέπει να πραγματοποιούνται όταν υπάρχει υποψία ότι αυτά τα οικοδομικά υλικά υπερβαίνουν το κριτήριο δόσης. Για παράδειγμα, όταν κάποια οικοδομικά υλικά περιέχουν ως πρόσμικτα βιομηχανικά παραπροϊόντα, τότε υπάρχουν αρκετές ενδείξεις ώστε να υποπτευθούμε ότι ενδεχομένως εκπέμπουν αυξημένα επίπεδα ακτινοβολίας. Τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα πρέπει να ελέγχουν, τουλάχιστον, εκείνα τα οικοδομικά υλικά που είναι ύποπτα. Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται κάποιες ενδείξεις που φανερώνουν υπέρβαση του κριτηρίου δόσης (European Commission, 1999).

Δομικό υλικό	Υπέρβαση του κριτηρίου δόσης των $0.3mSvγ^{-1}$	Υπέρβαση του κριτηρίου δόσης του $1mSvγ^{-1}$
Τσιμέντο	ΠΙΘΑΝΗ/σχεδόν παντού όταν χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες για δόμηση	ΠΙΘΑΝΗ/αν χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες για δόμηση και το τσιμέντο περιέχει μεγάλες ποσότητες σκωρίας υψικαμίνου, ιπτάμενης τέφρας ή φυσικής άμμου
Προμπετόν	ΠΙΘΑΝΗ/αν χρησιμοποιείται σκωρία υψικαμίνου, ιπτάμενη τέφρα ή φυσικά υλικά πλούσια σε ραδιοϊσότοπα	ΜΗ ΠΙΘΑΝΗ/χρήση μόνο στην κατασκευή τοίχων
Τούβλα	ΠΙΘΑΝΗ/αν ο πηλός που χρησιμοποιείται είναι πλούσιος σε ραδιοϊσότοπα	ΜΗ ΠΙΘΑΝΗ/χρήση μόνο στην κατασκευή τοίχων
Τούβλα άμμου/ασβέστη	ΜΗ ΠΙΘΑΝΗ/χαμηλές συγκεντρώσεις, χρήση μόνο στην κατασκευή τοίχων	ΜΗ ΠΙΘΑΝΗ/χαμηλές συγκεντρώσεις, χρήση μόνο στην κατασκευή τοίχων
Φυσική πέτρα	ΜΗ ΠΙΘΑΝΗ/χρήση μόνο ως υλικό επικάλυψης	ΜΗ ΠΙΘΑΝΗ/χρήση μόνο ως υλικό επικάλυψης
	ΠΙΘΑΝΗ/ όταν χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες για δόμηση	ΠΙΘΑΝΗ/ όταν χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες για δόμηση
Γυψοσανίδες	ΜΗ ΠΙΘΑΝΗ/φυσική γύψος ΠΙΘΑΝΗ/αν χρησιμοποιηθεί βιομηχανική γύψος πλούσια σε ράδιο	ΜΗ ΠΙΘΑΝΗ/ χρήση ως υλικό επικάλυψης ή για κατασκευή τοίχων

Πίνακας 2.6: Γενική εκτίμηση για το αν κάποιο δομικό υλικό υπερβαίνει το κριτήριο δόσης.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 2.6, σημαντικό ρόλο για το αν κάποιο οικοδομικό υλικό υπερβαίνει το κριτήριο δόσης παίζει η ποσότητα στην οποία χρησιμοποιείται αυτό το υλικό στις κατασκευές. Για παράδειγμα, η φυσική πέτρα αν χρησιμοποιείται μόνο ως υλικό επικάλυψης (επένδυση τοίχων) δεν θεωρείται πιθανό να υπερβαίνει το κριτήριο δόσης. Αντίθετα, αν η φυσική πέτρα χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες στην κατασκευή μιας οικοδομής (δόμηση - χτίσιμο τοίχων) θεωρείται πιθανή η υπέρβαση του κριτηρίου δόσης. Επιπρόσθετα, εξίσου σημαντικό ρόλο για το αν υπάρχει υπέρβαση του κριτηρίου δόσης παίζει και η ραδιολογική σύσταση του υλικού. Για παράδειγμα, για τη βιομηχανική γύψο, που ενδεχομένως είναι πλούσια σε ράδιο, υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις ότι υπερβαίνει το κριτήριο δόσης, ενώ για τη φυσική γύψο, που περιέχει χαμηλότερες συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων, κάτι τέτοιο δεν θεωρείται πιθανό. Πάντως, σε κάθε περίπτωση, αν η γύψος

χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως υλικό επικάλυψης, δεν είναι πιθανό να υπερβαίνεται το κριτήριο δόσης.

2.3.2 Μία ρεαλιστικότερη προσέγγιση για τον έλεγχο της φυσικής ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών

Ο δείκτης I_{112} χρησιμοποιείται ως ένα εργαλείο ελέγχου της φυσικής ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών. Συγκεκριμένα, ένα υλικό για το οποίο ο δείκτης αυτός ξεπερνά τη μονάδα (που αντιπροσωπεύει δόση $1mSv\gamma^{-1}$) κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί περαιτέρω ως προς τα επίπεδα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του, με άλλες μεθόδους και ενδεχομένως να γίνει προσεκτικός δοσιμετρικός υπολογισμός για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Σε μια περισσότερο ρεαλιστική προσέγγιση του προβλήματος, ο υπολογισμός της δόσης απαιτεί να λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες, όπως η πυκνότητα των υλικών, το πάχος τους, καθώς και άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με τον τύπο του κτηρίου (οικία, χώρος εργασίας κλπ) και τη χρήση των υλικών (δόμηση ή επικάλυψη). Τις τελευταίες δεκαετίες, μάλιστα, η ανάγκη για ακριβέστερη και αντικειμενικότερη εκτίμηση της φυσικής ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική καθώς η χρήση παραπροϊόντων της βιομηχανίας NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials), που χρησιμοποιούνται ως πρόσμικτα στα οικοδομικά υλικά και συνεισφέρουν σημαντικά στην αύξηση των συγκεντρώσεων των ραδιοϊσοτόπων, κερδίζει συνεχώς έδαφος. Ο δείκτης I_{112} , παρόλο που η αξία του είναι αδιαμφισβήτητη, δεν πληροί τα παραπάνω κριτήρια αφού βασίζεται σε μια σειρά όχι απαραίτητα ρεαλιστικών υποθέσεων (Nucetelli et al, 2015) και παραδοχών. Για παράδειγμα, οι διαστάσεις του δωματίου είναι $4m \times 5m \times 2.8m$, όλες οι επιφάνειες (τοίχοι, δάπεδο, ταβάνι) αποτελούνται από το ίδιο υλικό (τσιμέντο, πυκνότητα $= 2350kgm^{-3}$), δεν υπάρχουν παράθυρα κλπ.

Προκειμένου να υπάρξει ένα πιο αξιόπιστο εργαλείο ελέγχου των επιπέδων ακτινοβολίας εξαιτίας της φυσικής ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών, προτείνεται η δημιουργία ενός νέου δείκτη $I(\rho d)$, περισσότερο ευέλικτου, ο οποίος θα λαμβάνει υπόψη και τα χαρακτηριστικά εκείνα των οικοδομικών υλικών που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την εκπομπή γ -ακτινοβολίας, όπως η πυκνότητα (ρ) και το πάχος (d) των υλικών (Nucetelli et al, 2015). Όπως έχει διαπιστωθεί, για πάχος τοίχου έως $0.4m$, η δόση αυξάνεται με την αύξηση του πάχους, ενώ, η περαιτέρω αύξηση του πάχους (πέραν των $0.4m$) δεν διαφοροποιεί σημαντικά τη δόση, επειδή το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης του υλικού είναι εντονότερο.

Ο δείκτης $I(\rho d)$ έχει σαν πυρήνα το δείκτη I_{112} , όπως αυτός παρουσιάστηκε στη Σχέση (2.1), με τη διαφορά ότι οι παρονομαστές των κλασμάτων δεν είναι αριθμητικές σταθερές, αλλά συναρτήσεις $A(\rho d)_x$ της ανεξάρτητης μεταβλητής του προβλήματος (ισοδύναμο πάχος (ρd) του υλικού) και δίνονται από τη Σχέση (2.20).

$$A(\rho d)_x = m_1[1 + m_2(\rho d)^{-1} + m_3(\rho d)^{-2}] \quad (2.20)$$

όπου οι συντελεστές m_1, m_2, m_3 προκύπτουν χρησιμοποιώντας το μοντέλο *ISS Room Model* και εκφράζουν την ασυμπτωτική συμπεριφορά της συνάρτησης $A(\rho d)_x$, όταν ο παράγοντας $(\rho d) \rightarrow \infty$.

Ο δείκτης $I(\rho d)$ παίρνει τη μορφή:

$$I(\rho d) = \frac{C_{Ra}}{A(\rho d)_{Ra-226}} + \frac{C_{Th}}{A(\rho d)_{Th-232}} + \frac{C_K}{A(\rho d)_{K-40}} \quad (2.21)$$

Εφαρμόζοντας τη Σχέση (2.20) για κάθε ραδιοϊσότοπο και αντικαθιστώντας στην 2.21 προκύπτουν οι Σχέσεις (2.22), (2.23), (2.24).

$$A(\rho d)_{Ra-226} = 182[1 + 267(\rho d)^{-1} + 5128(\rho d)^{-2}] \quad (2.22)$$

$$A(\rho d)_{Th-232} = 140[1 + 285(\rho d)^{-1} + 4928(\rho d)^{-2}] \quad (2.23)$$

$$A(\rho d)_{K-40} = 1969[1 + 325(\rho d)^{-1} + 4440(\rho d)^{-2}] \quad (2.24)$$

Συνεπώς, μετά από αντικατάσταση, η ακριβής έκφραση για τον δείκτη $I(\rho d)$ δίνεται από τη Σχέση (2.25).

$$I(\rho d) = \frac{C_{Ra}(\rho d)^2}{182[(\rho d)^2 + 267(\rho d) + 5128]} + \frac{C_{Th}(\rho d)^2}{140[(\rho d)^2 + 285(\rho d) + 4928]} + \frac{C_K(\rho d)^2}{1969[(\rho d)^2 + 325(\rho d) + 4440]} \quad (2.25)$$

όπου C_{Ra}, C_{Th}, C_K οι συγκεντρώσεις των ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K , αντίστοιχα, στα οικοδομικά υλικά, σε $Bqkg^{-1}$ και ο παράγοντας πυκνότητα \times πάχος, (ρd) , σε kgm^{-2} .

Αξίζει να σημειωθεί πως ο δείκτης I_{112} προκύπτει ως ειδική περίπτωση του δείκτη $I(\rho d)$, αν θέσουμε στη Σχέση (2.25) όπου $(\rho d) = 2350kgm^{-3} \times 0.2m = 470kgm^{-2}$, το ισοδύναμο πάχος σκυροδέματος.

Χρησιμοποιώντας παρόμοια επιχειρήματα με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των $A(\rho d)_x$, η δόση λόγω της γ -ακτινοβολίας μπορεί να δοθεί από τη Σχέση (2.26).

$$D(mSv) = [B(\rho d)_{Ra-226}C_{Ra-226} + B(\rho d)_{Th-232}C_{Th-232} + B(\rho d)_{K-40}C_{K-40}] - 0.245 \quad (2.26)$$

όπου οι συντελεστές $B(\rho d)_x$ είναι εκφρασμένοι σε $mSv/Bqkg^{-1}$ και δίνονται από τις Σχέσεις (2.27), (2.28), (2.29).

$$B(\rho d)_{Ra-226} = \frac{(\rho d)^2}{170[(\rho d)^2 + 156(\rho d) + 11477]} \quad (2.27)$$

$$B(\rho d)_{Th-232} = \frac{(\rho d)^2}{130[(\rho d)^2 + 173(\rho d) + 11226]} \quad (2.28)$$

$$B(\rho d)_{K-40} = \frac{(\rho d)^2}{1870[(\rho d)^2 + 194(\rho d) + 11610]} \quad (2.29)$$

Επιπλέον, στη Σχέση (2.26) ο όρος $0.245mSv$, που αφαιρείται, αντιστοιχεί στο υπόβαθρο των $50nGy h^{-1}$ πολλαπλασιασμένο με το μέσο χρόνο παραμονής στο εσωτερικό των κτηρίων ($7000h$), αφού πρώτα γίνει η μετατροπή σε Sv ($1Sv = 0.7Gy$).

Ένας άλλος τρόπος για την εκτίμηση της ραδιολογικής συμπεριφοράς των οικοδομικών υλικών, γίνεται μέσω διαγραμμάτων πυκνότητας - πάχους υλικού, που λέγονται διαγράμματα ισοδοσικών καμπύλων. Οι ισοδοσικές καμπύλες προκύπτουν από τις Σχέσεις (2.27) έως (2.29). Κάθε σημείο μιας ισοδοσικής καμπύλης χαρακτηρίζεται από την ίδια τιμή δόσης.

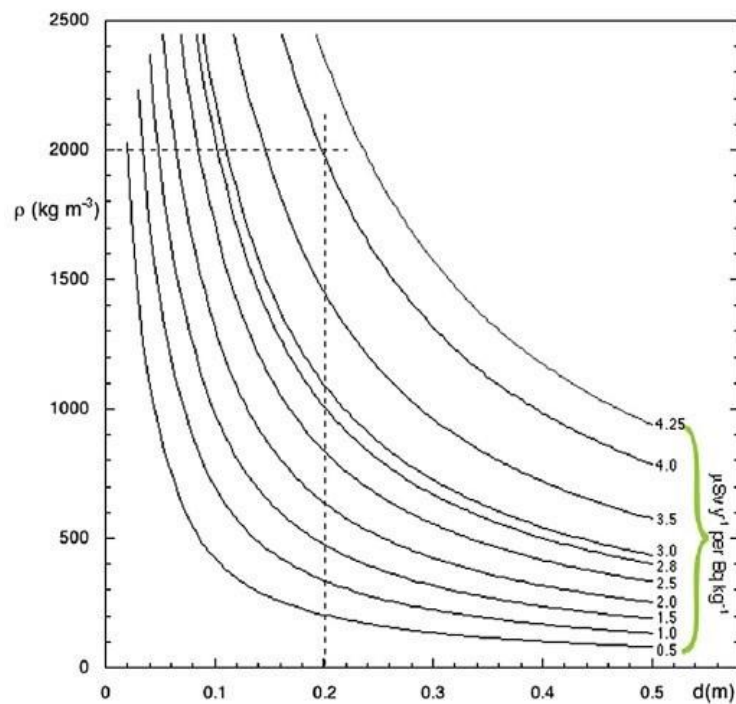
Στα Σχήματα 2.10 έως 2.12 παρουσιάζονται οι ισοδοσικές καμπύλες για τα ραδιοϊσότοπα ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K , αντίστοιχα. Αυτές οι καμπύλες είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση της ραδιολογικής συνεισφοράς του κάθε ραδιοϊσοτόπου στη δόση, για διάφορες τιμές πυκνότητας και πάχους υλικού. Από τη στιγμή που έχει επιλεγεί το κριτήριο δόσης, η αντίστοιχη ισοδοσική καμπύλη μπορεί να μας δώσει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των ρ και d .

Ένα παράδειγμα μιας πιθανής χρήσης των ισοδοσικών καμπύλων είναι το ακόλουθο: αν υποθέσουμε ότι το κτήριο απαιτεί για την κατασκευή του υλικό πυκνότητας $2000kgm^{-3}$ και πάχος τοίχων $0.2m$ και μας ζητείται η συνεισφορά του ^{226}Ra στη δόση, τότε, όπως

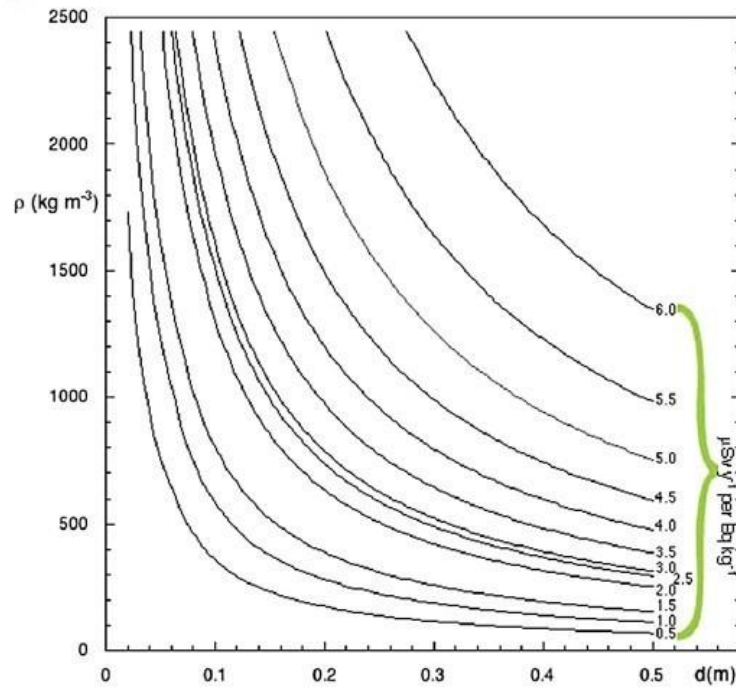
φαίνεται και στο Σχήμα 2.10, σε αυτές τις τιμές πυκνότητας και πάχους υλικού αντιστοιχεί η ισοδοσική καμπύλη των $4.0 \mu Sv y^{-1} / Bq kg^{-1}$.

Πολύ εύκολα μπορεί να διατυπωθεί και να λυθεί και το αντίστροφο πρόβλημα: με δεδομένο ότι η πυκνότητα του υλικού είναι $2350 kg m^{-3}$ και η συνεισφορά του ^{226}Ra δεν πρέπει να υπερβαίνει τα $3.5 \mu Sv y^{-1} / Bq kg^{-1}$, ποιο είναι το πάχος του υλικού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί; Προφανώς, από την αντίστοιχη ισοδοσική καμπύλη και για πυκνότητα $2350 kg m^{-3}$, προκύπτει πάχος $d = 0.12 m$.

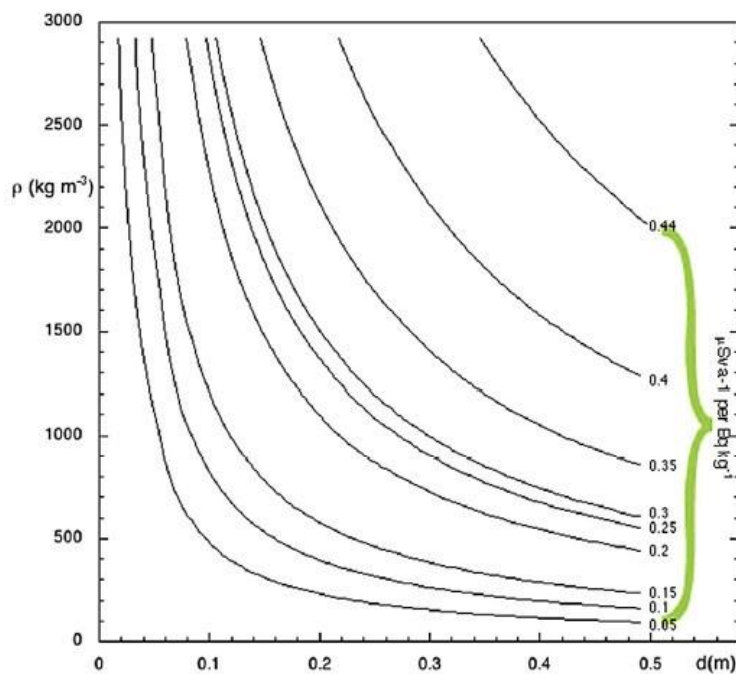
Αντίστοιχα, για τα ^{232}Th και ^{40}K , αν είναι γνωστό το κριτήριο δόσης, πολύ εύκολα, μέσω της κατάλληλης ισοδοσικής καμπύλης, υπολογίζονται πυκνότητα και πάχος υλικού.



Σχήμα 2.10: Ισοδοσικές καμπύλες πυκνότητας – πάχους για το ^{226}Ra (Nuccetelli et al, 2015)



Σχήμα 2.11: Ισοδοσικές καμπύλες πυκνότητας - πάχους για το ^{232}Th (Nucetelli et al, 2015)



Σχήμα 2.12: Ισοδοσικές καμπύλες πυκνότητας - πάχους για το ^{40}K (Nucetelli et al, 2015)

2.3.3 Σύγκριση των δεικτών I_{112} και $I(\rho d)$

Οι (Nucetelli et al, 2015) συνέκριναν τα αποτελέσματα που δίνει η εφαρμογή των δεικτών I_{112} και $I(\rho d)$ μεταξύ τους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησαν δεδομένα για τις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων στα οικοδομικά υλικά (όπως σκυρόδεμα, τούβλα κλπ) από τη βάση δεδομένων ραδιενέργειας οικοδομικών υλικών που περιγράφεται στην παράγραφο 2.4.

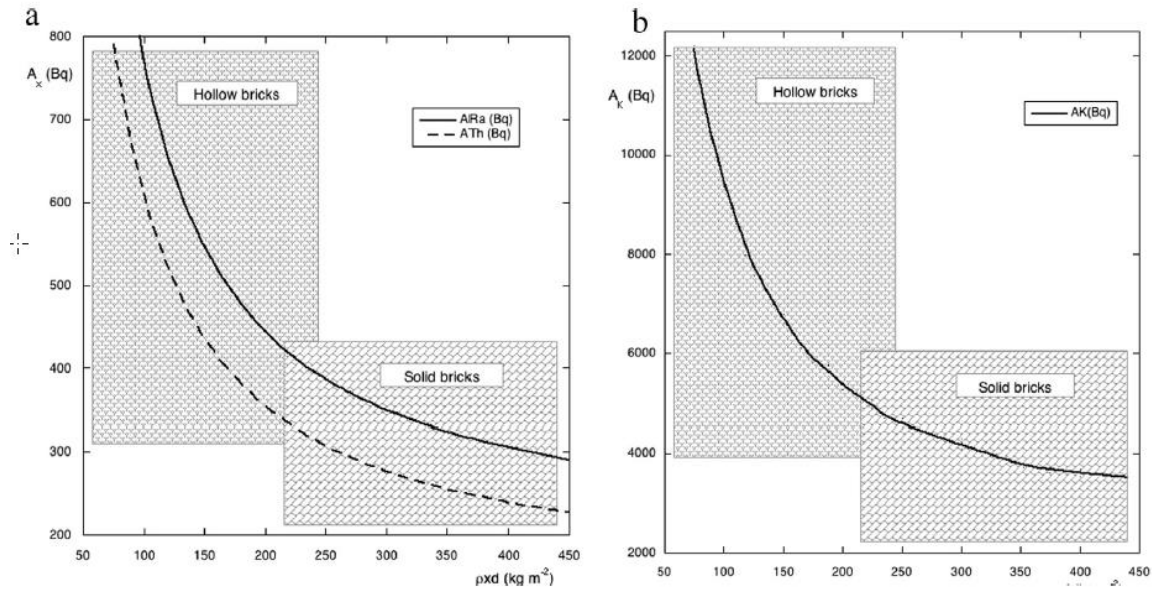
Καταρχάς, όπως ήταν αναμενόμενο, τα αποτελέσματα που δίνει ο δείκτης $I(\rho d)$ όταν εφαρμοστεί σε τυπικό σκυρόδεμα πυκνότητας 2350kgm^{-3} είναι ταυτόσημα με τα αποτελέσματα του δείκτη I_{112} . Αυτό συμβαίνει επειδή ο δείκτης I_{112} προκύπτει ως ειδική περίπτωση του δείκτη $I(\rho d)$ για ισοδύναμο πάχος σκυροδέματος $(\rho d) = 2350\text{kgm}^{-3} \times 0.2\text{m} = 470\text{kgm}^{-2}$.

Για την εφαρμογή του δείκτη $I(\rho d)$ σε δείγματα τούβλων οι (Nucetelli et al, 2015) έκαναν τα εξής βήματα: αρχικά, με δεδομένη τη μέση πυκνότητα 1500kgm^{-3} και το μέσο πάχος 0.15m των δειγμάτων $((\rho d) = 1500\text{kgm}^{-3} \times 0.15\text{m} = 225\text{kgm}^{-2})$, υπολόγισαν τις ποσότητες $A(\rho d)_x$ όπως αυτές περιγράφονται από τις Σχέσεις (2.22) έως (2.24). Αναλυτικά, προέκυψαν $A(\rho d)_{Ra-226} = 416\text{Bqkg}^{-1}$, $A(\rho d)_{Th-232} = 329\text{Bqkg}^{-1}$ και $A(\rho d)_{K-40} = 4986\text{Bqkg}^{-1}$. Έπειτα, υπολόγισαν το δείκτη $I(\rho d)$ για κάθε ένα από τα 1607 δείγματα τούβλων. Όλες οι τιμές του δείκτη $I(\rho d)$ προέκυψαν μικρότερες από τη μονάδα.

Προκειμένου να μελετηθεί η εξάρτηση των ποσοτήτων $A(\rho d)_x$ ως προς το ισοδύναμο πάχος (ρd) , ελήφθησαν υπόψη πυκνότητες δειγμάτων τούβλων μεταξύ $700 - 1800\text{kgm}^{-3}$, και πάχους μεταξύ $0.12 - 0.25\text{m}$. Με αυτόν τον τρόπο και για κριτήριο δόσης το 1mSv προέκυψαν οι ισοδοσικές καμπύλες του Σχήματος 2.13, όπου αναπαρίστανται οι ποσότητες $A(\rho d)_x$ ως προς το ισοδύναμο πάχος (ρd) των δειγμάτων τούβλων.

Αντίστοιχα, για τα δείγματα τούβλων οι (Nucetelli et al, 2015) υπολόγισαν και το δείκτη I_{112} . Συγκρίνοντας τους δύο δείκτες προκύπτει πως ο δείκτης I_{112} υπερεκτιμά τη ραδιολογική επίπτωση των οικοδομικών υλικών που είναι ελαφρύτερα από το σκυρόδεμα. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.13, για συμπαγή τούβλα, το ισοδύναμο πάχος των οποίων $((\rho d) = 450\text{kgm}^{-2})$ βρίσκεται πολύ κοντά στο ισοδύναμο πάχος σκυροδέματος $((\rho d) = 470\text{kgm}^{-2})$, οι ποσότητες $A(\rho d)_x$ παίρνουν παρόμοιες τιμές με τις τιμές που είχαν για το δείκτη I_{112} ($A_{Ra} \approx 300\text{Bqkg}^{-1}$, $A_{Th} \approx 200\text{Bqkg}^{-1}$, $A_K \approx 3000\text{Bqkg}^{-1}$). Αντίθετα, για τούβλα μικρής πυκνότητας οι τιμές των $A(\rho d)_x$ είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές A_x του δείκτη I_{112} . Αυτό σημαίνει πως ο δείκτης $I(\rho d)$ είναι μικρότερος από τον δείκτη I_{112} (οι ποσότητες $A(\rho d)_x$ βρίσκονται στους παρονομαστές των κλασμάτων). Υπό αυτή την

έννοια, και επειδή ο δείκτης $I(\rho d)$ περιγράφει καλύτερα την πραγματικότητα, ο δείκτης I_{112} υπερεκτιμά τη ραδιολογική επίπτωση των τούβλων χαμηλής πυκνότητας.



Σχήμα 2.13: Ισοδοσικές καμπύλες για τα ραδιοϊσότοπα ^{226}Ra και ^{232}Th (a) καθώς και ^{40}K (b) (Nucetelli et al, 2015)

Συμπερασματικά, οι (Nucetelli et al, 2015) επισημαίνουν και πάλι πως οι δείκτες I_{112} και $I(\rho d)$ είναι μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον ραδιολογικό έλεγχο των οικοδομικών υλικών. Όσον αφορά στο δείκτη $I(\rho d)$, πλεονεκτεί έναντι του I_{112} αφού προσεγγίζει με ρεαλιστικότερο τρόπο την πραγματικότητα, λαμβάνοντας υπόψη και παραμέτρους όπως η πυκνότητα και το πάχος των υλικών. Ο ρυθμός δόσης εκφράστηκε και αυτός σε όρους πυκνότητας και πάχους, ενώ με βάση το φορμαλισμό που αναπτύχθηκε σχεδιάστηκαν οι αντίστοιχες οικογένειες καμπυλών, οι ισοδοσικές καμπύλες, από τις οποίες μπορούμε εύκολα να εκτιμήσουμε τη συνεισφορά συγκεκριμένων ραδιοϊσοτόπων στη δόση, για δεδομένες τιμές πυκνότητας και πάχους.

2.4 Η βάση δεδομένων για τη φυσική ραδιενέργεια στα οικοδομικά υλικά

Το 2011 δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων που αποτελείται από περίπου 10 000 δείγματα οικοδομικών υλικών με μετρήσεις για τη ραδιενέργειά τους (Trevisi et al, 2012). Αυτή η βάση δεδομένων περιέχει οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες στις κατασκευές (τούβλα, τσιμέντο, φωσφογύψος, πέτρες κλπ) καθώς και υλικά επικάλυψης (πλακάκια, πέτρες επικάλυψης κλπ). Τα οικοδομικά υλικά που παρουσιάζονται χρησιμοποιούνται στις κατασκευές στα διάφορα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά δεν παράγονται αναγκαστικά στα ίδια κράτη μέλη στα οποία χρησιμοποιούνται. Ο σκοπός για τη δημιουργία αυτής της βάσης δεδομένων είναι διπλός: πρώτον, παρουσιάζονται και κατηγοριοποιούνται τα οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και δεύτερον, ελέγχεται το κατά πόσο μπορούν να εφαρμοστούν με επιτυχία οι ρυθμιστικοί έλεγχοι που θέτει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή με την τεχνική έκθεση *Radiation Protection 112*.

Τα δείγματα που παρουσιάζονται καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος οικοδομικών υλικών. Συγκεκριμένα, υλικά που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες (δόμηση) στις κατασκευές, όπως τούβλα και τσιμέντο (~4400 δείγματα), υλικά που χρησιμοποιούνται τόσο για δόμηση όσο και για επικάλυψη τοίχων, όπως γύψος και κονιάματα (~2500 δείγματα) καθώς και φυσική πέτρα (~900 δείγματα), φωσφογύψος (~290 δείγματα), βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως ιπτάμενες τέφρες (~1300 δείγματα) καθώς και διάφορα άλλα οικοδομικά υλικά, όπως ξύλο και πλακάκια (~500 δείγματα).

Στους Πίνακες 2.7 έως και 2.10 παρουσιάζονται, ταξινομημένες ανά χώρα, οι μέσες συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K για τα οικοδομικά υλικά: τούβλα, σκυρόδεμα, τσιμέντο και φωσφογύψος, αντίστοιχα, όπως προκύπτουν από τη βάση δεδομένων.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.7, οι μέσες συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων στα δείγματα τούβλων κυμαίνονται μεταξύ $9 - 83\text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{226}Ra , $6 - 147\text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{232}Th και $200 - 804\text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{40}K . Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η μέσες τιμές για τα ^{226}Ra και ^{232}Th (47Bqkg^{-1} και 48Bqkg^{-1} , αντίστοιχα) είναι παραπλήσιες. Ο συντελεστής μεταβολής (CV) ή βαθμός διασποράς παίρνει τις τιμές 37%, 60% και 22% για τα ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K , αντίστοιχα. Αυτό δείχνει ότι οι συγκεντρώσεις του ^{40}K στις διάφορες χώρες έχουν μικρότερη διασπορά σε σχέση με τις συγκεντρώσεις του ^{226}Ra , ενώ το ^{232}Th

εμφανίζει την πλέον μεγαλύτερη ανομοιογένεια σε όλα τα δείγματα τούβλων που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων στη μελέτη.

Χώρες	Μέσες συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων ($Bqkg^{-1}$)		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Αυστρία	38	45	635
Βέλγιο	41	37	692
Βουλγαρία	42	43	600
Κύπρος	9	6	200
Τσεχία	48	49	592
Δανία	25	21	455
Φινλανδία	52	42	804
Γαλλία	51	53	-
Γερμανία	50	46	453
Ελλάδα	53	35	680
Ουγγαρία	56	48	556
Ιρλανδία	42	31	482
Ιταλία	37	30	672
Λιθουανία	40	32	754
Λουξεμβούργο	83	147	597
Ολλανδία	38	40	532
Πολωνία	16	20	515
Πορτογαλία	64	52	786
Ρουμανία	45	47	501
Σλοβακία	49	44	695
Σλοβενία	81	87	676
Ισπανία	54	68	569
Σουηδία	75	94	734
Ηνωμένο Βασίλειο	46	32	570
Μέση Τιμή	47	48	598
Συντελεστής Μεταβολής (%)	37	60	22

Πίνακας 2.7: Οι μέσες συγκεντρώσεις για τούβλα (τουλάχιστον 1676 δείγματα) (Trevisi et al, 2012)

Στον Πίνακα 2.8 φαίνονται οι μέσες συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων στα δείγματα σκυροδέματος ταξινομημένες ανά χώρα. Για το ^{226}Ra οι μέσες συγκεντρώσεις κυμαίνονται μεταξύ $15 - 242 Bqkg^{-1}$, για το ^{232}Th μεταξύ $6 - 92 Bqkg^{-1}$, ενώ για το ^{40}K μεταξύ $88 -$

747Bqkg^{-1} . Οι συντελεστές μεταβολής (CV) είναι 90%, 64% και 53% για τα ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K , αντίστοιχα. Αυτό δείχνει ότι τη μεγαλύτερη ανομοιογένεια την εμφανίζουν οι συγκεντρώσεις του ^{226}Ra . Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής μεταβολής του ^{232}Th στα δείγματα σκυροδέματος παίρνει παραπλήσια τιμή με τον αντίστοιχο συντελεστή για το ^{232}Th στα δείγματα τούβλων (64% και 60%, αντίστοιχα). Από την άλλη πλευρά, ο συντελεστής μεταβολής και κατ' επέκταση και ο βαθμός διασποράς των τιμών για το ^{40}K στο σκυρόδεμα είναι σημαντικά μεγαλύτερος από αυτόν στα τούβλα (53% έναντι 22%).

Χώρες	Μέσες συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων (Bqkg^{-1})		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Αυστρία	15	14	164
Βέλγιο	17	16	247
Βουλγαρία	25	24	450
Τσεχία	33	24	495
Δανία	152	27	620
Φινλανδία	42	37	740
Γαλλία	44	40	88
Γερμανία	54	57	629
Ελλάδα	40	6	101
Ουγγαρία	16	22	356
Ιρλανδία	29	12	217
Ιταλία	19	18	329
Λιθουανία	32	17	426
Λουξεμβούργο	93	92	110
Ολλανδία	35	30	263
Πολωνία	115	72	666
Πορτογαλία	61	50	747
Ρουμανία	65	64	425
Σλοβακία	34	27	402
Σλοβενία	117	20	218
Ισπανία	30	32	204
Σουηδία	242	70	627
Ηνωμένο Βασίλειο	61	30	493
Μέση Τιμή	60	35	392
Συντελεστής Μεταβολής (%)	90	64	53

Πίνακας 2.8: Οι μέσες συγκεντρώσεις για σκυρόδεμα (τουλάχιστον 2727 δείγματα) (Trevisi et al, 2012)

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.9, οι μέσες συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων στα δείγματα τσιμέντου κυμαίνονται μεταξύ $16 - 86 \text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{226}Ra , $10 - 73 \text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{232}Th και $24 - 357 \text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{40}K . Οι συντελεστές μεταβολής (CV) παίρνουν τις τιμές 45%, 67% και 37% για τα ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K , αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων στους τύπους τσιμέντου που κυκλοφορούν στην ευρωπαϊκή αγορά φαίνεται να έχουν παραπλήσιες τιμές με τις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων των άλλων οικοδομικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες στις κατασκευές (πχ τούβλα), με εξαίρεση τις συγκεντρώσεις του ^{40}K .

Χώρες	Μέσες συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων (Bqkg^{-1})		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Αυστρία	27	14	210
Βέλγιο	52	46	255
Βουλγαρία	29	19	160
Κύπρος	16	10	152
Τσεχία	46	19	237
Δανία	20	12	90
Φινλανδία	40	20	251
Γαλλία	35	21	24
Γερμανία	86	73	170
Ελλάδα	85	19	257
Ουγγαρία	30	22	218
Ιρλανδία	60	11	131
Ιταλία	41	63	357
Ολλανδία	62	64	271
Πολωνία	73	66	353
Πορτογαλία	31	19	256
Ρουμανία	44	27	233
Σλοβακία	35	18	223
Ισπανία	61	40	305
Σουηδία	53	54	224
Ηνωμένο Βασίλειο	22	18	160
Μέση Τιμή	45	31	216
Συντελεστής Μεταβολής (%)	45	67	37

Πίνακας 2.9: Οι μέσες συγκεντρώσεις για τσιμέντο (τουλάχιστον 2013 δείγματα) (Trevisi et al, 2012)

Το τσιμέντο είναι ένα οικοδομικό υλικό που χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες στις κατασκευές καθώς αναμιγνύεται με τα αδρανή υλικά (χαλίκι, άμμος) για παρασκευή σκυροδέματος. Τα αδρανή υλικά, συνήθως, εμφανίζουν χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων, οπότε το τσιμέντο παίζει σημαίνοντα ρόλο και διαμορφώνει σε σημαντικό βαθμό τα επίπεδα της ραδιενέργειας στο σκυρόδεμα. Υπό αυτό το πρίσμα, αναμένει κανείς οι συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων να είναι σημαντικά μεγαλύτερες στο τσιμέντο σε σχέση με το σκυρόδεμα. Κάτι τέτοιο, όμως, δεν επαληθεύεται (Trevisi et al, 2012). Αυτό οφείλεται στο ότι το τσιμέντο των δειγμάτων που συμμετείχαν στη μελέτη (Πίνακας 2.9) δεν είναι το ίδιο τσιμέντο με αυτό που περιέχεται στα δείγματα σκυροδέματος (Πίνακας 2.8), καθώς και στο ότι σε πολλές περιπτώσεις τα αδρανή υλικά που συμμετέχουν στο σκυρόδεμα έχουν αξιόλογες ποσότητες ραδιοϊσοτόπων, οπότε η επίδρασή τους στη ραδιενέργεια δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Όσον αφορά στη γύψο τα διαθέσιμα δεδομένα είναι λιγότερα. Στον Πίνακα 2.10 φαίνονται οι μέσες συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων στα δείγματα φωσφογύψου, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ $115 - 1018 \text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{226}Ra , $10 - 40 \text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{232}Th και $3 - 242 \text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{40}K . Οι συγκεντρώσεις του ^{40}K στα δείγματα φωσφογύψου είναι αρκετά χαμηλότερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα δείγματα τούβλων, σκυροδέματος και τσιμέντου, ενώ η μέση συγκέντρωση του ^{226}Ra στα δείγματα από το Ηνωμένο Βασίλειο είναι ιδιαίτερα υψηλή (1018Bqkg^{-1}).

Χώρες	Μέσες συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων (Bqkg^{-1})		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Βέλγιο	431	11	-
Βουλγαρία	209	17	3
Τσεχία	115	31	95
Φινλανδία	306	23	17
Γερμανία	305	20	110
Ελλάδα	606	10	22
Ολλανδία	223	24	50
Πολωνία	267	17	72
Ρουμανία	497	40	242
Σλοβενία	500	10	41
Ηνωμένο Βασίλειο	1018	33	130
Μέση Τιμή	407	21	78

Πίνακας 2.10: Οι μέσες συγκεντρώσεις για φωσφογύψο (τουλάχιστον 290 δείγματα) (Trevisi et al, 2012)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των επιπέδων εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μεταξύ οικοδομικών υλικών και χώματος. Στον Πίνακα 2.11 φαίνονται οι μέσες συγκεντρώσεις των δειγμάτων τούβλων, σκυροδέματος, τσιμέντου και γύψου, που αναλύονται παραπάνω, καθώς και οι μέσες συγκεντρώσεις δειγμάτων χώματος από κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως αυτές παρουσιάζονται στην έκθεση UNSCEAR 2008. Προκύπτει ότι οι συγκεντρώσεις των ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K στα τούβλα είναι κατά 31%, 41% και 24% υψηλότερες από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις χώματος. Αντίθετα, όσον αφορά στο ^{232}Th , οι συγκεντρώσεις στο σκυρόδεμα και στο τσιμέντο είναι παραπλήσιες με αυτές του χώματος, ενώ αυτές του ^{226}Ra είναι υψηλότερες από τις συγκεντρώσεις χώματος κατά 67% και 25%, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, οι μέσες συγκεντρώσεις στη γύψο είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις χώματος.

Οικοδομικά υλικά	Πλήθος δειγμάτων	Μέσες συγκεντρώσεις (και εύρος) ραδιοϊσοτόπων (Bqkg^{-1})		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Τούβλα	1676	47 (2-148)	48 (2-164)	598 (12-1169)
Σκυρόδεμα	2727	60 (1-1300)	35 (1-152)	392 (7-1450)
Τσιμέντο	2013	45 (4-422)	31 (3-266)	216 (4-846)
Γύψος	502	15 (1-70)	9 (1-100)	91 (5-279)
Χώμα	23	36 (0-1000)	34 (1-258)	483 (0-3200)

Πίνακας 2.11: Σύγκριση συγκεντρώσεων μεταξύ οικοδομικών υλικών και χώματος (Trevisi et al, 2012)

Τα δείγματα πέτρας ομαδοποιήθηκαν ανάλογα με τη γεωλογική τους προέλευση σε πλουτώνια πυριγενή (γρανίτες, διορίτες κλπ), ηφαιστειογενή πυριγενή (βασάλτες, φωνόλιθοι κλπ), μεταμορφωμένα (ασβεστόλιθοι, αμμόλιθοι κλπ) και ιζηματογενή. Η βάση δεδομένων περιέχει τουλάχιστον 924 δείγματα φυσικής πέτρας. Τα 303 από αυτά χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες για δόμηση, ενώ τα υπόλοιπα 621 χρησιμοποιούνται ως υλικά επικάλυψης. Στον Πίνακα 2.12 συνοψίζονται με βάση τη γεωλογική τους προέλευση τα 621 δείγματα πέτρας που χρησιμοποιούνται για επικάλυψη. Από αυτόν τον πίνακα απουσιάζουν οι πέτρες ιζηματογενούς προέλευσης καθώς, στην πλειονότητά τους, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για δόμηση και όχι ως στοιχεία επικάλυψης. Παρόλο που τα δεδομένα δεν είναι επαρκή για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, παρατηρούμε ότι τα πυριγενή δείγματα και ιδιαίτερα τα ηφαιστειογενούς προέλευσης παρουσιάζουν αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων. Αντίθετα, τα

δείγματα που προέρχονται από μεταμορφωμένα πετρώματα εμφανίζουν χαμηλά ποσοστά ραδιενέργειας.

Πέτρα επικάλυψης	Πλήθος δειγμάτων	Μέσες συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων ($Bqkg^{-1}$)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Πλουτώνια πυριγενής	387	78	89	1049
Ηφαιστειογενής πυριγενής	86	160	163	1295
Μεταμορφωμένη	148	27	21	395

Πίνακας 2.12: Οι μέσες συγκεντρώσεις για πέτρα επικάλυψης (τουλάχιστον 621 δείγματα) (Trevisi et al, 2012)

Με την αξιοποίηση αυτής της βάσης δεδομένων και λαμβάνοντας υπόψη τον δείκτη I_{112} εκτιμήθηκαν τα ποσοστά των οικοδομικών υλικών που υπερβαίνουν τις προβλεπόμενες, από το κριτήριο δόσης, δόσεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.13. Είναι ξεκάθαρο πως στην πλειονότητα των οικοδομικών υλικών ο δείκτης I_{112} ξεπερνά την τιμή 0.5, που αντιστοιχεί σε δόση $0.3mSvy^{-1}$. Αυτό δείχνει ότι το κριτήριο δόσης των $0.3mSvy^{-1}$ είναι δύσκολο να εφαρμοστεί. Αντίθετα, μόλις ένα μικρό ποσοστό των δειγμάτων τσιμέντου και τούβλων έχει δείκτη I_{112} μεγαλύτερο της μονάδας, που αντιστοιχεί σε δόση $1mSvy^{-1}$. Συνεπώς, το κριτήριο δόσης του $1mSvy^{-1}$ είναι εφικτό και μπορεί να εφαρμοστεί με σχετική ευκολία. Όσον αφορά στα δείγματα φωσφογύψου, η συντριπτική τους πλειονότητα υπερβαίνει και τα δύο κριτήρια δόσης. Αυτό δείχνει ότι το συγκεκριμένο υλικό δεν κρίνεται κατάλληλο, από ραδιολογική άποψη, για δόμηση.

Οικοδομικά υλικά	Πλήθος δειγμάτων	Υπέρβαση κριτηρίου δόσης ($mSvy^{-1}$)	
		0.3 $I_{112} > 0.5$	1 $I_{112} > 1$
Τούβλα	1593	91%	5%
Τσιμέντο	2704	62%	5%
Φωσφογύψος	257	98%	84%

Πίνακας 2.13 : Ποσοστό οικοδομικών υλικών που υπερβαίνει τα κριτήρια δόσης (Trevisi et al, 2012)

Παρόλο που η βάση δεδομένων δεν είναι πλήρης, οι (Trevisi et al, 2012) βασίστηκαν σε αυτήν για την εξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων. Καταρχάς, τα περισσότερα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν επενδύσει στην έρευνα που αφορά στην εκτίμηση των επιπέδων φυσικής ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών (κυρίως τούβλων, τσιμέντου και σκυροδέματος), όμως τα περισσότερα δεδομένα δεν αντιπροσωπεύουν πλήρως την κατάσταση που επικρατεί σε κάθε κράτος μέλος και στις περισσότερες περιπτώσεις οι μέσες συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K εμφανίζουν σημαντική κύμανση. Επιπλέον, οι συγκεντρώσεις του ^{232}Th , στις περισσότερες των περιπτώσεων, βρίσκονται στα ίδια επίπεδα με αυτές του ^{226}Ra . Συνεπώς, η έρευνα θα μπορούσε να στραφεί και στις επιπτώσεις στην υγεία εξαιτίας της αλυσίδας του θορίου και ειδικότερα στο θορόνιο και τα θυγατρικά του. Όσον αφορά στο κριτήριο δόσης των 0.3mSvy^{-1} , φαίνεται ότι είναι δύσκολο να εφαρμοστεί καθότι στα περισσότερα δείγματα οικοδομικών υλικών που συμμετείχαν στην έρευνα ο δείκτης I_{112} ξεπερνά την τιμή 0.5. Από την άλλη πλευρά, το κριτήριο του 1mSvy^{-1} είναι σαφώς πιο εύκολα εφαρμόσιμο. Ίσως, την καλύτερη σχέση οικονομικού κόστους – αποδοτικότητας κριτηρίου να την πληροί ένα κριτήριο δόσης μεταξύ των τιμών 0.3mSvy^{-1} και 1mSvy^{-1} , όπως εξάλλου προτείνει και η τεχνική έκθεση *Radiation Protection 112*.

2.5 Φυσική ραδιενέργεια οικοδομικών υλικών στην Ελλάδα και σύγκριση με άλλες χώρες

Με δεδομένο ότι ο σύγχρονος άνθρωπος καταναλώνει κατά μέσο όρο το 80% του χρόνου ζωής του στο εσωτερικό των κτηρίων, είναι σαφές πως η γνώση μας για τη φυσική ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών, που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, είναι εξαιρετικά σημαντική για τον έλεγχο και τον περιορισμό της έκθεσης του πληθυσμού σε ιονίζουσες ακτινοβολίες. Για αυτό το λόγο, τις τελευταίες δεκαετίες, η έρευνα που επικεντρώνεται στον εντοπισμό των συγκεντρώσεων των ραδιοϊσοτόπων που περιέχονται στα οικοδομικά υλικά προχωρά με μεγάλους ρυθμούς και κερδίζει το ενδιαφέρον ολοένα και περισσότερων ερευνητών. Παράλληλα, προωθείται η λήψη μέτρων προστασίας και διαμορφώνεται το θεσμικό πλαίσιο που καθορίζει τους κανόνες ασφαλείας ώστε να ικανοποιείται, στο μέτρο του δυνατού, η βασική αρχή ακτινοπροστασίας ALARA (As Low As Reasonably Achievable), δηλαδή τόσο χαμηλά όσο είναι λογικά εφικτό, χωρίς όμως να

αμελούνται οι κοινωνικοοικονομικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες χώρες ανά τον κόσμο όπου επιβάλλονται περιορισμοί στη χρήση οικοδομικών υλικών.

Τα οικοδομικά υλικά, είτε είναι φυσικής προέλευσης (πέτρες, γρανίτες κλπ), είτε περιέχουν βιομηχανικά παραπροϊόντα (ιπτάμενες τέφρες, σκωρίες κλπ) λειτουργούν ως πηγές φυσικής ραδιενέργειας, αλλά από την άλλη πλευρά, λειτουργούν και ως ασπίδα, θωρακίζοντας το εσωτερικό των κτηρίων από τη ραδιενέργεια περιβάλλοντος. Για αυτό το λόγο, θεωρούμε πως ο απορροφώμενος ρυθμός δόσης στο εσωτερικό των κτηρίων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων που περιέχονται στα οικοδομικά υλικά. Κατά καιρούς έχουν δημοσιευθεί πολλές έρευνες, σε διάφορες χώρες ανά τον κόσμο, για τον προσδιορισμό αυτών των συγκεντρώσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι έρευνες πραγματοποιούνται με χρήση μεθόδων γ-φασματοσκοπίας.

2.5.1 Φυσική ραδιενέργεια οικοδομικών υλικών που χρησιμοποιούνται στον ελλαδικό χώρο

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διαφόρων δημοσιεύσεων που αφορούν σε οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στον ελλαδικό χώρο και τα οποία αναλύθηκαν με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας.

Οι (Louizi et al, 1995) συνέλεξαν δείγματα τσιμέντου από τις τρεις κύριες ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες, δείγματα τούβλων από πέντε μεγάλα εργοστάσια παραγωγής τούβλων στα οποία η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται προέρχεται από πέντε διαφορετικές τοποθεσίες ανά την Ελλάδα, καθώς και δείγματα άλλων οικοδομικών υλικών που θεωρούνται μάλλον χαμηλότερης ραδιολογικής σημασίας.

Ο Πίνακας 2.14 συνοψίζει τις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K στα δείγματα των οικοδομικών υλικών που αναλύθηκαν. Η συνολική αβεβαιότητα που συνοδεύει τις μετρήσεις και υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη συστηματικά και τυχαία σφάλματα, κυμαίνεται μεταξύ 5-10% των αναγραφόμενων τιμών. Με βάση τον πίνακα αυτό, τα επίπεδα εκπεμπόμενης ραδιενέργειας από τα συγκεκριμένα δείγματα οικοδομικών υλικών είναι χαμηλά, με εξαίρεση δύο δείγματα, ένα τσιμέντου και ένα τούβλων, στα οποία η συγκέντρωση του ^{226}Ra αγγίζει τα 147Bqkg^{-1} και 48Bqkg^{-1} , αντίστοιχα.

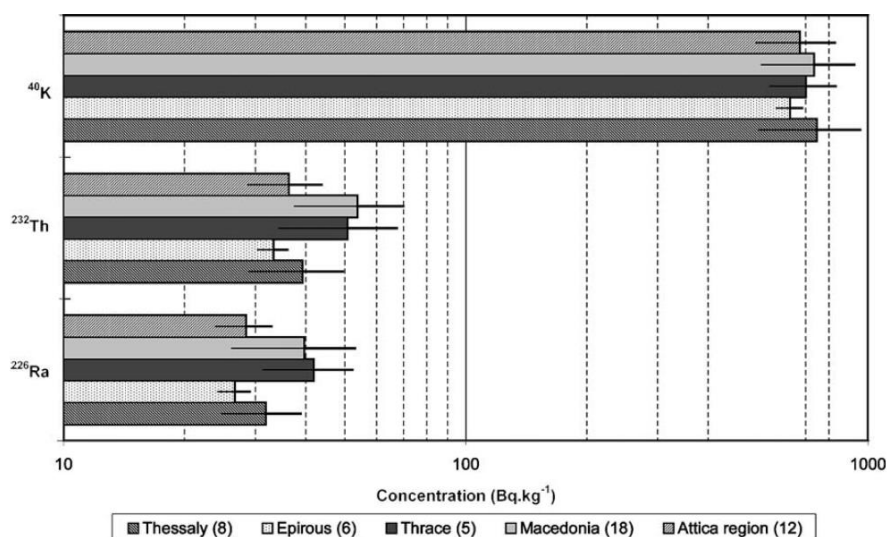
Οικοδομικά υλικά	Πλήθος δειγμάτων	Συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων ($Bqkg^{-1}$)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Τσιμέντο	52	29-147	13-30	172-331
Λευκό τσιμέντο	10	14-26	7-13	5-67
Τούβλα	5	28-48	37-56	727-895
Άμμος θαλάσσης	6	7-13	8-16	145-302
Άμμος	9	1-4	-3	1-37
Μάρμαρο (σκόνη)	8	-	-	-25
Μωσαϊκό	7	1-3	1-3	-23
Γύψος	6	6-17	-10	5-40
Ελαφρόπετρα	4	50-874	54-60	1048-1160
Άσβεστος	2	9-32	-	-
Περλίτης	1	46	56	1048
Πλακίδια τοίχων	1	58	46	409

Πίνακας 2.14: Συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων σε οικοδομικά υλικά στην Ελλάδα (Louizi et al, 1995)

Προκειμένου να ελεγχθεί αν τα οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη δόμηση στον ελληνικό χώρο ακολουθούν την αρχή ALARA, έχει προταθεί η δημιουργία ενός προτύπου που θα καθορίζει τα επιτρεπτά επίπεδα ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών (Stoulos et al, 2003). Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της γ-φασματοσκοπίας για τη μέτρηση της δόσης που οφείλεται σε εξωτερική έκθεση (ακτίνες-γ). Όσον αφορά στην εσωτερική έκθεση (εισπνοή ραδονίου και θυγατρικών του), τα δείγματα σφραγίστηκαν ερμητικά σε δοχεία και καταγράφηκε η αύξηση της συγκέντρωσης του ραδονίου ως συνάρτηση του χρόνου. Όπως διαπιστώθηκε στην έρευνα αυτή, ο τσιμέντο τύπου Portland (τύπος II) που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα παρουσιάζει εν γένει υψηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας σε σχέση με τις αντίστοιχες διεθνώς τιμές, κυρίως λόγω των υψηλών προσμίξεων σε ιπτάμενη τέφρα (έως 20%). Οι συγκεντρώσεις του ^{232}Th και του ^{40}K σε τούβλα βρέθηκαν υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στο τσιμέντο, ενώ η συγκέντρωση του ^{226}Ra εκτιμάται στα ίδια επίπεδα τόσο στα τούβλα όσο και στο τσιμέντο. Παρά το γεγονός ότι το πορώδες των τούβλων δεν διαφέρει σημαντικά από εκείνο του τσιμέντου, η εκροή ραδονίου από τα τούβλα βρέθηκε χαμηλότερη. Αυτό δείχνει ότι η κύρια πηγή ραδονίου στις οικοδομές είναι το τσιμέντο και όχι τα τούβλα. Η μέση ετήσια δόση στην οποία εκτίθεται ο ελληνικός πληθυσμός εξαιτίας των οικοδομικών υλικών υπολογίζεται στα $0.5mSv\gamma^{-1}$. Η δόση που οφείλεται στο ραδόνιο που εκρέει από τα

οικοδομικά υλικά εκτιμάται στα $3.24 \pm 1.58 \text{Bq m}^{-3} \text{h}^{-1}$ και αντιστοιχεί στο 13 – 30% της ολικής δόσης. Αυτό δείχνει ότι η εξωτερική έκθεση κυριαρχεί έναντι της εσωτερικής.

Στο Σχήμα 2.14 βλέπουμε τα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας που εκπέμπονται από δείγματα τούβλων, τα οποία συλλέχθηκαν από διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις ^{226}Ra και ^{232}Th εμφανίζονται σε περιοχές της Βόρειας Ελλάδας (Μακεδονία και Θράκη), ενώ οι ελάχιστες στη Βορειοδυτική Ελλάδα (Ήπειρος). Από την άλλη πλευρά, το ^{40}K φαίνεται να εμφανίζει μία ομοιόμορφη κατανομή σε όλη τη χώρα. Αξίζει να σημειωθεί πως οι συγκεντρώσεις ^{232}Th και ^{40}K σε δείγματα τούβλων βρέθηκαν υψηλότερες από ότι σε δείγματα τσιμέντου, ενώ η συγκέντρωση του ^{226}Ra βρέθηκε σε παρόμοια επίπεδα στα τούβλα και στο τσιμέντο.

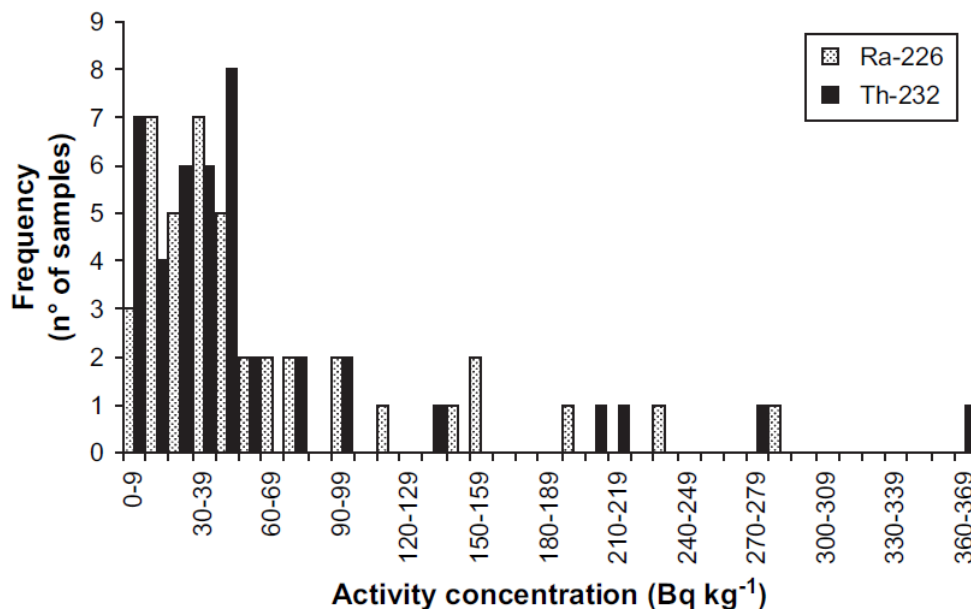


Σχήμα 2.14: Φυσική ραδιενέργεια σε τούβλα, σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας (Stoulos et al, 2003)

2.5.2 Φυσική ραδιενέργεια οικοδομικών υλικών σε διάφορες χώρες ανά τον κόσμο

Στην παράγραφο αυτή παρατίθεται μία σειρά δημοσιεύσεων που αφορούν στη φυσική ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών από όλο τον κόσμο και γίνονται συγκρίσεις της φυσικής ραδιενέργειάς τους κατά χώρα αλλά και κατά υλικό. Σύμφωνα με τη δημοσίευση (Righi and Bruzzi, 2006), στην Ιταλία, αναλύθηκαν σαράντα-δύο δείγματα οικοδομικών υλικών με γ-φασματοσκοπία. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα οικοδομικά υλικά που

προέρχονται από μαγματικά πετρώματα εκπέμπουν υψηλότερη ραδιενέργεια σε σχέση με τα υπόλοιπα οικοδομικά υλικά, ενώ σε πολλά από αυτά τα υλικά οι δείκτες κινδύνου ξεπερνούν τα όρια που θέτει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Συγκεκριμένα, το 25% των δειγμάτων ξεπερνά τα συνιστώμενα όρια, ενώ το 5% ξεπερνά τα ανώτατα όρια, τόσο για εξωτερική όσο και για εσωτερική έκθεση. Σε γενικές γραμμές, πάντως, οι συγκεντρώσεις του ^{226}Ra και του ^{232}Th ήταν αρκετά χαμηλές σε όλα τα δείγματα, με εξαίρεση τα δείγματα που προέρχονται από μαγματικά πετρώματα. Όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 2.15, το μεγαλύτερο πλήθος δειγμάτων περιλαμβάνεται στο εύρος $1 - 100\text{Bqkg}^{-1}$ (83% για το ^{226}Ra και 88% για το ^{232}Th). Μόνο το 4.8% και 9.5% των δειγμάτων υπερέβαιναν σε συγκέντρωση τα 200Bqkg^{-1} , για το ^{226}Ra και το ^{232}Th αντίστοιχα.



Σχήμα 2.15: Κατανομή της ραδιενέργειας στα δείγματα (Righi and Bruzzi, 2006)

Στη Σαουδική Αραβία, προκύπτει ότι όλα τα δείγματα των οικοδομικών υλικών που αναλύθηκαν δεν ξεπερνούν το όριο των 370Bqkg^{-1} (Taher, 2011) και έτσι τα οικοδομικά υλικά που παράγονται στη χώρα μπορούν να εξαιρεθούν από τους περιορισμούς που υπάρχουν για την έκθεση σε γ-ακτινοβολία.

Στην Τουρκία, οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε οικοδομικά υλικά εντοπίστηκαν σε τούβλα ($36.5 \pm 1.8\text{Bqkg}^{-1}$), ενώ οι υψηλότερες ($405.2 \pm 20.9\text{Bqkg}^{-1}$) σε σκυρόδεμα (Baykara et al, 2010). Επιπλέον, το ραδόνιο στο εσωτερικό των κατοικιών μετρήθηκε στα 364.3Bqm^{-3} , τιμή που είναι υψηλότερη συγκριτικά με τον παγκόσμιο μέσο όρο.

Στην Κούβα αναλύθηκαν σαράντα-τέσσερα δείγματα οικοδομικών υλικών στα οποία οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των ραδιοϊσοτόπων ^{40}K , ^{226}Ra και ^{232}Th βρέθηκαν να κυμαίνονται μεταξύ $9 - 857\text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{40}K , $6 - 57\text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{226}Ra και $1.2 - 22\text{Bqkg}^{-1}$ για το ^{232}Th , με τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις για αυτά τα ραδιοϊσότοπα να εντοπίζονται σε δείγματα ξύλου (Flores et al, 2008). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε θάλαμος ιονισμού υψηλής πίεσης για τη μέτρηση της απορροφώμενης δόσης σε 543 κατοικίες και χώρους εργασίας σε πέντε επαρχίες της Κούβας. Οι μέσες τιμές της απορροφώμενης δόσης στον αέρα κυμαίνονται από 43nGyh^{-1} έως 73nGyh^{-1} , ενώ η ετήσια δόση λόγω εξωτερικής έκθεσης σε γ-ακτινοβολία εκτιμάται σε $145 \pm 40\mu\text{Sv}$.

Δέκα είδη οικοδομικών υλικών ελέγχθηκαν ως προς τις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων τους στην Αίγυπτο. Όλες οι συγκεντρώσεις βρίσκονται κάτω από τις παγκόσμιες τυπικές τιμές, με εξαίρεση τα κεραμικά υλικά που τις υπερβαίνουν (Higgy et al, 2000). Οι αυξημένες συγκεντρώσεις στα κεραμικά υλικά οφείλονται στην ύπαρξη του ζirkονίου που προστίθεται στον κρύσταλλο των κεραμικών υλικών και τους προσδίδει τη χαρακτηριστική υφή τους. Το ζirkόνιο, όπως εξορύσσεται, περιέχει $400 - 1000\text{ppm}$ οξειδίων του θορίου και του ουρανίου. Παρόλο που το ποσοστό του ζirkονίου στα κεραμικά υλικά είναι μικρό ($10 - 15\%$ κατά βάρος), είναι δυνατό να δημιουργηθούν ραδιολογικά προβλήματα καθότι τα κεραμικά υλικά καλύπτουν, συνήθως, μεγάλες επιφάνειες κτηρίων.

Σαράντα-οκτώ δείγματα από τη Βραζιλία αναλύθηκαν με γ-φασματοσκοπία. Τα περισσότερα δείγματα που συμμετείχαν στην έρευνα είχαν χαμηλές συγκεντρώσεις ^{226}Ra και ^{232}Th , με γεωμετρικούς μέσους 23.5Bqkg^{-1} και 56.3Bqkg^{-1} για τα ράδιο και θόριο, αντίστοιχα (Malanca et al, 1995).

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση απέδωσε και ένα πλήθος άλλων δημοσιεύσεων, τα αποτελέσματα των οποίων συγκεντρώνονται στον Πίνακα 2.14. Στον πίνακα αυτόν παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K , όπως αυτές μετρήθηκαν σε διάφορες χώρες ανά τον κόσμο και ενδεχομένως, μερικά από αυτά, να έχουν περιληφθεί στη βάση δεδομένων της παραγράφου 2.4. Στην παρούσα παράγραφο δίνονται αναλυτικότερα και σχολιάζονται.

Οι περισσότερες μετρήσεις αφορούν σε δείγματα τσιμέντου (12 χώρες), ενώ οι λιγότερες σε δείγματα γρανίτη (4 χώρες). Αυτό υποδεικνύει την έμφαση που δίνουν οι έρευνες στη ραδιενέργεια που οφείλεται στο τσιμέντο - το δομικό υλικό που χρησιμοποιείται σε πολύ μεγάλες ποσότητες στην κατοικία. Με τη βοήθεια του Πίνακα 2.15 μπορούμε να συγκρίνουμε τις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων σε επιλεγμένα οικοδομικά υλικά, σε αρκετές χώρες του πλανήτη.

Οικοδομικά Υλικά	Χώρες	Συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων ($Bqkg^{-1}$)			Αναφορές
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Τσιμέντο τύπου Portland	Ελλάδα I	88 ± 59	21.5 ± 8.5	251.5 ± 79.5	Louizi et al, 1995
	Ελλάδα II	20 ± 5	13 ± 3	247 ± 68	Stoulos et al, 2003
	Ελλάδα III	92 ± 33	31 ± 10	310 ± 60	Stoulos et al, 2003
	Τουρκία	24.7 ± 1.6	20.7 ± 1.5	2493.1 ± 78.9	Baykara et al, 2010
	Ιταλία	18 ± 2	12.3 ± 1.5	230 ± 20	Righi & Bruzzi, 2006
	Αίγυπτος	19.2 ± 2.2	7.5 ± 2.1	45.8 ± 9.9	Higgy et al, 2000
	Κούβα	23 ± 7	11 ± 3	467 ± 85	Flores et al, 2008
	Σ. Αραβία	38.4 ± 3.8	45.3 ± 1.2	86 ± 4	El-Taher, 2011
	Ινδία	9.4	40.9	33.1	Kumar et al, 2003
	Κίνα	19.2 ± 3.4	18.9 ± 4.0	127 ± 28.1	Yu, 1991
	Βραζιλία	21.9 ± 6.7	25.3	42	Malanca et al, 1995
	Ζάμπια	23 ± 2	32 ± 3	134 ± 13	Hayumbu et al, 1994
	Αλγερία	41 ± 7	27 ± 3	422 ± 3	Amrani & Tahtat, 2000
Τυνησία	33 ± 2	-	158 ± 7	Hizem et al, 2005	
Άμμος	Ελλάδα I	2.5 ± 1.5	2 ± 1	19 ± 18	Louizi et al, 1995
	Ελλάδα II	18 ± 7	17 ± 10	367 ± 204	Stoulos et al, 2003
	Τουρκία	14.6 ± 1.1	16.8 ± 1.2	885 ± 43.5	Baykara et al, 2010
	Ιταλία	13.6 ± 1.2	12.8 ± 1.2	230 ± 20	Righi & Bruzzi, 2006
	Αίγυπτος	15.1 ± 1.9	5.0 ± 1.7	48.9 ± 10.1	Higgy et al, 2000
	Κούβα	17 ± 4	16 ± 6	208 ± 104	Flores et al, 2008
	Σ. Αραβία	12.3 ± 1.4	19.7 ± 1.5	260 ± 5	El-Taher, 2011
	Ινδία	9.4	52.6	70.5	Kumar et al, 2003
	Κίνα	24.3 ± 4.9	27.1 ± 3.8	842 ± 521	Yu, 1991
	Βραζιλία	10.2 ± 6.3	12.6	51 ± 1	Malanca et al, 1995
	Ζάμπια	25 ± 1	26 ± 2	714 ± 17	Hayumbu et al, 1994
	Αλγερία	12 ± 1	7 ± 1	74 ± 7	Amrani & Tahtat, 2000
	Τυνησία	11 ± 0.7	-	68 ± 3.5	Hizem et al, 2005
Τούβλα	Ελλάδα I	38 ± 10	46.5 ± 9.5	811 ± 84	Louizi et al, 1995
	Ελλάδα II	35 ± 11	45 ± 15	710 ± 165	Stoulos et al, 2003
	Τουρκία	15.7 ± 1.1	3.8 ± 0.9	201.4 ± 4.4	Baykara et al, 2010
	Ιταλία	32 ± 3	39 ± 3	530 ± 50	Righi & Bruzzi, 2006
	Αίγυπτος	31.5 ± 2.9	25.5 ± 4.0	298 ± 25	Higgy et al, 2000
	Κούβα	57 ± 16	12 ± 10	857 ± 759	Flores et al, 2008
	Ινδία	23.4	14.0	38.7	Kumar et al, 2003
	Κίνα	143 ± 87.5	158 ± 46.5	850 ± 247	Yu, 1991
	Βραζιλία	46.8 ± 19.4	119.9 ± 110.6	322 ± 152	Malanca et al, 1995
	Ζάμπια	32 ± 2	81 ± 7	412 ± 19	Hayumbu et al, 1994
	Αλγερία	47 ± 6	35 ± 4	425 ± 3	Amrani & Tahtat, 2000
	Τυνησία	39 ± 2.2	-	652 ± 26	Hizem et al, 2005
	Χαλίκια	Ελλάδα	11 ± 7	12 ± 11	140 ± 98	Stoulos et al, 2003
Κούβα		20 ± 3	13 ± 9	134 ± 70	Flores et al, 2008
Σ. Αραβία		14.7 ± 1.3	24.2 ± 1.7	195 ± 6	El-Taher, 2011
Αλγερία		24 ± 3	10 ± 1	259 ± 2	Amrani & Tahtat, 2000
Τυνησία		22 ± 1.3	-	74 ± 4	Hizem et al, 2005
Γρανίτες	Ελλάδα	67 ± 57	95 ± 98	1200 ± 650	Stoulos et al, 2003
	Ιταλία	57 ± 5	49 ± 4	560 ± 50	Righi & Bruzzi, 2006
	Σ. Αραβία	23 ± 1.4	30.0 ± 0.4	340 ± 6.7	El-Taher, 2011
	Τυνησία	27 ± 1.5	-	1215 ± 49	Hizem et al, 2005
Μάρμαρα	Ελλάδα	-	-	13 ± 12	Louizi et al, 1995
	Τουρκία	114.1 ± 2.4	20.3 ± 1.3	1413.6 ± 40.7	Baykara et al, 2010
	Αίγυπτος	11.8 ± 1.0	4.5 ± 0.6	18.8 ± 2.6	Higgy et al, 2000
	Σ. Αραβία	12.7 ± 3.4	13.2 ± 1.4	64 ± 3	El-Taher, 2011
	Αλγερία	23 ± 2	18 ± 2	310 ± 3	Amrani & Tahtat, 2000
Τυνησία	26 ± 1.5	-	73 ± 4	Hizem et al, 2005	
Κεραμικά	Ελλάδα	58	46	409	Louizi et al, 1995
	Ιταλία I	48 ± 4	42 ± 4	460 ± 40	Righi & Bruzzi, 2006
	Ιταλία II	56 ± 5	43 ± 4	440 ± 40	Righi & Bruzzi, 2006
	Αίγυπτος	81.6 ± 5.0	55.0 ± 3.4	254 ± 14	Higgy et al, 2000
	Ινδία	28.2	63.7	24.3	Kumar et al, 2003
	Αλγερία	55 ± 5	41 ± 4	410 ± 4	Amrani & Tahtat, 2000

Πίνακας 2.15: Συγκεντρωτικός πίνακας ραδιενέργειας οικοδομικών υλικών σε διάφορες χώρες

Όπως φαίνεται και στον πίνακα, οι συγκεντρώσεις εμφανίζουν σημαντική κύμανση από χώρα σε χώρα, καθώς εξαρτώνται από τη γεωλογική σύσταση των εδαφών από τα οποία συλλέγεται η πρώτη ύλη, καθώς και από τα επιμέρους γεωχημικά χαρακτηριστικά των υλικών. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι οι συγκεντρώσεις αυτές δεν αντιπροσωπεύουν οπωσδήποτε τις χώρες που αναφέρονται στον πίνακα και στις οποίες χρησιμοποιούνται αυτά τα οικοδομικά υλικά στις κατασκευές, αλλά τις χώρες παραγωγής των οικοδομικών υλικών από τις οποίες συλλέχθηκαν τα δείγματα. Σε αρκετές περιπτώσεις, πάντως, η χώρα παραγωγής είναι ίδια με τη χώρα κατανάλωσης, όμως αυτή η πληροφορία δεν είναι πάντα διαθέσιμη στα άρθρα που μελετήθηκαν. Ένα ακόμα σημείο που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι τα ραδιοϊσότοπα του ραδίου, του θορίου και του καλίου δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στις πρώτες ύλες (χώμα και αδρανή υλικά), από τις οποίες παράγονται τα οικοδομικά υλικά, οπότε και οι συγκεντρώσεις τους διαφέρουν από δείγμα σε δείγμα. Για αυτό το λόγο, οι αναφερόμενες τιμές στον Πίνακα 2.15 αποτελούν μέσες τιμές και στην πλειονότητα των περιπτώσεων συνοδεύονται από την αντίστοιχη στατιστική αβεβαιότητα.

2.6 Φυσική ραδιενέργεια σε υλικά επικάλυψης

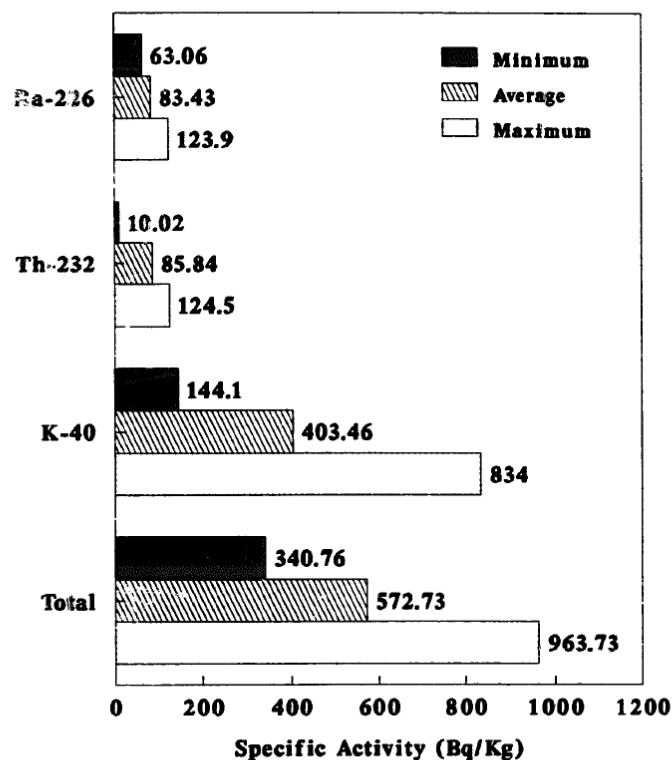
Τα οικοδομικά υλικά που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενες παραγράφους χρησιμοποιούνται συνήθως στην οικοδομή σε μεγάλες ποσότητες. Στην παράγραφο αυτή θα εξετασθούν, ειδικότερα, υλικά τα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη τοίχων και πατωμάτων, όπως: κεραμικά, γρανίτες και μάρμαρα. Εξαιτίας της στιλπνής τους επιφάνειας, αλλά και της ποικιλίας σε χρωματισμούς, χρησιμοποιούνται ευρέως για επένδυση δαπέδων στις κατοικίες, ενώ, σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται (κυρίως τα κεραμικά) και ως υλικά επικάλυψης σε κουζίνες και μπάνια, προστατεύοντας παράλληλα τους τοίχους από την υγρασία.

Οι πρώτες ύλες για την παραγωγή των κεραμικών προέρχονται από υλικά που βρίσκονται στο έδαφος, τα οποία περιέχουν ίχνη (τάξη μεγέθους ppm) φυσικών ραδιοϊσοτόπων (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K). Όσον αφορά στο κάλιο που είναι κατανομημένο στο έδαφος, βάσει της ισοτοπικής του σύστασης, αποτελείται κατά 0.018% από το ραδιενεργό ισότοπο ^{40}K . Τα επίπεδα της φυσικής ραδιενέργειας που περιέχεται στα κεραμικά υλικά εξαρτώνται κυρίως από τη γεωλογία της περιοχής από την οποία συλλέχθηκε η πρώτη ύλη, ενώ, υπάρχουν ορισμένα προϊόντα κεραμικών τα οποία έχουν σκοπίμως εμπλουτιστεί σε οξείδια του

θορίου και του ουρανίου, για τη βελτίωση ορισμένων ιδιοτήτων τους. Συγκεκριμένα, σε πολλές περιπτώσεις, προστίθεται στον κρύσταλλο των κεραμικών υλικών ζιρκόνιο, το οποίο τους προσδίδει τη χαρακτηριστική στιλπνή υφή τους. Παρόλο που το ποσοστό του ζιρκονίου στα κεραμικά υλικά είναι μικρό (10 – 15% κατά βάρος), είναι δυνατό να δημιουργήσει ραδιολογικά προβλήματα καθότι τα κεραμικά υλικά καλύπτουν, συνήθως, μεγάλες επιφάνειες κτηρίων.

2.6.1 Φυσική ραδιενέργεια σε δείγματα κεραμικών

Ορισμένα δείγματα κεραμικών εξετάστηκαν ως προς τα επίπεδα της φυσικής ραδιενέργειας, με χρήση γ - φασματοσκοπίας, στο Πακιστάν (Tufail et al, 1992). Τα αποτελέσματα, όσον αφορά στις συγκεντρώσεις ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K φαίνονται στο Σχήμα 2.16. Η μεγάλη κύμανση στις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων που διαπιστώνεται, οφείλεται στις διαφορετικές γεωλογικές προελεύσεις των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των κεραμικών υλικών.



Σχήμα 2.16: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές ραδιοϊσοτόπων στα κεραμικά (Tufail et al, 1992)

Για την εκτίμηση των ραδιολογικών κινδύνων, λαμβάνονται υπόψη, συνήθως, οι μέγιστες τιμές των συγκεντρώσεων των ραδιοϊσοτόπων και με βάση αυτές υπολογίζονται οι αντίστοιχοι δείκτες. Σε όλα τα δείγματα κεραμικών που συμμετείχαν στη μελέτη (Tufail et al, 1992), όλοι οι δείκτες ήταν μικρότεροι της μονάδας.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το ζirkόνιο προστίθεται στα κεραμικά προσδίδοντάς τους τη χαρακτηριστική στιλπνότητα και το επιθυμητό χρώμα στο εφυάλωμα. Στην Ιταλία, το μεγαλύτερο μέρος από τις εξορύξεις ζirkονίου καλύπτει την εθνική ζήτηση και εκτιμάται ότι γύρω στους 60ktons ζirkονίου καταναλώνονται στη βιομηχανία κεραμικών κάθε χρόνο. Επειδή, γενικά, το ζirkόνιο, όπως εξορύσσεται, χαρακτηρίζεται από υψηλές συγκεντρώσεις φυσικών ραδιοϊσοτόπων, εξετάστηκε το ενδεχόμενο ύπαρξης ραδιολογικών κινδύνων από τη χρήση του ζirkονίου στην ιταλική βιομηχανία κεραμικών (Bruzzi et al, 2000).

Στον Πίνακα 2.16 φαίνονται οι συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων για δύο δείγματα πλακιδίων, ένα δείγμα πορσελάνης και δύο δείγματα πηλού. Οι συγκεντρώσεις χαρακτηρίζονται σχετικά χαμηλές, κάτι που επιβεβαιώνει το γεγονός ότι τα κεραμικά περιέχουν μόνο μικρές ποσότητες ζirkονίου και για αυτό δεν αποτελούν μεγάλο παράγοντα ραδιολογικού κινδύνου. Πάντως, οι συγκεντρώσεις ^{238}U είναι μεγαλύτερες στα δείγματα πηλού σε σχέση με τα δείγματα πλακιδίων.

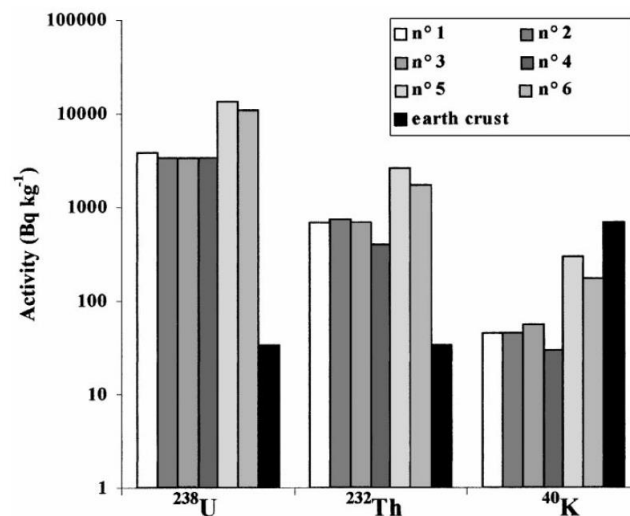
Υλικά	Πυκνότητα (kgm^{-3})	Συγκεντρώσεις (Bqkg^{-1})		
		^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Πλακάκι 1	1591	79±3	66±3	890±38
Πλακάκι 2	1495	58±2	52±2	830±35
Πορσελάνη	1628	50±2	59±2	520±22
Πηλός 1	968	116±5	45±2	320±14
Πηλός 2	956	193±8	62±3	330±15

Πίνακας 2.16: Συγκεντρώσεις δειγμάτων πλακιδίων, πορσελάνης, πηλού (Bruzzi et al, 2000)

Τα Σχήματα 2.17 και 2.18 δείχνουν μία σύγκριση μεταξύ των συγκεντρώσεων των ραδιοϊσοτόπων που περιέχονται σε συνολικά έντεκα δείγματα κεραμικών και πηλού και των συγκεντρώσεων των ραδιοϊσοτόπων στο έδαφος.

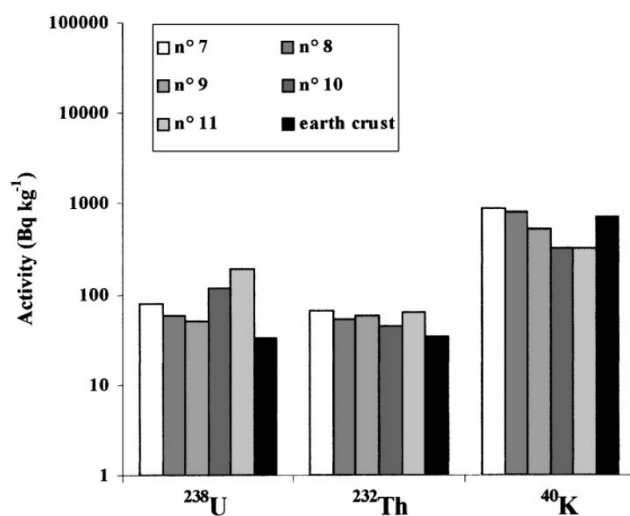
Για τα δείγματα του Σχήματος 2.17 που είναι κυρίως δείγματα ζirkονικής άμμου παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις του ουρανίου είναι σχεδόν διπλάσιες σε σχέση με τις συγκεντρώσεις του θορίου (λογαριθμική κλίμακα), ενώ το κάλιο είναι πολύ χαμηλότερα. Σε σχέση με το έδαφος, το ουράνιο και το θόριο έχουν έως και 100 φορές υψηλότερη

συγκέντρωση, ενώ η συγκέντρωση του καλίου στο έδαφος υπερβαίνει αυτή των δειγμάτων. Για αυτό το λόγο, τα υλικά που περιέχουν ζirkόνιο και χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κεραμικών, κατατάσσονται στα TENORM υλικά.



Σχήμα 2.17: Σύγκριση επιπέδων ραδιενέργειας δειγμάτων ζirkονικής άμμου και εδάφους (Bruzzi et al, 2000)

Από την άλλη πλευρά, στο Σχήμα 2.18 φαίνονται οι συγκεντρώσεις δειγμάτων κοινών πλακιδίων καθώς και οι συγκεντρώσεις στο έδαφος. Παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις ουρανίου και θορίου στα δείγματα είναι ελάχιστα μεγαλύτερες από ότι στο έδαφος, ενώ όσον αφορά στο κάλιο βρίσκονται στα ίδια, πρακτικά, επίπεδα.



Σχήμα 2.18: Σύγκριση επιπέδων ραδιενέργειας δειγμάτων κεραμικών πλακιδίων και εδάφους (Bruzzi et al, 2000)

2.6.2 Φυσική ραδιενέργεια σε δείγματα γρανίτη

Σε πολλές περιπτώσεις, κυρίως για τη διακόσμηση των κτηρίων, χρησιμοποιούνται και διάφοροι τύποι γρανιτών. Οι γρανίτες (πυριγενή πετρώματα) περιέχουν σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες ^{238}U και ^{232}Th , συγκριτικά με τις μέσες συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων στο φλοιό της Γης.

Δεκαέξι είδη από διαφορετικούς γρανίτες, που εισήχθησαν στην Ελλάδα κυρίως από την Ισπανία και τη Βραζιλία, ελέγχθηκαν για τα επίπεδα της ραδιενέργειας που εκπέμπουν, χρησιμοποιώντας τεχνικές γ-φασματοσκοπίας (Pavlidou et al, 2006). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 2.17.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 2.17 και όσον αφορά στα ραδιοϊσότοπα ^{238}U και ^{226}Ra , τα δείγματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες: τα δείγματα Africa Nero, Yellow Cecilia, Napoleon, Multicolour, Zimbabwe, Marina Pearl και Torazio που έχουν ραδιενέργεια χαμηλότερη από τα συνήθη δείγματα χρώματος και μάλιστα χαμηλότερη και από την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (EAP), τα δείγματα Blanco Real, African Red, Salvatierra, Blanco Crystal και Balmoral που εμφανίζουν συγκεντρώσεις υψηλότερες από το διπλάσιο των συνήθων συγκεντρώσεων χρώματος, με τις συγκεντρώσεις των δύο τελευταίων δειγμάτων να είναι εξαιρετικά υψηλές (163 και 174Bqkg^{-1} , αντίστοιχα) και, τέλος, τα υπόλοιπα δείγματα που εμφανίζουν ενδιάμεσες συγκεντρώσεις ^{238}U και ^{226}Ra .

Όσον αφορά στο ^{232}Th , σε δύο από τα δείγματα (Africa Nero και Yellow Cecilia) βρίσκεται χαμηλότερα από την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια (EAP), ενώ τα δείγματα Blanco Crystal, Blanco Real, Rosa Porrino, African Red και Balmoral εμφανίζουν συγκεντρώσεις υψηλότερες από το διπλάσιο των συνήθων συγκεντρώσεων χρώματος ($91 - 354\text{Bqkg}^{-1}$).

Σχετικά με τις συγκεντρώσεις του ^{40}K , βρίσκονται εν γένει σε υψηλά επίπεδα. Μόνο τα δείγματα Africa Nero και Zimbabwe έχουν συγκεντρώσεις ^{40}K χαμηλότερες από τις συγκεντρώσεις συνήθων δειγμάτων χρώματος, ενώ τα υπόλοιπα δείγματα εμφανίζουν συγκεντρώσεις δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερες από τις συνήθεις συγκεντρώσεις χρώματος.

Οι μέσες συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων για τα γρανιτικά δείγματα αυτής της μελέτης (Pavlidou et al, 2006) συγκρίθηκαν με βιβλιογραφικές τιμές γρανιτών καθώς και άλλων οικοδομικών υλικών. Όπως διαπιστώθηκε, οι συγκεντρώσεις των γρανιτικών δειγμάτων αυτής της μελέτης είναι γενικά πολύ υψηλές, το ίδιο συμβαίνει όμως και με όλα τα γρανιτικά πετρώματα της βιβλιογραφίας.

Γρανίτης	Συγκεντρώσεις ($Bqkg^{-1}$)			
	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Salvatierra	115±9	118±2	77±2	1320±33
Rosa Porrino	61±5	59±1	109±2	1420±36
Blanco Real	96±5	117±1	95±1	1233±30
Topazio	32±5	29±1	44±1	1327±33
Yellow Cecilia	<EAP	19±1	30±1	1020±26
Blanco Crystal	163±9	163±2	91±2	1190±30
Napoleon	<EAP	11±2	46±1	1200±30
Balmoral	174±7	170±1	354±3	1592±39
African Red	98±5	80±1	121±1	1421±32
Multicolour	<EAP	11±1	84±2	926±23
Baltic Brown	64±6	60±1	57±1	1350±34
Gris Perla	67±5	70±1	43±1	1340±34
Emerald	50±4	55±1	63±1	1053±24
Marina Pearl	29±3	35±1	37±1	894±22
Zimbabwe	19±4	20±1	32±1	332±14
Africa Nero	<EAP	1.6±0.3	<EAP	49±4
Σύνηθες Χώμα	35	35	30	400
Μέση Τιμή	61	64	81	1104
Τυπική Απόκλιση	56	53	79	407
Εύρος	<EAP-174	2-170	<EAP-354	49-1592
Ελάχιστα Ανιχνεύσιμη Ραδιενέργεια (EAP)	9	1	2	12

Πίνακας 2.17: Συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων για γρανιτικά δείγματα (Pavlidou et al, 2006)

Προκειμένου να ελεγχθούν οι ραδιολογικές επιπτώσεις των γρανιτών που χρησιμοποιούνται ως οικοδομικά υλικά και να υπολογιστεί η ετήσια απορροφώμενη δόση, χρησιμοποιήθηκε (Pavlidou et al, 2006) το Standard Room Model ($3m \times 3m \times 3m$, απειροστά λεπτοί τοίχοι, όχι πόρτες ή παράθυρα). Ο ρυθμός δόσης υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$D_a(nGyh^{-1}) = a_1 C_{^{40}K} + a_2 C_{^{232}Th} + a_3 C_{^{226}Ra} \quad (2.30)$$

όπου $C_{^{40}K}$, $C_{^{232}Th}$, $C_{^{226}Ra}$ οι συγκεντρώσεις των ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , αντίστοιχα, σε $Bqkg^{-1}$, ενώ οι συντελεστές a_i είναι: $a_1 = 0.0414nGyh^{-1}/Bqkg^{-1}$, $a_2 = 0.623nGyh^{-1}/Bqkg^{-1}$ και $a_3 = 0.461nGyh^{-1}/Bqkg^{-1}$.

Με βάση τα αποτελέσματα της Σχέσης (2.30) σχηματίστηκε ο Πίνακας 2.18, στο οποίο φαίνονται ο ρυθμός απορροφώμενης δόσης D_a ($nGyh^{-1}$) και η ετήσια ενεργός δόση H_E (mSv). Συμπεραίνεται ότι ο ρυθμός δόσης που δέχεται ο πληθυσμός που διαμένει σε κατοικίες που είναι κατασκευασμένες από τα γρανιτικά πετρώματα που εξετάστηκαν (Pavlidou et al, 2006) είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό δόσης που οφείλεται στα συνήθη οικοδομικά υλικά, με εξαίρεση τα γρανιτικά πετρώματα Zimbabwe και Africa Nero. Αυτά τα δύο δείγματα παρεκκλίνουν από τη συνήθη γρανιτική σύνθεση και δίνουν χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας, χαμηλότερα ακόμα και από τη ραδιενέργεια δειγμάτων χώματος, για όλα τα ραδιοϊσότοπα. Η ετήσια ενεργός δόση έξι γρανιτικών δειγμάτων ξεπερνά το όριο του $1mSv$. Αυτά τα έξι δείγματα είναι τα ακόλουθα: Rosa Porrino, Salvatierra, Blanco Real, African Red, Blanco Crystal και Blamoral.

Γρανίτης	Ρυθμός Δόσης D_a ($nGyh^{-1}$)	Ετήσια Ενεργός Δόση H_E (mSv)
Salvatierra	157.0	1.4
Rosa Porrino	153.9	1.4
Blanco Real	164.2	1.4
Topazio	95.7	0.8
Yellow Cecilia	69.7	0.6
Blanco Crystal	181.1	1.6
Napoleon	83.4	0.7
Balmoral	364.8	3.2
African Red	171.1	1.5
Multicolour	95.7	0.8
Baltic Brown	119.1	1.0
Gris Perla	114.5	1.0
Emerald	108.2	1.0
Marina Pearl	76.2	0.7
Zimbabwe	42.9	0.4
Africa Nero	2.8	0.0
Έδαφος	51.0	0.4

Πίνακας 2.18: Ρυθμός δόσης, Ετήσια ενεργός δόση και Δείκτης για γρανιτικά δείγματα (Pavlidou et al, 2006)

Πάντως, αξίζει να σημειωθεί πως επειδή οι γρανίτες χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες στην κατασκευή κατοικιών, η συνεισφορά τους στη συνολική δόση είναι μικρή και το

κριτήριο δόσης του $1mSv\gamma^{-1}$, για το σύνολο των οικοδομικών υλικών στις κατοικίες αυτές, αναμένεται να ικανοποιείται.

2.6.3 Φυσική ραδιενέργεια σε δείγματα μαρμάρου – Σύγκριση με δείγματα γρανίτη

Ένα άλλο υλικό που τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο, τόσο για επικάλυψη όσο και για διακόσμηση, είναι το μάρμαρο. Ακόμα και σε ανακαινίσεις παλαιών κατοικιών, σε πολλές περιπτώσεις τα παλιά πλακάκια αντικαθίστανται από νέα μάρμαρα. Η παρουσία διαφόρων ορυκτών στα κοιτάσματα μαρμάρων τους προσδίδει μία μεγάλη ποικιλία χρωμάτων. Επιπλέον, τα μάρμαρα είναι λιγότερο σκληρά από τους γρανίτες, με αποτέλεσμα να απαιτούνται λιγότερο ανθεκτικά εργαλεία για τη διαχείρισή τους (κόψιμο, λείανση).

Τριάντα-επτά είδη μαρμάρων καθώς και είκοσι είδη γρανιτών, σε συνολικά πάνω από εξήντα δείγματα, συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας στην περιοχή Riyadh της Σαουδικής Αραβίας (Al-Saleh and Al-Berzan, 2007). Τα δείγματα αυτά προέρχονται είτε από την τοπική αγορά πετρωμάτων είτε εισάγονται από το εξωτερικό. Οι Πίνακες 2.19 και 2.20 παρουσιάζουν τις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K στα δείγματα γρανιτών και μαρμάρων, αντίστοιχα (Al-Saleh and Al-Berzan, 2007).

Εμπορική ονομασία	Προέλευση	Συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων ($Bqkg^{-1}$)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Salmon	Saudi	27.3 ± 0.5	41.9 ± 0.4	1484.9 ± 0.1
Bianco sardo	Saudi	51.1 ± 0.9	49.1 ± 0.5	1379.0 ± 0.9
Sweet gold	Saudi	0.82 ± 0.05	0.56 ± 0.02	12.3 ± 0.9
Najran brown	Saudi	0.1 ± 0.03	0.1 ± 0.03	0.91 ± 0.08
Saudi brown	Saudi	0.06 ± 0.01	0.31 ± 0.09	0.48 ± 0.04
Saudi green	Saudi	0.05 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.44 ± 0.04
Royal gold	Saudi	0.06 ± 0.03	0.02 ± 0.01	0.28 ± 0.03
Spring green	Saudi	0.03 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.51 ± 0.05
Yezoa osoloto	India	2.6 ± 0.1	3.1 ± 0.3	102.2 ± 0.7
Robe	India	44.1 ± 0.8	66.7 ± 0.7	1382.3 ± 0.9
Rosa beta	China	37.1 ± 0.7	73.1 ± 0.7	1226.3 ± 0.8
Rosa beta	Italy	18.2 ± 0.23	32.0 ± 0.3	897.1 ± 0.6
Carmen red	Italy	56.1 ± 0.1	44.6 ± 0.4	1531.7 ± 0.1
Lebrado square	Italy	46.1 ± 0.9	48.1 ± 0.5	1267.8 ± 0.8
Rosa yoryeno	Italy-Spain	48.8 ± 0.9	85.1 ± 0.9	1413.1 ± 0.9
Karara	Turkey	0.06 ± 0.03	0.13 ± 0.07	1.1 ± 0.1
Rosa entema	Portugal	0.07 ± 0.04	0.02 ± 0.01	1.3 ± 0.1
Azoles bahea	Brazil	147.0 ± 0.3	186.4 ± 0.2	1194.1 ± 0.7
Bradezio (grey)	Brazil	0.25 ± 0.3	3.0 ± 0.5	13.0 ± 0.5

Πίνακας 2.19: Συγκεντρώσεις σε δείγματα γρανιτών (Al-Saleh and Al-Berzan, 2007)

Εμπορική ονομασία	Προέλευση	Συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων ($Bqkg^{-1}$)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Marble	Saudi	12.0 ± 0.2	1.7 ± 0.1	23.1 ± 0.1
Cream marvel	Iran	8.5 ± 0.2	0.18 ± 0.05	3.3 ± 0.1
Guatemala (green)	India	18.2 ± 0.1	32.0 ± 0.1	897.1 ± 0.1
Guatemala (grey)	India	0.36 ± 0.06	0.22 ± 0.03	3.7 ± 0.1
Golden camel	Pakistan	16.3 ± 0.3	0.87 ± 0.11	7.9 ± 0.1
Karara	Italy	2.3 ± 0.1	0.19 ± 0.05	6.0 ± 0.1
Karara (pure)	Italy	1.7 ± 0.1	0.32 ± 0.05	6.0 ± 0.1
Cecelia perlato	Italy	0.87 ± 0.06	0.1 ± 0.03	7.5 ± 0.1
Paly sandro clasico	Italy	6.2 ± 0.1	0.79 ± 0.07	44.0 ± 0.1
Paly sandro (grey)	Italy	4.5 ± 0.2	0.56 ± 0.05	0.68 ± 0.05
Fir de entco	Italy	2.0 ± 0.08	2.3 ± 0.2	70.5 ± 0.4
Rosa lorca	Italy	0.62 ± 0.07	0.74 ± 0.09	10.8 ± 0.1
Gallo royal	Italy	9.1 ± 0.2	2.9 ± 0.3	74.2 ± 0.5
Yellow broctal	Italy	4.4 ± 0.1	2.0 ± 0.01	2.5 ± 0.1
Krefenento notch	Italy	1.3 ± 0.1	1.7 ± 0.2	23.1 ± 0.2
Red Krefenento	Italy	1.3 ± 0.1	0.19 ± 0.03	2.1 ± 0.1
Brachia damascata	Italy	5.0 ± 0.1	0.44 ± 0.07	23.4 ± 0.2
Brachia	Italy	1.0 ± 0.1	0.23 ± 0.04	6.1 ± 0.1
Black Marconi a	Italy	19.8 ± 0.4	0.28 ± 0.06	8.4 ± 0.1
Sheboleno	Italy	2.6 ± 0.1	3.7 ± 0.4	154.5 ± 0.1
Esttoaryo	Italy	2.9 ± 0.1	0.16 ± 0.04	6.2 ± 0.1
Rosa	Portugal	0.65 ± 0.06	0.75 ± 0.08	39.5 ± 0.3
White mola	Turkey	0.97 ± 0.07	0.29 ± 0.05	3.5 ± 0.1
Afeon shegar	Turkey	0.43 ± 0.06	0.25 ± 0.04	2.9 ± 0.1
Russo lefanto	Turkey	4.8 ± 0.1	0.22 ± 0.06	1.2 ± 0.1
Bianco Rosa	Turkey	0.96 ± 0.07	0.14 ± 0.04	1.2 ± 0.1
Crystal	Greece	0.44 ± 0.06	0.46 ± 0.07	1.6 ± 0.1
Bocshyaro	Spain	7.4 ± 0.1	0.31 ± 0.05	4.3 ± 0.1
Russo basin	Spain	4.5 ± 0.1	1.4 ± 0.1	17.8 ± 0.1
Red fetcano	Spain	2.2 ± 0.1	5.0 ± 0.5	116.2 ± 0.8
Emparo oro	Spain	9.3 ± 0.2	1.3 ± 0.1	18.7 ± 0.1
Russo elicanty	Spain	0.62 ± 0.06	0.95 ± 0.11	25.6 ± 0.2
Cream marvel	Spain	4.5 ± 0.1	0.41 ± 0.06	5.2 ± 0.1
Light Emprado	Spain	32.4 ± 0.6	0.99 ± 0.12	16.4 ± 0.2
Azoles makoba	Brazil	2.3 ± 0.1	22.8 ± 0.2	401.8 ± 0.3
Yellow sena	France	1.1 ± 0.1	0.86 ± 0.1	39.1 ± 0.1
Silvia (yellow) sand	Egypt	6.9 ± 0.1	0.48 ± 0.02	1.3 ± 0.1

Πίνακας 2.20: Συγκεντρώσεις σε δείγματα μαρμάρων (Al-Saleh and Al-Berzan, 2007)

Όπως φαίνεται στους παραπάνω πίνακες, οι συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K στα δείγματα μαρμάρων κυμαίνονται ως εξής: για το ^{226}Ra μεταξύ $0.36 \pm 0.06 Bqkg^{-1}$ και $32.4 \pm 0.6 Bqkg^{-1}$, για το ^{232}Th μεταξύ $0.10 \pm 0.03 Bqkg^{-1}$ και $32.0 \pm 0.1 Bqkg^{-1}$, ενώ για το ^{40}K μεταξύ $0.68 \pm 0.05 Bqkg^{-1}$ και $897.1 \pm 0.1 Bqkg^{-1}$, ενώ όσον αφορά στα δείγματα γρανιτών, οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις κυμαίνονται ως εξής: για το ^{226}Ra μεταξύ $0.03 \pm 0.01 Bqkg^{-1}$ και $147.0 \pm 0.3 Bqkg^{-1}$, για το ^{232}Th μεταξύ $0.02 \pm 0.01 Bqkg^{-1}$ και $186.4 \pm 0.2 Bqkg^{-1}$, ενώ για το ^{40}K μεταξύ $0.28 \pm 0.03 Bqkg^{-1}$ και $1531.7 \pm 0.1 Bqkg^{-1}$.

3 Εκτίμηση της δοσιμετρικής κατανομής μέσα σε δωμάτιο, με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte – Carlo

3.1 Εισαγωγή

Ήδη από το 17^ο αιώνα, το πείραμα έχει καθιερωθεί ως ο μεγαλύτερος κριτής της επιστημονικής σκέψης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όμως, το πείραμα δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί εξαιτίας τεχνικών δυσκολιών που μπορεί να έχει η υλοποίησή του ή, τελικά, πραγματοποιείται καταφεύγοντας σε αρκετές παραδοχές και απλουστεύσεις. Με την ανάπτυξη των υπολογιστών έγινε δυνατή η εκτέλεση προσομοιώσεων, όπου η “πειραματική διαδικασία” πραγματοποιείται εικονικά, κάτω από “ιδανικές συνθήκες”, παρακάμπτοντας με αυτόν τον τρόπο τις δυσκολίες που έχει η εκτέλεση του πειράματος με τον “κλασικό” τρόπο.

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι υπολογιστές έδωσαν τη δυνατότητα στους επιστήμονες όχι μόνο να αναπτύξουν νέα μοντέλα για την περιγραφή των φαινομένων της φύσης, αλλά και να καταλήξουν σε αποδεκτά αποτελέσματα χωρίς να κάνουν σημαντικές παραδοχές. Επιπλέον, η ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής ισχύος καθώς και η ολοένα και μεγαλύτερη δυνατότητα πρόσβασης του πληθυσμού στην τεχνολογία, συντέλεσαν στη δημιουργία νέων προγραμμάτων προσομοίωσης καθώς και στη βελτιστοποίηση των ήδη υπάρχοντων. Η προσομοίωση έχει γίνει πλέον ένας νέος τρόπος έρευνας· σε ορισμένες περιπτώσεις, παρέχει τη θεωρητική βάση για την κατανόηση των πειραματικών αποτελεσμάτων, ενώ σε ορισμένες άλλες, παρέχει “πειραματικά” δεδομένα για την επαλήθευση ή όχι της θεωρίας.

Επιπλέον, υπάρχουν πολλά παραδείγματα όπου η άμεση σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών μεθόδων της θεωρίας και του πειράματος δεν δίνει πειστικά συμπεράσματα. Οι αναλυτικές μέθοδοι επίλυσης ενός προβλήματος καταφεύγουν συχνά σε απλουστεύσεις, των οποίων η εγκυρότητα είναι δύσκολο να ελεγχθεί. Κατά συνέπεια, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί αν οι αποκλίσεις μεταξύ θεωρίας και πειράματος αποδίδονται σε αδυναμία της θεωρίας, στις απλουστεύσεις ή και στα δύο. Αυτό αναδεικνύει, επίσης, τη σημαντικότητα της προσομοίωσης.

Με την προσομοίωση Monte Carlo² επιχειρείται η πρόβλεψη της εξέλιξης ενός συστήματος χωρίς τη χρήση αναλυτικών μεθόδων και αιτιοκρατικών νόμων. Το πρόβλημα προσεγγίζεται με έναν καθαρά στοχαστικό τρόπο, ο οποίος βασίζεται σε μία ακολουθία “τυχαίων” αριθμών οι οποίοι παράγονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Το εύρος των διαφορετικών φυσικών προβλημάτων και φαινομένων που μπορεί να διερευνηθεί χρησιμοποιώντας μεθόδους Monte Carlo είναι εξαιρετικά ευρύ: προβλήματα αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας – ύλης, προβλήματα ροών στο μεταβατικό στάδιο (μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής) που δεν είναι δυνατό να επιλυθούν αναλυτικά, προβλήματα στατιστικής φυσικής (όπως η κίνηση Brown στα αέρια) κ.ά.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν και ορισμένες δυσκολίες που συνοδεύουν την προσομοίωση. Η βασικότερη είναι η πεπερασμένη επεξεργαστική ισχύς που διαθέτουν οι σύγχρονοι υπολογιστές. Μία προσομοίωση που απαιτεί χρόνια προκειμένου να ολοκληρωθεί είναι πρακτικά άχρηστη. Επίσης, μία προσομοίωση που χρειάζεται τεράστια ποσά μνήμης τα οποία δεν καλύπτονται από τους πόρους του συστήματος (και τεχνολογικά δεν υπάρχει δυνατότητα επέκτασης της μνήμης) μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εάν εφαρμοστούν συγκεκριμένες προγραμματιστικές τεχνικές οι οποίες όμως αυξάνουν τη στατιστική αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων. Βέβαια, με τη ραγδαία ανάπτυξη της βιομηχανίας των υπολογιστών, ίσως χρειαστούν μόλις λίγα χρόνια, ώστε η νεότερη τεχνολογία να καλύψει τις σημερινές απαιτήσεις.

Αξίζει να σημειωθεί πως ο σκοπός της προσομοίωσης δεν είναι να παρέχει καλύτερο “*cum fit*” στα πειραματικά δεδομένα σε σχέση με αυτό που παρέχουν οι αναλυτικές μέθοδοι επίλυσης. Σκοπός της προσομοίωσης είναι η καλύτερη κατανόηση των φυσικών φαινομένων και η εμβάθυνση στους μηχανισμούς και τις ιδιότητες της ύλης.

² Το όνομα “Monte Carlo” επινοήθηκε τη δεκαετία του 1940 από επιστήμονες που δούλευαν στο πυρηνικό πρόγραμμα του Los Alamos, για να περιγράψουν μία σειρά από αριθμητικές μεθόδους οι οποίες βασίζονταν στη χρήση τυχαίων αριθμών. Σήμερα, οι μέθοδοι Monte Carlo χρησιμοποιούνται για την επίλυση πολύπλοκων φυσικών και μαθηματικών προβλημάτων.

3.2 Ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE

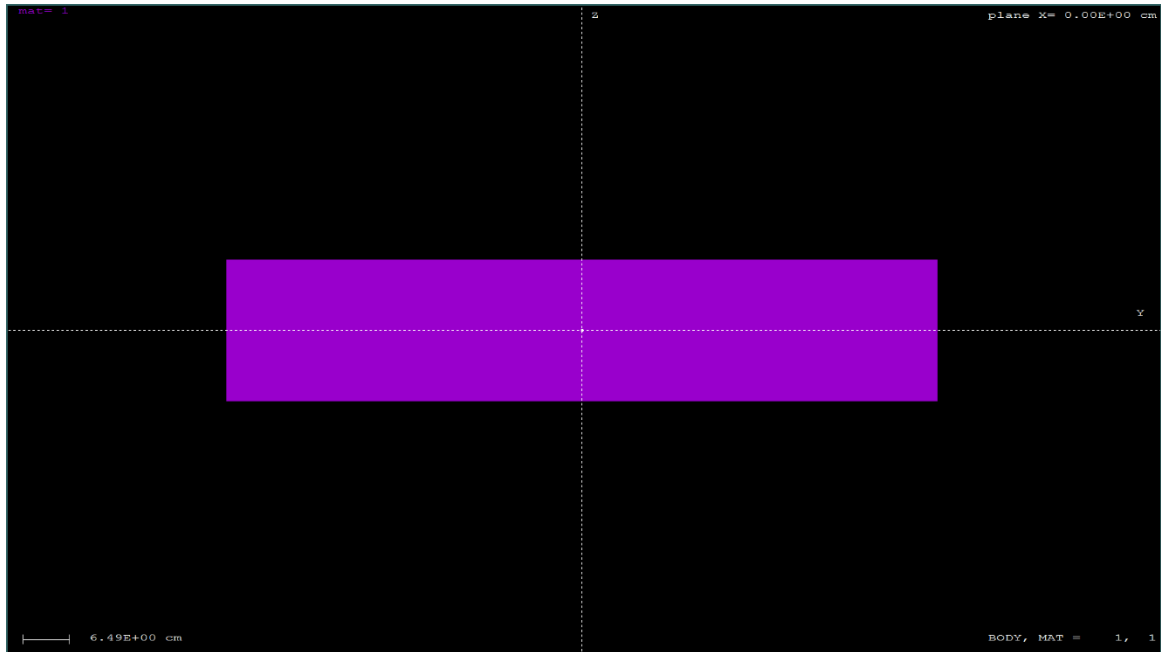
Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, για την προσομοίωση της εκπομπής γ-ακτινοβολίας εξαιτίας της ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών και της απόθεσης δόσης σε συγκεκριμένη θέση μέσα σε ένα δωμάτιο, γίνεται χρήση του κώδικα PENELOPE 2011 (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons). Ο κώδικας αυτός βασίζεται σε ένα μοντέλο σκέδασης που συνδυάζει αριθμητικές βάσεις δεδομένων με μοντέλα ενεργών διατομών, για κάθε έναν από τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη και μπορεί να εφαρμοστεί για ενέργειες που κυμαίνονται μεταξύ μερικών εκατοντάδων eV έως και $\sim 1GeV$. Για την εκτέλεση της προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθεί το έτοιμο πρόγραμμα `penmain` το οποίο παρέχεται με τον κώδικα PENELOPE. Ο κώδικας αυτός είναι σε θέση να προσομοιώσει την αλληλεπίδραση ακτινοβολίας- γ και ακτινοβολίας- β για αρκετά πολύπλοκες γεωμετρίες.

3.2.1 Το σύστημα αρχείων του κώδικα PENELOPE

Η βασική ιδέα για την εκτέλεση προσομοιώσεων είναι αρκετά απλή. Στον ίδιο φάκελο, στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή, πρέπει να συνυπάρχουν τα εξής αρχεία: το εκτελέσιμο αρχείο του κυρίως προγράμματος (`penmain.exe`), το αρχείο που περιγράφει τη γεωμετρία του προβλήματος (αρχείο τύπου `*.geo`), το αρχείο εισόδου (αρχείο τύπου `*.in`), καθώς και τα αρχεία υλικών (αρχεία τύπου `*.mat`) που θα χρησιμοποιηθούν.

Με το αρχείο τύπου `*.geo` ορίζεται η γεωμετρία του χώρου στον οποίο θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση. Ένα παράδειγμα στο οποίο ορίζεται ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο φαίνεται στην Εικόνα A 1 του Παραρτήματος A. Το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο του παραδείγματος σχηματίζεται από έξι επίπεδα, τα $y = -50cm$, $y = +50cm$, $z = +10cm$, $z = -10cm$, $x = -50cm$ και $x = +50cm$, που αποτελούν τις έξι έδρες του. Με χρήση της εντολής *SIDE POINTER* ορίζεται ο κατάλληλος προσανατολισμός του κάθε επιπέδου στο χώρο, ώστε να σχηματιστεί το επιθυμητό στερεό σώμα.

Προκειμένου να απεικονιστεί το παραπάνω ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο γίνεται χρήση του προγράμματος *gview2d*. Αυτό το πρόγραμμα μπορεί να δώσει όλες τις όψεις και όλες τις δυνατές τομές του συγκεκριμένου στερεού σώματος. Η τομή του σώματος σε yz επίπεδο που περνά από την αρχή των αξόνων φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Τομή του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου του παραδείγματος κατά το yz επίπεδο που περνά από την αρχή των αξόνων

Στο αρχείο εισόδου (αρχείο τύπου *.in) εισάγονται πληροφορίες που αφορούν στην πηγή (είδος πρωτογενών σωματιδίων, αρχική ενέργεια δέσμης, θέση της πηγής στο χώρο κλπ), καθώς και πληροφορίες για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση. Στο αρχείο εισόδου, καλείται και το αρχείο τύπου *.geo, από το οποίο το PENELOPE αντλεί πληροφορίες για τη γεωμετρία της κατασκευής, τοποθετούνται εικονικοί ανιχνευτές κλπ. Στις επόμενες παραγράφους θα δοθούν αναλυτικά τα αρχεία εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

3.2.2 Ανιχνευτής δόσης

Ο κώδικας PENELOPE μπορεί να υπολογίσει την κατανομή της δόσης που αποτίθεται στο χώρο. Αυτό γίνεται ορίζοντας, στο αρχείο εισόδου, μία διάταξη που καλείται ανιχνευτής δόσης (dose distribution). Αυτός ο εικονικός ανιχνευτής δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, οι ακμές του οποίου είναι παράλληλες με τους άξονες του “εργαστηρίου”. Ο χρήστης μπορεί επίσης να επιλέξει τον αριθμό των κελιών από τα οποία θα αποτελείται ο ανιχνευτής δόσης. Είναι προφανές πως μεγαλύτερος αριθμός κελιών (πυκνότερη διαμέριση) δίνει ακριβέστερη πληροφορία για τη δοσιμετρική κατανομή.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η οπτική αναπαράσταση της δοσιμετρικής κατανομής έγινε με χρήση του προγράμματος *gnuplot*, το οποίο αυτόματα βαθμονομεί τους άξονες και απεικονίζει την κατανομή στο επίπεδο.

3.3 Εκτίμηση δόσης από σημειακή πηγή

Πριν προσομοιωθεί το πολύπλοκο πρόβλημα εκτίμησης της δόσης, εξαιτίας των οικοδομικών υλικών, σε ένα δωμάτιο και με σκοπό την εξοικείωση με τη διαδικασία της προσομοίωσης, στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας, έγινε προσομοίωση ενός απλούστερου προβλήματος δοσιμετρικού υπολογισμού.

Συγκεκριμένα, σκοπός αυτής της ενότητας είναι η εκτίμηση της δόσης σε $eV/(g \cdot \text{φωτόνιο})$ που αποτίθεται σε ανθρώπινο ιστό εξαιτίας σημειακής πηγής φωτονίων, ενέργειας $E_\gamma = 609keV$. Η απόσταση μεταξύ πηγής και ιστού επιλέχθηκε να είναι $R = 50cm$, ενώ επικρατούν συνθήκες κενού.

Αρχικά, η δόση θα υπολογιστεί θεωρητικά και έπειτα θα εκτιμηθεί μέσω της προσομοίωσης.

3.3.1 Θεωρητικός υπολογισμός δόσης από σημειακή πηγή

Η ζητούμενη απορροφώμενη δόση δίνεται από τη σχέση³ (Λεωνίδου, 1984):

$$D \left[\frac{rad}{\text{φωτόνιο}} \right] = 1.6 \cdot 10^{-8} E_\gamma \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_I^{\alpha\pi} \frac{1}{4\pi R^2} \quad (3.1)$$

όπου:

$E_\gamma = 0.609MeV$, η ενέργεια των φωτονίων της πηγής,

$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_I^{\alpha\pi} = 0.0319 cm^2/g$, ο μαζικός συντελεστής απορρόφησης ιστού για ενέργεια $609keV$

και $R = 50cm$, η απόσταση πηγής - ιστού.

Με αντικατάσταση των αριθμητικών δεδομένων και μετά από πράξεις, η σχέση (3.1) δίνει:

³ Το $1rad$ είναι μονάδα μέτρησης της δόσης στο σύστημα *cgs* και αντιστοιχεί σε $0.01Gy$.

$$D = 9.89 \cdot 10^{-15} \frac{\text{rad}}{\text{φωτόνιο}} \quad (3.2)$$

Κάνοντας μετατροπή στις μονάδες και γνωρίζοντας ότι $1\text{rad} = 6.25 \cdot 10^{13} \frac{\text{eV}}{\text{g}}$, προκύπτει:

$$D = 0.614 \frac{\text{eV}}{\text{g} \cdot \text{φωτόνιο}} \quad (3.3)$$

3.3.2 Εκτίμηση δόσης από σημειακή πηγή μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo

Προκειμένου να γίνει η προσομοίωση, είναι απαραίτητη – όπως προαναφέρθηκε – η δημιουργία δύο αρχείων· του αρχείου γεωμετρίας και του αρχείου εισόδου. Το αρχείο γεωμετρίας έχει τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα A 2 του Παραρτήματος Α. Ο ιστός (BODY 1) είναι ένας κύβος ακμής 1cm , βρίσκεται στη θέση $(x, y, z = 0,0,50)$ και ορίζεται με τη βοήθεια έξι επιπέδων. Επιπλέον, είναι απαραίτητη και η ύπαρξη μιας σφαίρας (SURFACE 7) με κέντρο την πηγή, εντός των ορίων της οποίας λαμβάνει χώρα η προσομοίωση⁴. Ορίζουμε, λοιπόν, ως BODY 2 το εσωτερικό της σφαίρας, το οποίο περικλείει το BODY 1, και το οποίο αποτελείται από κενό (MATERIAL 0). Ως BODY 3 ορίζουμε το χώρο εξωτερικά της σφαίρας.

Αξίζει να σημειωθεί πως η ταχύτητα με την οποία εκτελείται η προσομοίωση είναι σημαντικά μεγαλύτερη όταν ορίσουμε κάποια γεωμετρία που λειτουργεί ως όριο (όπως η σφαίρα που αναφέρθηκε προηγουμένως). Η επίδραση στην ταχύτητα της προσομοίωσης είναι ακόμα εντονότερη στην περίπτωση που ο χώρος που περιβάλλει την κατασκευή είναι γεμάτος με κάποιο υλικό (π.χ. αέρας). Σε αυτήν την περίπτωση, εάν δεν περιορίσουμε τη γεωμετρία εντός κάποιων ορίων, καταναλώνονται άσκοπα πόροι από το σύστημα για τον υπολογισμό των τροχιών των σωματιδίων στο υλικό που περιβάλλει την κατασκευή, καθώς και της ενδεχόμενης δευτερογενούς ακτινοβολίας που εκπέμπεται, επιβραδύνοντας τη διαδικασία.

Το αρχείο εισόδου φαίνεται στην Εικόνα B 1 του Παραρτήματος Β. Σε αυτό το αρχείο δίνονται πληροφορίες για το είδος και την ενέργεια των πρωτογενών σωματιδίων που εκπέμπονται, ορίζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται, οι ενέργειες αποκοπής για κάθε υλικό, το όνομα του αρχείου γεωμετρίας από το οποίο αντλούνται πληροφορίες, οι

⁴ Όταν ένα φωτόνιο που προσομοιώνεται εξέλθει της σφαίρας τερματίζεται η ιστορία του και κατόπιν ξεκινά η προσομοίωση της ιστορίας επόμενου φωτονίου.

ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται, το πλήθος των τροχιών που θα υπολογιστούν κλπ. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί πως επειδή οι σημειακές πηγές, έτσι όπως έχουν οριστεί στον κώδικα, είναι δυνατόν να μην εκπέμπουν ισότροπα, είναι απαραίτητη η χρήση της εντολής SCONE με παραμέτρους 0 0 180, ώστε η εκπομπή σωματιδίων να γίνεται ισότροπα προς όλες τις διευθύνσεις.

Όσον αφορά στον ανιχνευτή δόσης, η θέση του έχει οριστεί ακριβώς πάνω στον ιστό και η διαμέρισή του είναι 1, 1, 1, δηλαδή αποτελείται αποκλειστικά και μόνο από ένα κελί.

Τέλος, στην προσομοίωση επιλέχθηκε να προσομοιωθούν $3 \cdot 10^9$ ιστορίες.

Ένα ακόμα σημείο που θα πρέπει να σημειωθεί αφορά στις ενέργειες αποκοπής⁵. Οι προεπιλεγμένες, από το πρόγραμμα, τιμές των ενεργειών αποκοπής εντοπίζονται στο 1% της μέγιστης ενέργειας για ηλεκτρόνια/ποζιτρόνια και στο 0.1% της μέγιστης ενέργειας για φωτόνια. Με αυτές τις τιμές η προσομοίωση τρέχει με ιδιαίτερα αργούς ρυθμούς, αφού οι πόροι του συστήματος αναλώνονται στον υπολογισμό των τροχιών (ιστοριών) των σωματιδίων έως ότου η ενέργειά τους μειωθεί έως και το 0.1% της αρχικής τους ενέργειας. Για αυτό το λόγο οι ενέργειες αποκοπής επιλέχθηκαν στο 1/30 και 1% της μέγιστης ενέργειας για ηλεκτρόνια/ποζιτρόνια και φωτόνια, αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο η ταχύτητα με την οποία εκτελείται η προσομοίωση πολλαπλασιάστηκε. Παρόλα αυτά, η περαιτέρω αύξηση των ενεργειών αποκοπής δεν είναι δόκιμη, αφού ενδέχεται να μην προσομοιωθούν ορθά ακτίνες-X που παράγονται δευτερογενώς κατά την αλληλεπίδραση με την ύλη.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα Γ 1 του Παραρτήματος Γ. Το πρόγραμμα μας πληροφορεί για το χρονικό διάστημα που διήρκησε η προσομοίωση, για την ταχύτητά της, για το πλήθος των τροχιών (ιστοριών) που υπολογίστηκαν, για τα πρωτογενή αλλά και τα δευτερογενή σωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και για τη (μέγιστη) δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή. Η δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή, σύμφωνα με την προσομοίωση, είναι:

$$D = (0.582 \pm 0.023) \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \quad (3.4)$$

Συγκρίνοντας τις Σχέσεις (3.3) και (3.4) παρατηρούμε ότι το αποτέλεσμα της προσομοίωσης δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από τον θεωρητικό υπολογισμό.

⁵ Πρόκειται για ενέργειες που επιλέγονται για κάθε είδος ακτινοβολίας που μπορεί να παραχθεί κατά την προσομοίωση. Σε περίπτωση που η ενέργεια ενός σωματιδίου μετά από αλληλεπίδραση γίνει μικρότερη από την αντίστοιχη ενέργεια αποκοπής, το σωματίδιο θεωρείται ότι αποθέτει όλη την ενέργειά του τοπικά.

3.4 Εκτίμηση δόσης από πηγή όγκου

Ως επόμενο βήμα ήταν λογικό να ακολουθήσει ο υπολογισμός της δόσης, θεωρητικά και μέσω προσομοίωσης, για μία πιο πολύπλοκη γεωμετρία. Σε αυτήν την ενότητα θα εκτιμήσουμε τη δόση που αποτίθεται σε ανθρώπινο ιστό από πηγή όγκου, που εκπέμπει φωτόνια ενέργειας $E_\gamma = 609keV$. Η πηγή όγκου έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου διαστάσεων $100 \times 100 \times 20cm^3$ και θεωρούμε ότι περιέχει ένα ομογενώς καταναμημένο ραδιενεργό ισότοπο. Το υλικό της πηγής όγκου είναι σκυρόδεμα και η απόσταση στην οποία βρίσκεται ο ιστός, και στην οποία θέλουμε να εκτιμήσουμε τη δόση, είναι $40cm$ από την πλησιέστερη έδρα του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου – πηγής. Όπως και στην προηγούμενη ενότητα, η δόση, αρχικά, θα υπολογιστεί θεωρητικά και έπειτα θα εκτιμηθεί μέσω της προσομοίωσης.

3.4.1 Θεωρητικός υπολογισμός δόσης από πηγή όγκου

Έστω ότι η πηγή όγκου, σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου (μία πλάκα σκυροδέματος), εκπέμπει S_V $\left(\frac{\text{φωτόνια}}{cm^3s}\right)$. Αυτή η ροή φωτονίων, που προέρχεται από την πηγή όγκου, μπορεί να αναχθεί σε επιφανειακή ροή S_A $\left(\frac{\text{φωτόνια}}{cm^2s}\right)$, αν λάβουμε υπόψη την αυταπορρόφηση της ακτινοβολίας στο υλικό της πηγής όγκου (J.E. Martin, 2006). Εάν $\mu_{σκυρ}^{\alpha\pi}$ είναι ο γραμμικός συντελεστής απορρόφησης στο υλικό της πηγής όγκου (σκυρόδεμα), τότε ο αριθμός των φωτονίων, που απορρέει από μία “φέτα” του υλικού πάχους dz σε βάθος z , και ο οποίος φτάνει στην εξωτερική επιφάνεια της πηγής όγκου, είναι:

$$dS_A = S_V \times dz \times e^{-\mu_{σκυρ}^{\alpha\pi}z} \quad (3.5)$$

Η Σχέση (3.5), με ολοκλήρωση για πάχος πλάκας Δz , δίνει:

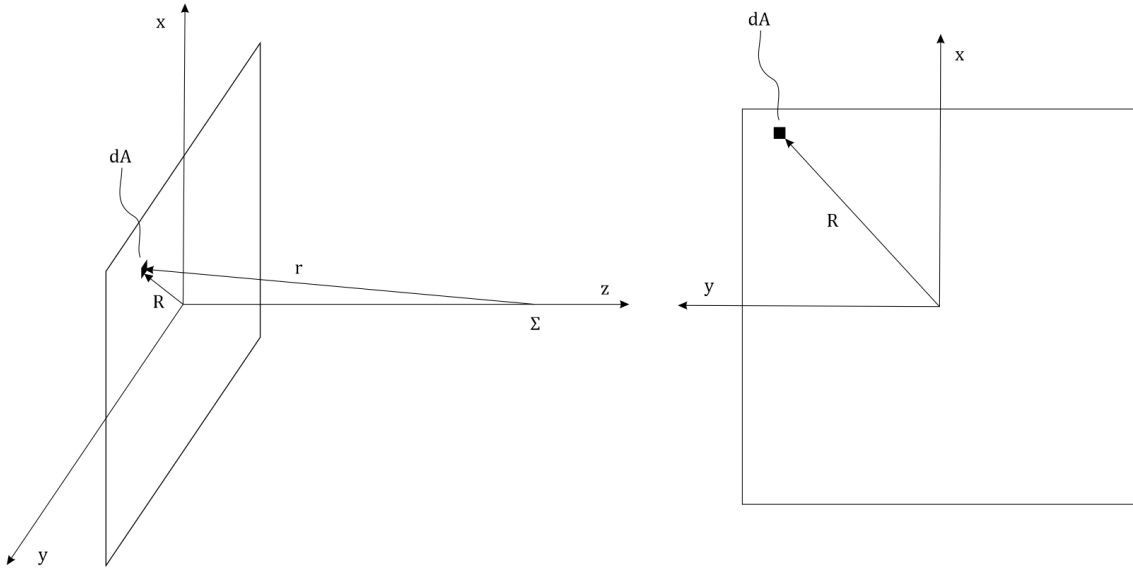
$$S_A = \int_0^{\Delta z} S_V e^{-\mu_{σκυρ}^{\alpha\pi}z} dz = \frac{S_V}{\mu_{σκυρ}^{\alpha\pi}} (1 - e^{-\mu_{σκυρ}^{\alpha\pi}\Delta z}) = \frac{V_\pi Q}{V_\pi \Delta t \mu_{σκυρ}^{\alpha\pi}} (1 - e^{-\mu_{σκυρ}^{\alpha\pi}\Delta z}) \quad (3.6)$$

όπου S_A είναι η ανηγμένη στην επιφάνεια ροή όγκου, Q το πλήθος των φωτονίων που εκπέμπεται σε χρονικό διάστημα Δt από την πηγή και V_π ο όγκος της πηγής.

Γενικά, αν έχουμε μία επιφανειακή πηγή φωτονίων που εκπέμπει S_A $\left(\frac{\text{φωτόνια}}{cm^2s}\right)$, τότε ο ρυθμός δόσης σε ένα σημείο Σ του χώρου, όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.2, θα είναι:

$$d\tilde{D} \left[\frac{eV}{gs} \right] = \frac{S_A}{4\pi r^2} E_\gamma \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_I^{\alpha\pi} dA \quad (3.7)$$

όπου $r^2 = R^2 + z_\Sigma^2 = x^2 + y^2 + z_\Sigma^2$ και z_Σ η απόσταση του σημείου Σ από την αρχή των αξόνων όπου βρίσκεται η επιφανειακή πηγή.



Σχήμα 3.2: Τετράγωνη επιφανειακή πηγή από την οποία θέλουμε να υπολογίσουμε τη δόση στο σημείο Σ

Από τις Σχέσεις (3.6) και (3.7), προκύπτει:

$$d\tilde{D} \left[\frac{eV}{gs} \right] = \frac{Q}{\mu_{\sigma\kappa\nu\rho}^{\alpha\pi}} \left(1 - e^{-\mu_{\sigma\kappa\nu\rho}^{\alpha\pi} \Delta z} \right) \frac{1}{4\pi r^2} E_\gamma \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_I^{\alpha\pi} dA \quad (3.8)$$

το οποίο γίνεται:

$$\frac{d\tilde{D}\Delta t}{Q} \left[\frac{eV}{gs} \right] = \frac{1}{\mu_{\sigma\kappa\nu\rho}^{\alpha\pi}} \left(1 - e^{-\mu_{\sigma\kappa\nu\rho}^{\alpha\pi} \Delta z} \right) \frac{1}{4\pi V_\pi} E_\gamma \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_I^{\alpha\pi} \frac{dA}{r^2} \quad (3.9)$$

Συνεπώς, η δόση είναι:

$$dD \left[\frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \right] = \frac{1}{\mu_{\sigma\kappa\nu\rho}^{\alpha\pi}} \left(1 - e^{-\mu_{\sigma\kappa\nu\rho}^{\alpha\pi} \Delta z} \right) \frac{1}{4\pi V_\pi} E_\gamma \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_I^{\alpha\pi} \frac{dA}{r^2} \quad (3.10)$$

Προκειμένου να λάβουμε υπόψη και τη δευτερογενή ακτινοβολία, που παράγεται στην πηγή όγκου λόγω σκέδασης και εν τέλει προσβάλλει και αυτή το στόχο, θα χρησιμοποιήσουμε έναν παράγοντα επαύξησης. Στη βιβλιογραφία υπάρχει μεγάλη

πληθώρα παραγόντων επαύξησης που αφορούν, όμως, μόνο σε σημειακές πηγές ακτινοβολίας. Αντίθετα, για πηγή όγκου πεπερασμένων διαστάσεων σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου, δεν υπάρχει διαθέσιμος κάποιος παράγοντας επαύξησης. Ωστόσο, ένας παράγοντας επαύξησης για πηγή όγκου, σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου απείρων διαστάσεων, μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση (J.E. Martin, 2006):

$$B_{slab} = e^{\frac{\mu_{σκυρ}^{\xi\xi}\Delta z}{1+\mu_{σκυρ}^{\xi\xi}\Delta z}} \quad (3.11)$$

όπου $\mu_{σκυρ}^{\xi\xi}$ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένισης στο σκυρόδεμα, για ενέργεια φωτονίων $E_{\gamma} = 609keV$ και Δz το πάχος της πλάκας.

Συνεπώς, ο τελικός τύπος διαμορφώνεται ως εξής:

$$dD \left[\frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \right] = e^{\frac{\mu_{σκυρ}^{\xi\xi}\Delta z}{1+\mu_{σκυρ}^{\xi\xi}\Delta z}} \frac{1}{\mu_{σκυρ}^{\alpha\pi}} (1 - e^{-\mu_{σκυρ}^{\alpha\pi}\Delta z}) \frac{1}{4\pi V_{\pi}} E_{\gamma} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_I^{\alpha\pi} \frac{dA}{r^2} \quad (3.12)$$

που με ολοκλήρωση στην επιφάνεια, γίνεται:

$$D \left[\frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \right] = e^{\frac{\mu_{σκυρ}^{\xi\xi}\Delta z}{1+\mu_{σκυρ}^{\xi\xi}\Delta z}} \frac{(1 - e^{-\mu_{σκυρ}^{\alpha\pi}\Delta z})}{\mu_{σκυρ}^{\alpha\pi}} \frac{E_{\gamma}}{4\pi V_{\pi}} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_I^{\alpha\pi} \iint_{x,y=-50}^{x,y=+50} \frac{dx dy}{x^2 + y^2 + z_{\Sigma}^2} \quad (3.13)$$

όπου:

$$E_{\gamma} = 6.09 \cdot 10^5 eV$$

$$\Delta z = 20cm$$

$$\mu_{σκυρ}^{\xi\xi} = 0.1889cm^{-1}$$

$$\mu_{σκυρ}^{\alpha\pi} = 0.0693cm^{-1}$$

$$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_I^{\alpha\pi} = 0.0319 \frac{cm^2}{g}$$

$$V_{\pi} = 2 \cdot 10^5 cm^3$$

$$z_{\Sigma} = 40cm$$

Μετά από αντικατάσταση των αριθμητικών δεδομένων, η Σχέση (3.13) υπολογίστηκε στο *Wolfram Mathematica* και το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 3.1.

$$\text{result} = \frac{6.09 \times 10^5 \times 0.0319 (1 - \exp(-0.0693 \times 20)) \exp\left(\frac{0.1889 \times 20}{1+0.1889 \times 20}\right) \text{NIntegrate}\left[\frac{1}{x^2+y^2+40^2}, \{x, -50, +50\}, \{y, -50, +50\}\right]}{(4 \times 3.14 \times 2 \times 10^5) 0.0693}$$

0.629206

Εικόνα 3.1: Το αποτέλεσμα, όπως υπολογίστηκε από το Wolfram Mathematica

Οπότε, η αποτιθέμενη δόση σε ιστό από τη συγκεκριμένη πηγή όγκου είναι:

$$D = 0.629 \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \cong 0.63 \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \quad (3.14)$$

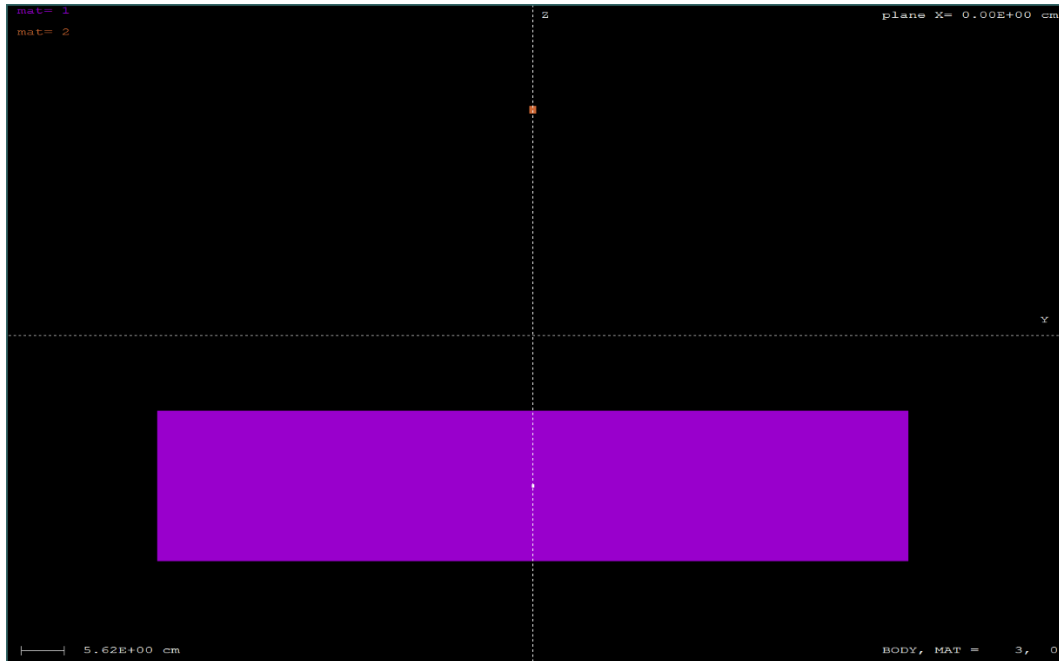
3.4.2 Εκτίμηση δόσης από πηγή όγκου μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo

Το αρχείο γεωμετρίας που χρησιμοποιήσαμε για τη συγκεκριμένη προσομοίωση φαίνεται στην Εικόνα A 3 του Παραρτήματος A. Σε αυτό το αρχείο έχουμε ορίσει τέσσερα σώματα. Το πρώτο (BODY 1) είναι η πηγή όγκου, ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο διαστάσεων $100 \times 100 \times 20 \text{cm}^3$. Το δεύτερο (BODY 2) είναι ο ιστός, επίσης ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, διαστάσεων $1 \times 1 \times 1 \text{cm}^3$, ο οποίος απέχει από την πλησιέστερη έδρα της πηγής όγκου απόσταση 40cm . Με την ίδια λογική, όπως και στην προσομοίωση της προηγούμενης ενότητας, δημιουργήσαμε μία σφαίρα η οποία θέτει τα όρια της προσομοίωσης. Το τρίτο σώμα (BODY 3) είναι το εσωτερικό της σφαίρας, αποτελείται από κενό και περιλαμβάνει τα δύο πρώτα σώματα. Τέλος, το τέταρτο σώμα (BODY 4) είναι ο χώρος εξωτερικά της σφαίρας.

Μία οπτική αναπαράσταση της παραπάνω γεωμετρίας και συγκεκριμένα μία τομή σε επίπεδο yz , με τη βοήθεια του προγράμματος *gview2d*, φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Το ορθογώνιο στο κάτω μέρος του σχήματος είναι η τομή της πηγής όγκου (BODY 1), ενώ πάνω στον άξονα z διακρίνουμε τον ιστό (BODY 2).

Στην Εικόνα B 2 του Παραρτήματος B φαίνεται το αρχείο εισόδου της προσομοίωσης. Με την εντολή SBODY ορίζεται το σώμα εκείνο (έτσι όπως έχει οριστεί στο αρχείο γεωμετρίας) το οποίο θα λειτουργεί ως πηγή. Με την εντολή SBOX δημιουργείται ένα “κουτί” μέσα στο οποίο το πρόγραμμα κάνει δειγματοληψία. Το πρόγραμμα, επιλέγει ένα τυχαίο σημείο του “κουτιού” SBOX και εάν αυτό το σημείο βρίσκεται εντός των ορίων του σώματος SBODY το θεωρεί ως σημειακή πηγή που εκπέμπει ισότροπα. Στη συνέχεια προχωρά στο επόμενο τυχαίο σημείο *kok*. Από την άλλη πλευρά, εάν το τυχαία επιλεγμένο σημείο του “κουτιού”

SBOX δεν βρίσκεται στο εσωτερικό του σώματος SBODY, τότε το σημείο αυτό απορρίπτεται και δεν συμπεριφέρεται ως σημειακή πηγή. Με άλλα λόγια, ως πηγές όγκου συμπεριφέρονται οι περιοχές επικάλυψης του “κουτιού” SBOX και των σωμάτων SBODY.



Σχήμα 3.3: Μία τομή της γεωμετρίας (πηγή όγκου – ιστός)

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα Γ 2 του Παραρτήματος Γ. Το πρόγραμμα μας πληροφορεί για το χρονικό διάστημα που διήρκεσε η προσομοίωση, για την ταχύτητά της, για το πλήθος των τροχιών (ιστοριών) που υπολογίστηκαν, για τα πρωτογενή αλλά και τα δευτερογενή σωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν, για τις μέσες ενέργειες που αποτίθενται στα σώματα που ορίζουν τη γεωμετρία, καθώς και για τη (μέγιστη) δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή.

Η δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή, σύμφωνα με την προσομοίωση, είναι:

$$D = (0.739 \pm 0.042) \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \cong (0.74 \pm 0.04) \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \quad (3.15)$$

Συγκρίνοντας τις Σχέσεις (3.14) και (3.15), παρατηρούμε ότι ο θεωρητικός υπολογισμός υποεκτιμά το αποτέλεσμα της προσομοίωσης κατά $0.63 = 0.74 - 0.74x \Rightarrow x \sim 15\%$. Η διαφορά αυτή είναι στατιστικά σημαντική και πιθανότατα οφείλεται στην προσεγγιστική σχέση για τον παράγοντα επαύξησης που χρησιμοποιήθηκε στον θεωρητικό υπολογισμό. Πάντως η διαφορά αυτή δεν θεωρείται ιδιαίτερα μεγάλη και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αξιολογήθηκαν ότι δίνουν ρεαλιστικά αποτελέσματα.

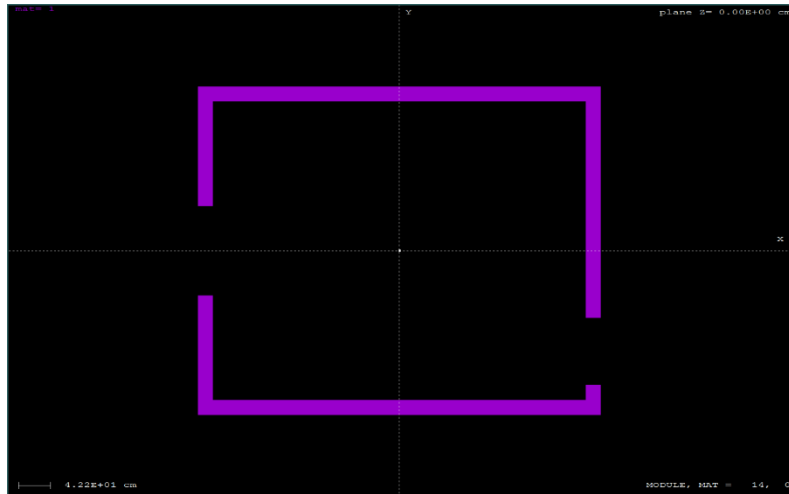
3.5 Εκτίμηση της δοσιμετρικής κατανομή μέσα σε δωμάτιο, μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo

Σε αυτήν την ενότητα πραγματοποιείται μία εκτίμηση της κατανομής της δόσης στο εσωτερικό της πλέον πολύπλοκης γεωμετρίας, ενός δωματίου τυπικών διαστάσεων, εξαιτίας της ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών.

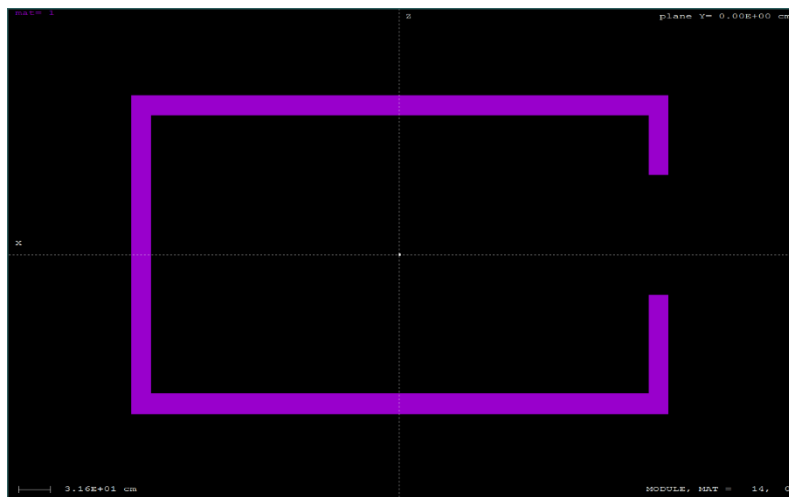
3.5.1 Το αρχείο γεωμετρίας

Το δωμάτιο, όπως αυτό ορίζεται στο αρχείο γεωμετρίας, έχει εσωτερικές διαστάσεις $5m \times 4m \times 2.8m$, διαθέτει πόρτα και παράθυρο, ενώ το πάχος των τοίχων, της οροφής και του δαπέδου είναι $20cm$. Για την κατασκευή του δωματίου απαιτήθηκε η δημιουργία δεκατριών σωμάτων (εάν βέβαια λάβουμε υπόψη και τη σφαίρα που οριοθετεί την προσομοίωση, ο αριθμός των σωμάτων ανέρχεται σε δεκαπέντε). Δύο από αυτά τα σώματα αποτελούν την οροφή και το ταβάνι, δύο τους αντιδιαμετρικούς τοίχους κατά τον άξονα y , οκτώ σώματα τοποθετήθηκαν με κατάλληλο τρόπο ώστε να σχηματιστούν τα ανοίγματα της πόρτας και του παραθύρου στους αντιδιαμετρικούς τοίχους κατά τον άξονα x , ενώ το δέκατο τρίτο σώμα είναι ένα λεπτό στρώμα επικάλυψης του δαπέδου. Η αρχική ιδέα ήταν το υλικό επικάλυψης του δαπέδου να διαφέρει από το υλικό του υπόλοιπου δωματίου, εκπέμποντας φωτόνια διαφορετικής ενέργειας. Τελικά, όμως, αυτή η ιδέα εγκαταλείφθηκε και το λεπτό αυτό στρώμα επικάλυψης αποτελείται και αυτό από σκυρόδεμα, όπως και τα υπόλοιπα δώδεκα σώματα. Πάντως, στα πλαίσια κάποιας μελλοντικής εργασίας, το δέκατο τρίτο σώμα μπορεί πολύ εύκολα να οριστεί ως υλικό επικάλυψης και για αυτό το λόγο δεν αφαιρέθηκε από το αρχείο γεωμετρίας.

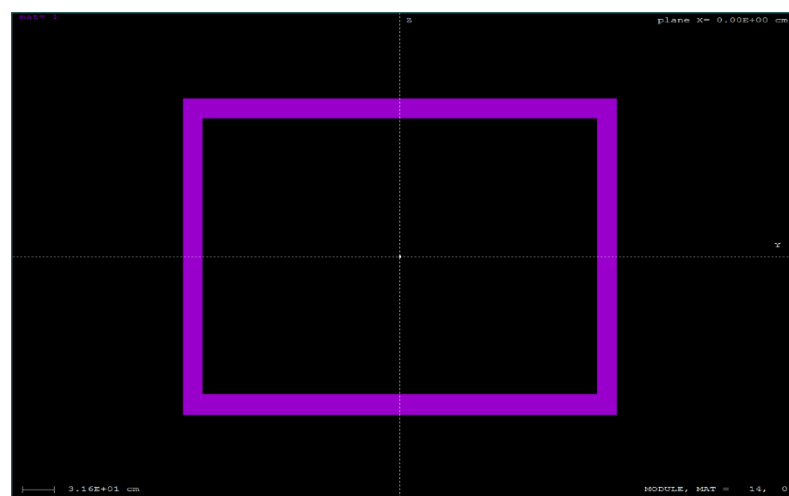
Στα Σχήματα 3.4 έως 3.8 που ακολουθούν φαίνονται διάφορες όψεις και τομές του δωματίου, όπως αυτές απεικονίζονται με το πρόγραμμα *gview2d*, ενώ στα σχήματα του Παραρτήματος Δ φαίνονται λεπτομερώς και με διαφορετικά χρώματα τα σώματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του δωματίου.



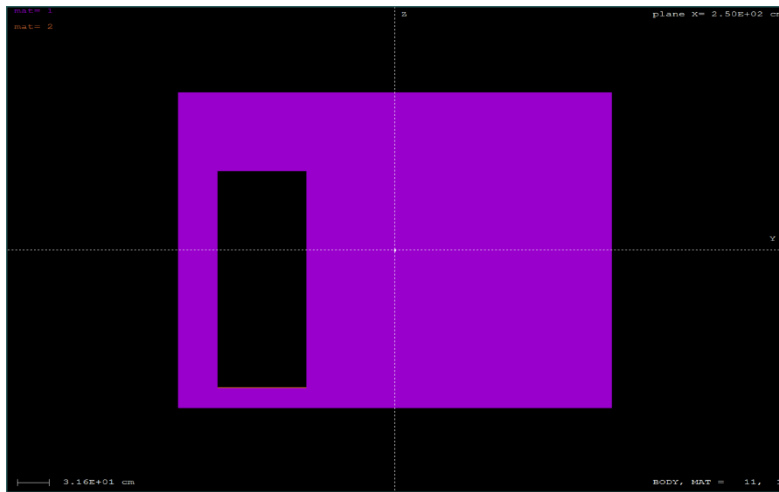
Σχήμα 3.4: Τομή (κάτοψη) κατά xy επίπεδο, φαίνονται το παράθυρο και η πόρτα



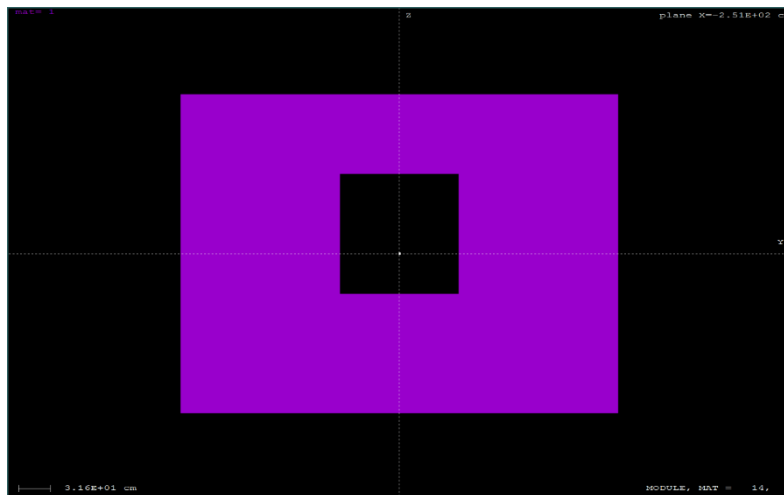
Σχήμα 3.5: Τομή σε xz επίπεδο, φαίνεται το παράθυρο



Σχήμα 3.6: Τομή σε yz επίπεδο



Σχήμα 3.7: Όψη σε yz επίπεδο, φαίνεται η πόρτα



Σχήμα 3.8: Όψη σε yz επίπεδο, φαίνεται το παράθυρο

Στην Εικόνα Α 4 του Παραρτήματος Α φαίνεται το αρχείο γεωμετρίας με το οποίο κατασκευάστηκε το δωμάτιο που απεικονίζεται στα πέντε παραπάνω σχήματα καθώς και στα σχήματα του Παραρτήματος Δ.

3.5.2 Εκτίμηση της δοσιμετρικής κατανομής μέσα και έξω από το δωμάτιο

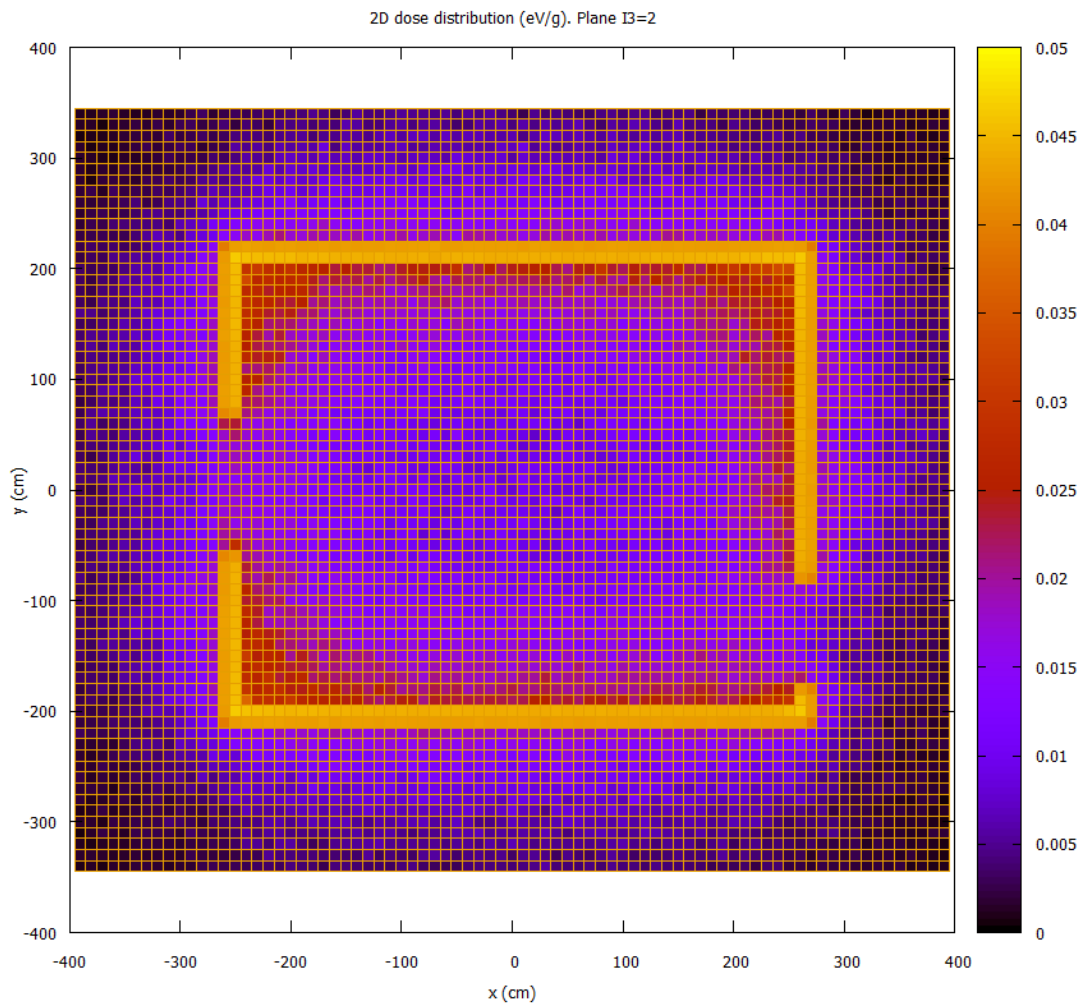
Προκειμένου να σχηματιστεί μία εικόνα για το πώς κατανέμεται η δόση στο χώρο (αέρας) μέσα και έξω από το δωμάτιο, δημιουργήθηκε το αρχείο εισόδου που φαίνεται στην Εικόνα Β 3 του Παραρτήματος Β. Σε αυτήν την ενότητα θα πραγματοποιηθεί μία ποιοτική περιγραφή των αποτελεσμάτων.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα Β 3 του Παραρτήματος Β, τα δεκατρία σώματα, από τα οποία αποτελείται το δωμάτιο και τα οποία λειτουργούν ως πηγές όγκου, επιλέχθηκε να εκπέμπουν φωτόνια ενέργειας 1120keV που εκπέμπονται από το βραχύβιο θυγατρικό του ραδονίου, ^{214}Bi . Με την εντολή SBOX δημιουργούμε ένα “κουτί” που περικλείει ολόκληρη τη γεωμετρία (βλ. Ενότητα 3.4.2) και στη συνέχεια παραθέτουμε τα δεκατρία σώματα, που με την εντολή SBODY λειτουργούν ως πηγές όγκου. Ακολουθούν τα δύο υλικά που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση· σκυρόδεμα για τα πρώτα δεκατρία σώματα και αέρας για το δέκατο τέταρτο (το οποίο όμως δεν λειτουργεί ως πηγή). Στη συνέχεια φαίνεται το όνομα του αρχείου γεωμετρίας, από το οποίο αντλούνται πληροφορίες για την κατασκευή, καθώς και ο ανιχνευτής δόσης. Ο ανιχνευτής δόσης βρίσκεται σε απόσταση 140cm από το δάπεδο του δωματίου και εκτείνεται σε απόσταση 800cm κατά τον άξονα x , 700cm κατά τον άξονα y και 10cm κατά τον άξονα z . Η διαμέριση έχει επιλεγεί κατάλληλα, ώστε κάθε κελί του ανιχνευτή δόσης να είναι κύβος ακμής 10cm . Συγκεκριμένα, η διάσταση κατά x χωρίζεται σε 80 μέρη, η διάσταση κατά y σε 70, ενώ η διάσταση κατά z δεν υποδιαιρείται.

Το Σχήμα 3.9 απεικονίζει, με τη βοήθεια του προγράμματος *gnuplot*, την κατανομή της δόσης στο χώρο μέσα και έξω από το δωμάτιο. Με βάση τη χρωματική παλέτα που φαίνεται στα δεξιά του σχήματος, τα κελιά κίτρινου χρώματος του ανιχνευτή είναι αυτά που καταγράφουν την υψηλότερη δόση, ενώ τα κελιά μαύρου χρώματος τη χαμηλότερη. Όπως είναι αναμενόμενο, η υψηλότερη δόση καταγράφεται στο εσωτερικό των τοίχων του δωματίου, δηλαδή στο εσωτερικό των πηγών όγκου, αφού εκεί λόγω της μεγάλης πυκνότητας του σκυροδέματος αποτίθεται και η περισσότερη ενέργεια. Όσον αφορά στον αέρα, παρατηρούμε ότι η υψηλότερη δόση (κελιά κόκκινου χρώματος) εντοπίζεται στις περιοχές εκείνες του χώρου στις οποίες η αποτιθέμενη ενέργεια προκύπτει ως αποτέλεσμα επαλληλίας της ακτινοβολίας που εκπέμπουν δύο ή περισσότερες πηγές όγκου. Αυτό εξηγεί το γεγονός ότι στο εσωτερικό του δωματίου, κοντά στους τοίχους και ιδιαίτερα στις τρεις από τις τέσσερις γωνίες του δωματίου η αποτιθέμενη δόση στον αέρα παίρνει τις υψηλότερες τιμές (κόκκινο χρώμα). Γενικά, όσο απομακρυνόμαστε από κάποιο τοίχο η

αποτιθέμενη δόση μειώνεται. Παρατηρούμε επίσης ότι στις περιοχές όπου υπάρχουν ανοίγματα στους τοίχους (πόρτα και παράθυρο) η αποτιθέμενη ενέργεια είναι σημαντικά μικρότερη. Τέλος, στο εξωτερικό του δωματίου, οι δόσεις που καταγράφονται έχουν χαμηλότερες τιμές σε σχέση με το εσωτερικό του δωματίου και, όπως ήταν αναμενόμενο, όσο απομακρυνόμαστε από τους τοίχους, η δόση μειώνεται.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως, σύμφωνα με τα συμπεράσματα της παραγράφου 2.2.3, στη δόση που αποτίθεται σε ένα σημείο εκτός του δωματίου συμβάλλουν όλες οι πηγές όγκου (όλα τα δομικά στοιχεία), ενδεχομένως ακόμα και οι αντιδιαμετρικά τοποθετημένες πηγές (ο απέναντι τοίχος). Αυτό συμβαίνει αφού το πάχος των τοίχων είναι 20cm , δηλαδή μικρότερο από το όριο των 40cm πάνω από το οποίο τα δομικά στοιχεία λειτουργούν 100% ως ασπίδα στην ακτινοβολία από εξωτερικές πηγές.



Σχήμα 3.9: Δοσιμετρική κατανομή σε όλο το χώρο

Η παραπάνω προσομοίωση καθιστά δυνατή την εκτίμηση της δοσιμετρικής κατανομής για μία συγκεκριμένη ενέργεια (1120keV) και δίνει λογικά αποτελέσματα. Στις παραγράφους 3.5.3 έως και 3.5.10 παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα οκτώ προσομοιώσεων, που αφορούν στην ίδια γεωμετρία, μία για κάθε μία από τις ενέργειες των 609keV , 1120keV , 1764keV , 239keV , 338keV , 583keV , 911keV και 1460keV . Αυτές είναι οι ενέργειες που επικαλείται η βιβλιογραφία ως τις ενέργειες με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη δόση και από την επαλληλία αυτών θα προκύψει, τελικά, η συνολική δόση μέσα στο δωμάτιο (παράγραφος 3.5.11). Σε όλες τις προσομοιώσεις που ακολουθούν, ο ανιχνευτής δόσης εκτείνεται σε όλο το μήκος και πλάτος του δωματίου (αποκλειστικά στο εσωτερικό – δεν περιλαμβάνει τους τοίχους), βρίσκεται σε ύψος 140cm από το δάπεδο και έχει χωριστεί κατά x σε 50 μέρη, κατά y σε 40, ενώ κατά z δεν υπάρχει υποδιαίρεση. Κατά αυτόν τον τρόπο σχηματίστηκαν 2000 κελιά, σχήματος κύβου, ακμής 10cm .

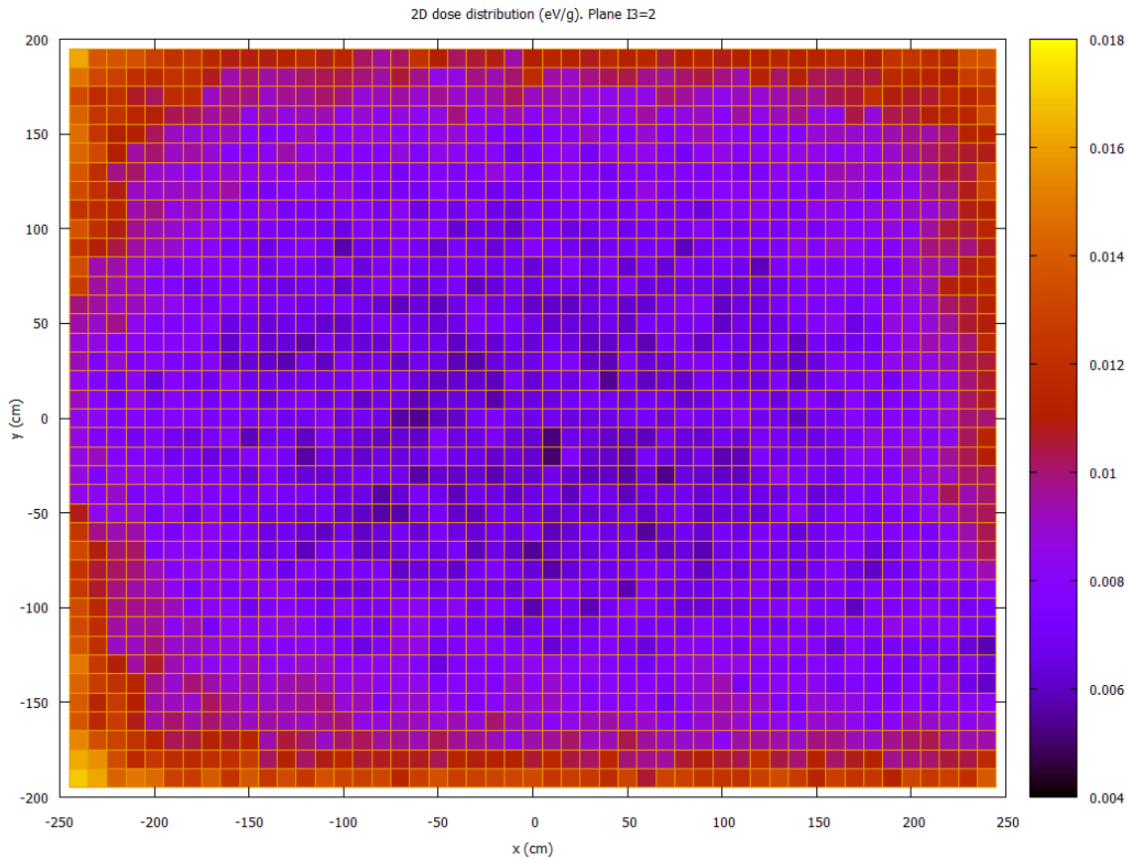
3.5.3 Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 609keV

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η κατανομή της δόσης μέσα στο δωμάτιο εξαιτίας της εκπομπής φωτονίων ενέργειας 609keV . Τα φωτόνια αυτά εκπέμπονται μέσα στον τοίχο από το βραχύβιο θυγατρικό του ραδονίου, ^{214}Bi , με ποσοστό εκπομπής 46.09%. Στην Εικόνα Β 4 του Παραρτήματος Β φαίνεται το αρχείο εισόδου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα Γ 3 του Παραρτήματος Γ. Το πρόγραμμα μας πληροφορεί για το χρονικό διάστημα που διήρκησε η προσομοίωση, για την ταχύτητά της, για το πλήθος των τροχιών (ιστοριών) που υπολογίστηκαν, για τα πρωτογενή αλλά και τα δευτερογενή σωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν, για τις μέσες ενέργειες που αποτίθενται στα σώματα που ορίζουν τη γεωμετρία, καθώς και για τη (μέγιστη) δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή. Η μέγιστη δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή είναι:

$$(17.9 \pm 2.3) \cdot 10^{-3} \text{ eV} / (\text{g} \cdot \text{φωτόνιο}) \quad (3.16)$$

Η δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο, εξαιτίας φωτονίων ενέργειας 609keV , απεικονίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος *gnuplot* στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Δοσιμετρική κατανομή στο δωμάτιο – φωτόνια 609keV

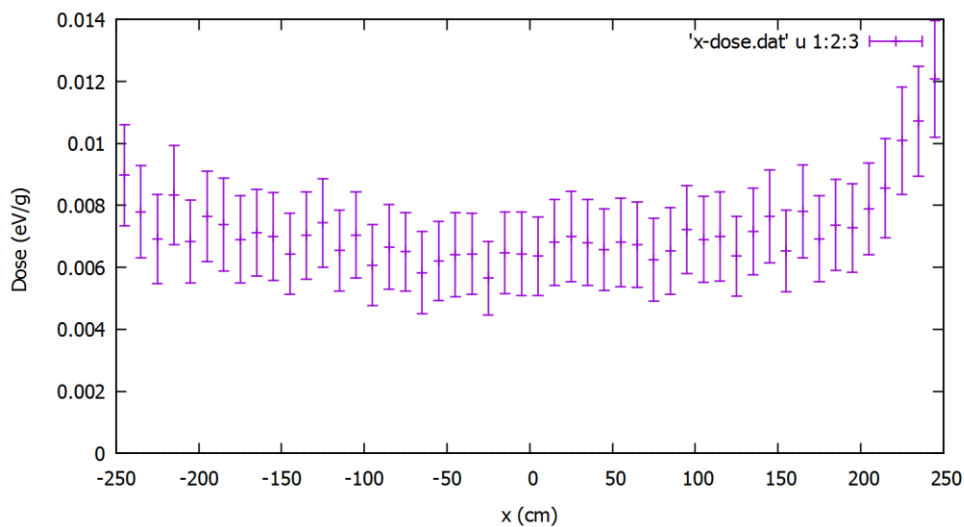
Με βάση τη χρωματική παλέτα που φαίνεται στα δεξιά του Σχήμα 3.10, τα κελιά κίτρινου χρώματος του ανιχνευτή είναι αυτά που καταγράφουν την υψηλότερη δόση, ενώ τα κελιά μαύρου χρώματος τη χαμηλότερη. Κοντά στους τοίχους και ιδιαίτερα στις τρεις από τις τέσσερις γωνίες του δωματίου η αποτιθέμενη δόση στον αέρα παίρνει τις υψηλότερες τιμές. Γενικά, όσο αυξάνεται η απόσταση από κάποιο τοίχο η αποτιθέμενη δόση μειώνεται. Τέλος, στις περιοχές όπου υπάρχουν ανοίγματα στους τοίχους (πόρτα και παράθυρο) η αποτιθέμενη ενέργεια είναι σημαντικά μικρότερη.

Στα δύο γραφήματα που ακολουθούν δίνεται η κατανομή της δόσης για φωτόνια ενέργειας 609keV κατά τους άξονες x και y αντίστοιχα. Όπως είναι αναμενόμενο, τα συμπεράσματα που απορρέουν από την ανάλυση αυτών των δύο γραφημάτων ταυτίζονται με τα συμπεράσματα από τη χρωματική κατανομή (Σχήμα 3.10) ενώ, επιπλέον, βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση του τύπου κατανομής της δόσης και συμπληρώνουν την εικόνα που αποκομίζουμε.

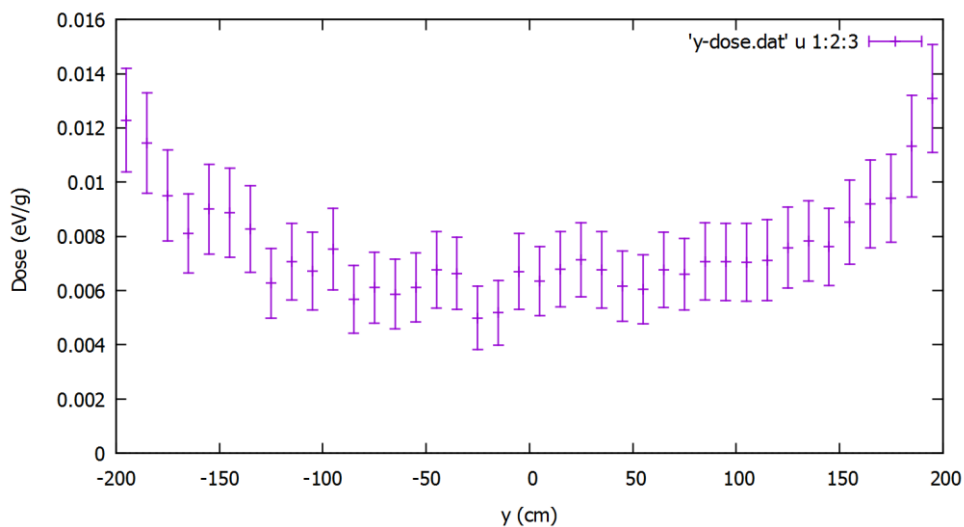
Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.11 φαίνεται η κατανομή της δόσης κατά τον x άξονα (για $y = 0$ και $z = 0$). Όπως είναι αναμενόμενο, η δόση για $x = -250cm$

($D_{-250cm}^{609keV} \cong 0.009 \text{ eV}/(\text{g} \cdot \text{φωτόνιο})$) είναι μικρότερη από τη δόση για $x = +250\text{cm}$ ($D_{+250cm}^{609keV} \cong 0.012 \text{ eV}/(\text{g} \cdot \text{φωτόνιο})$) αφού η θέση $x = -250\text{cm}$ βρίσκεται δίπλα στο παράθυρο, ενώ αντιδιαμετρικά βρίσκεται ο τοίχος κατά την x διεύθυνση.

Στο Σχήμα 3.12, φαίνεται η κατανομή της δόσης κατά τον y άξονα (για $x = 0$ και $z = 0$). Σε αυτήν την περίπτωση οι δόσεις “αριστερά” και “δεξιά” είναι παραπλήσιες ($D_{-200cm}^{609keV} \cong D_{+200cm}^{609keV} \cong 0.012 \text{ eV}/(\text{g} \cdot \text{φωτόνιο})$), αφού κατά τον άξονα y δεν υπάρχουν ανοίγματα στους τοίχους.



Σχήμα 3.11: Η κατανομή της δόσης κατά τον x άξονα, για ενέργεια 609keV



Σχήμα 3.12: Η κατανομή της δόσης κατά τον y άξονα, για ενέργεια 609keV

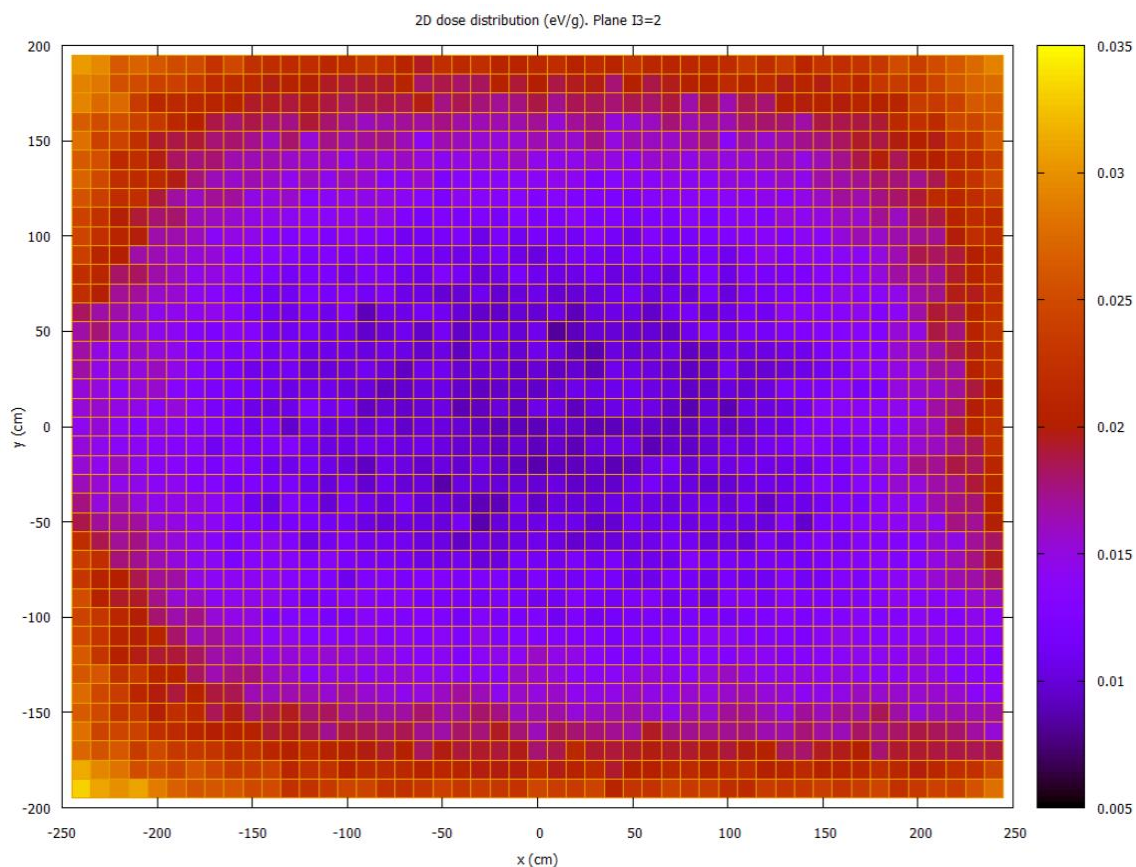
3.5.4 Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 1120keV

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η κατανομή της δόσης μέσα στο δωμάτιο εξαιτίας της εκπομπής φωτονίων ενέργειας 1120keV. Τα φωτόνια αυτά εκπέμπονται από το βραχύβιο θυγατρικό του ραδονίου, ^{214}Bi , που θεωρούμε ότι είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στο εσωτερικό των τοίχων, με ποσοστό εκπομπής 15.04%. Στην Εικόνα Β 5 του Παραρτήματος Β φαίνεται το αρχείο εισόδου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα Γ 4 του Παραρτήματος Γ. Η μέγιστη δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή είναι:

$$(33.0 \pm 3.2) \cdot 10^{-3} \text{ eV} / (\text{g} \cdot \text{φωτόνιο}) \quad (3.17)$$

Η δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο, εξαιτίας φωτονίων ενέργειας 1120keV, απεικονίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος *gnuplot* στο Σχήμα 3.13. Η δόση που αποτίθεται εξαιτίας των φωτονίων 1120keV είναι υψηλότερη από τη δόση εξαιτίας των φωτονίων 609keV που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 3.13: Δοσιμετρική κατανομή στο δωμάτιο – φωτόνια 1120keV

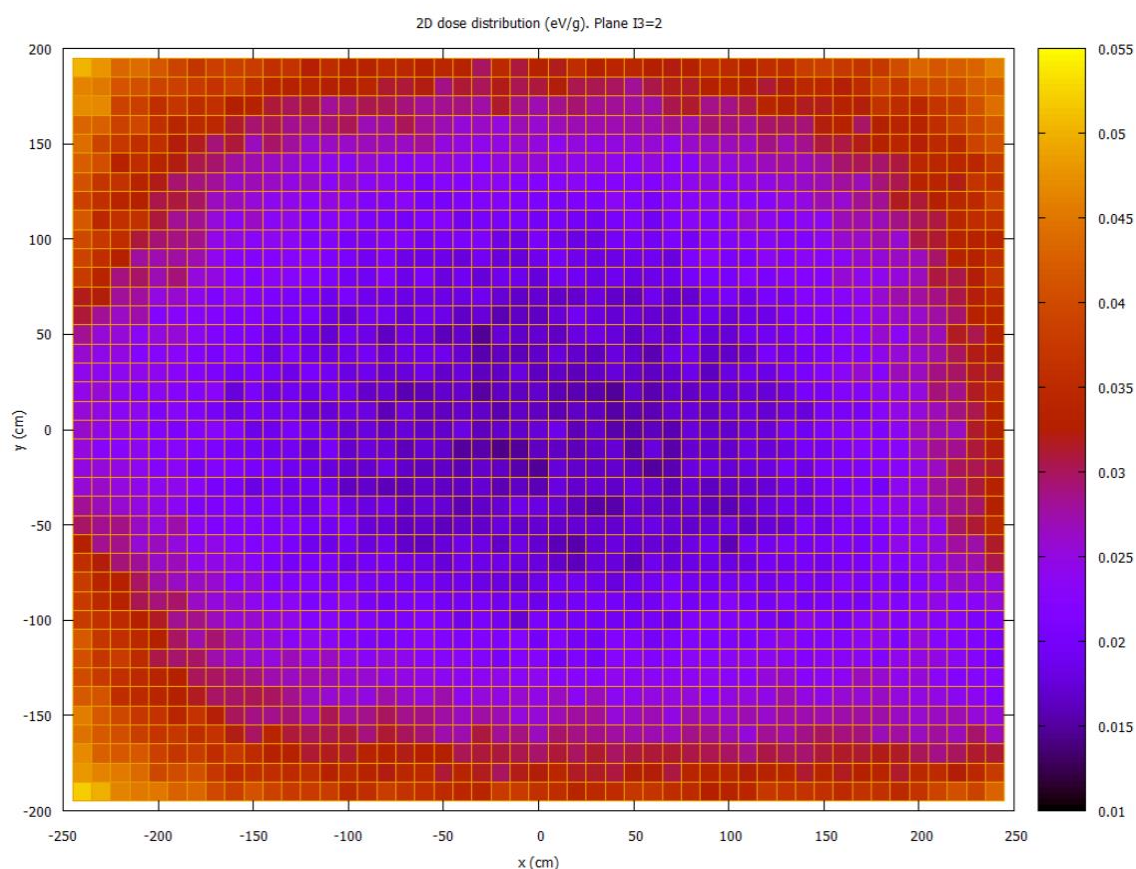
3.5.5 Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 1764keV

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η κατανομή της δόσης μέσα στο δωμάτιο εξαιτίας της εκπομπής φωτονίων ενέργειας 1764keV. Τα φωτόνια αυτά εκπέμπονται από το βραχύβιο θυγατρικό του ραδονίου, ^{214}Bi , που θεωρούμε ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο εσωτερικό των τοίχων, με ποσοστό εκπομπής 15.92%. Στην Εικόνα Β 6 του Παραρτήματος Β φαίνεται το αρχείο εισόδου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα Γ 5 του Παραρτήματος Γ. Η μέγιστη δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή είναι:

$$(51.8 \pm 4.4) \cdot 10^{-3} \text{ eV}/(\text{g} \cdot \text{φωτόνιο}) \quad (3.18)$$

Η δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο, εξαιτίας φωτονίων ενέργειας 1764keV, απεικονίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος *gnuplot* στο Σχήμα 3.14. Η δόση που αποτίθεται εξαιτίας των φωτονίων 1764keV είναι υψηλότερη από τις δόσεις εξαιτίας των φωτονίων 1120keV και 609keV που περιγράψαμε στις προηγούμενες παραγράφους.



Σχήμα 3.14: Δοσιμετρική κατανομή στο δωμάτιο – φωτόνια 1764keV

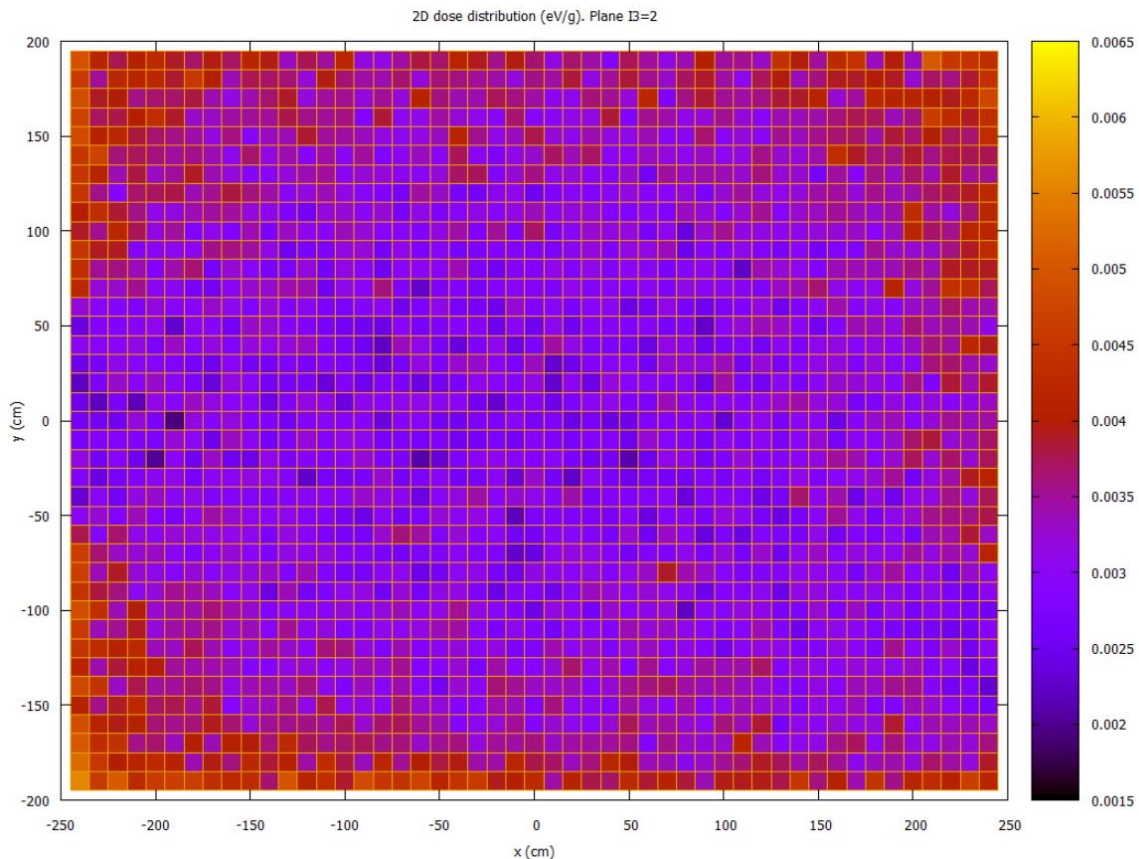
3.5.6 Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 239keV

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η κατανομή της δόσης μέσα στο δωμάτιο εξαιτίας της εκπομπής φωτονίων ενέργειας 239keV. Τα φωτόνια αυτά εκπέμπονται από το θυγατρικό του ραδονίου, ^{212}Pb , που θεωρούμε ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο εσωτερικό των τοίχων, με ποσοστό εκπομπής 43.10%. Στην Εικόνα Β 7 του Παραρτήματος Β φαίνεται το αρχείο εισόδου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα Γ 6 του Παραρτήματος Γ. Η μέγιστη δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή είναι:

$$(6.1 \pm 1.3) \cdot 10^{-3} \text{ eV}/(\text{g} \cdot \text{φωτόνιο}) \quad (3.19)$$

Η δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο, εξαιτίας φωτονίων ενέργειας 239keV, απεικονίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος *gnuplot* στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Δοσιμετρική κατανομή στο δωμάτιο – φωτόνια 239keV

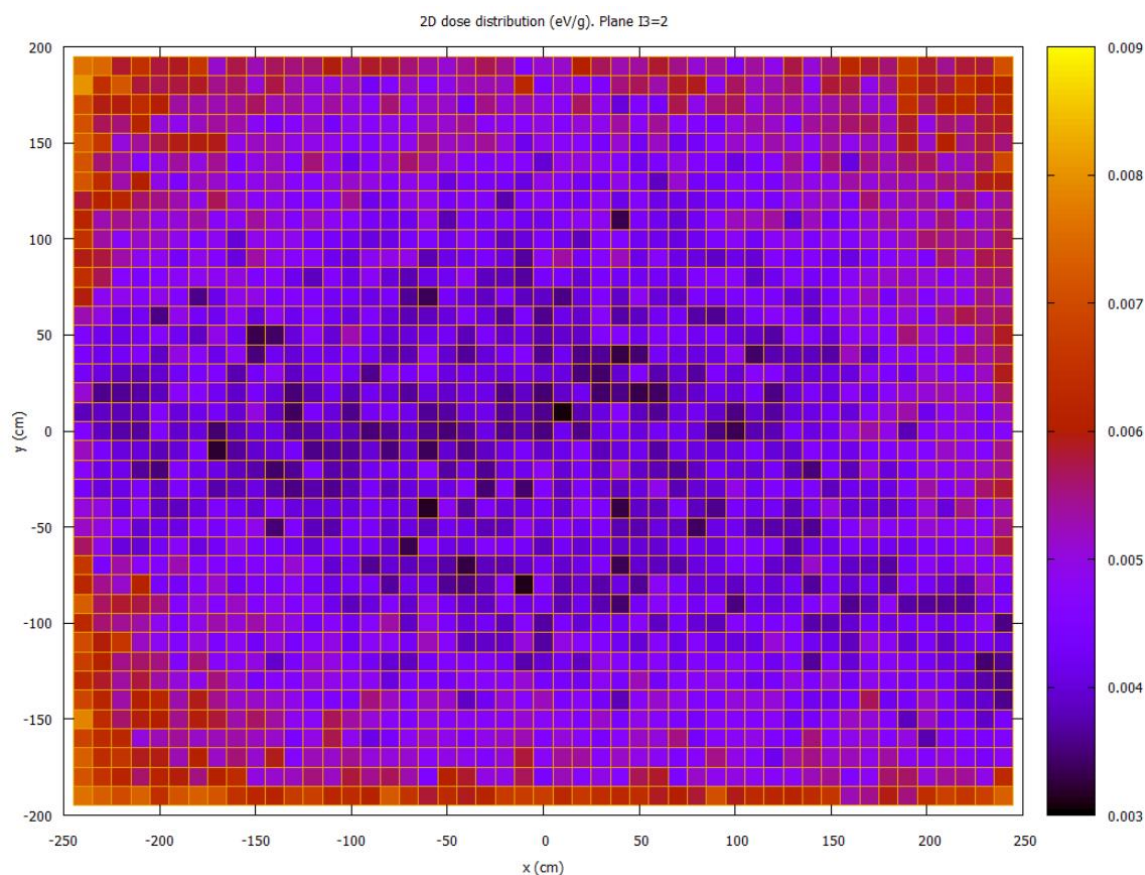
3.5.7 Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 338keV

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η κατανομή της δόσης μέσα στο δωμάτιο εξαιτίας της εκπομπής φωτονίων ενέργειας 338keV. Τα φωτόνια αυτά εκπέμπονται από το θυγατρικό του ραδίου, ^{228}Ac , που θεωρούμε ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο εσωτερικό των τοίχων, με ποσοστό εκπομπής 12.01%. Στην Εικόνα Β 8 του Παραρτήματος Β φαίνεται το αρχείο εισόδου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα Γ 7 του Παραρτήματος Γ. Η μέγιστη δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή είναι:

$$(8.0 \pm 1.5) \cdot 10^{-3} \text{ eV}/(\text{g} \cdot \text{φωτόνιο}) \quad (3.20)$$

Η δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο, εξαιτίας φωτονίων ενέργειας 338keV, απεικονίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος *gnuplot* στο Σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.16: Δοσιμετρική κατανομή στο δωμάτιο – φωτόνια 338keV

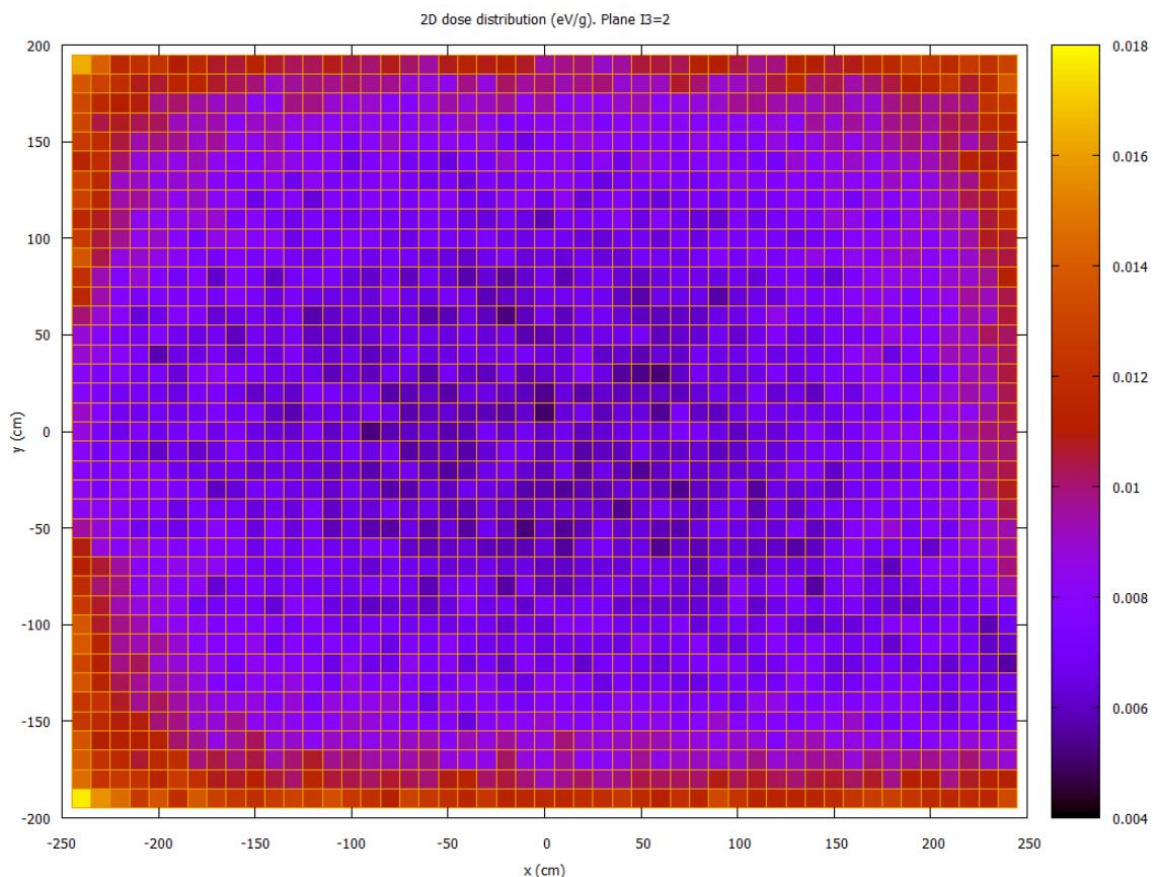
3.5.8 Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 583keV

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η κατανομή της δόσης μέσα στο δωμάτιο εξαιτίας της εκπομπής φωτονίων ενέργειας 583keV. Τα φωτόνια αυτά εκπέμπονται από το θυγατρικό του ραδονίου, ^{208}Tl , που θεωρούμε ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο εσωτερικό των τοίχων, με ποσοστό εκπομπής 86.50%. Στην Εικόνα Β 9 του Παραρτήματος Β φαίνεται το αρχείο εισόδου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα Γ 8 του Παραρτήματος Γ. Η μέγιστη δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή είναι:

$$(17.6 \pm 2.4) \cdot 10^{-3} \text{ eV}/(\text{g} \cdot \text{φωτόνιο}) \quad (3.21)$$

Η δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο, εξαιτίας φωτονίων ενέργειας 583keV, απεικονίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος *gnuplot* στο Σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.17: Δοσιμετρική κατανομή στο δωμάτιο – φωτόνια 583keV

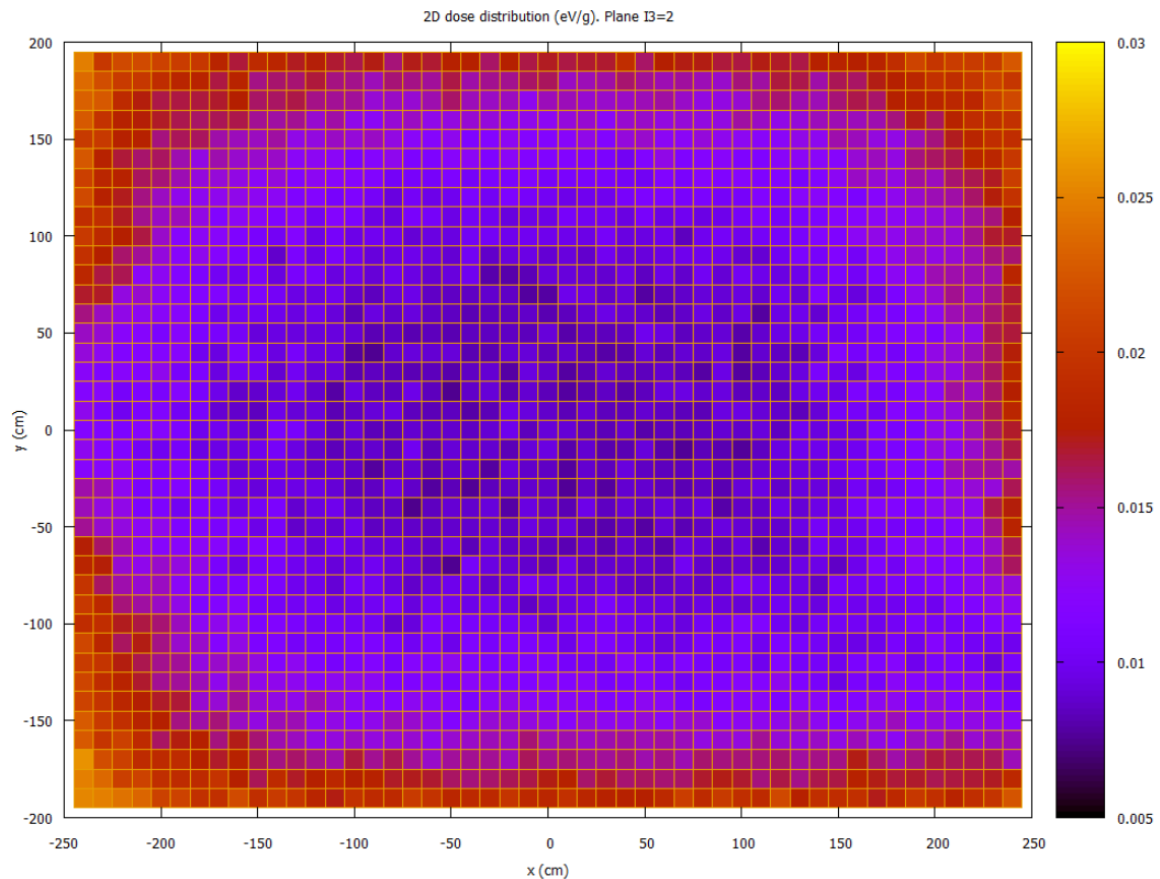
3.5.9 Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 911keV

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η κατανομή της δόσης μέσα στο δωμάτιο εξαιτίας της εκπομπής φωτονίων ενέργειας 911keV. Τα φωτόνια αυτά εκπέμπονται από το θυγατρικό του ραδίου, ^{228}Ac , που θεωρούμε ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο εσωτερικό των τοίχων, με ποσοστό εκπομπής 29.0%. Στην Εικόνα Β 10 του Παραρτήματος Β φαίνεται το αρχείο εισόδου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα Γ 9 του Παραρτήματος Γ. Η μέγιστη δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή είναι:

$$(28.0 \pm 3.0) \cdot 10^{-3} \text{ eV}/(\text{g} \cdot \text{φωτόνιο}) \quad (3.22)$$

Η δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο, εξαιτίας φωτονίων ενέργειας 911keV, απεικονίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος *gnuplot* στο Σχήμα 3.18.



Σχήμα 3.18: Δοσιμετρική κατανομή στο δωμάτιο – φωτόνια 911keV

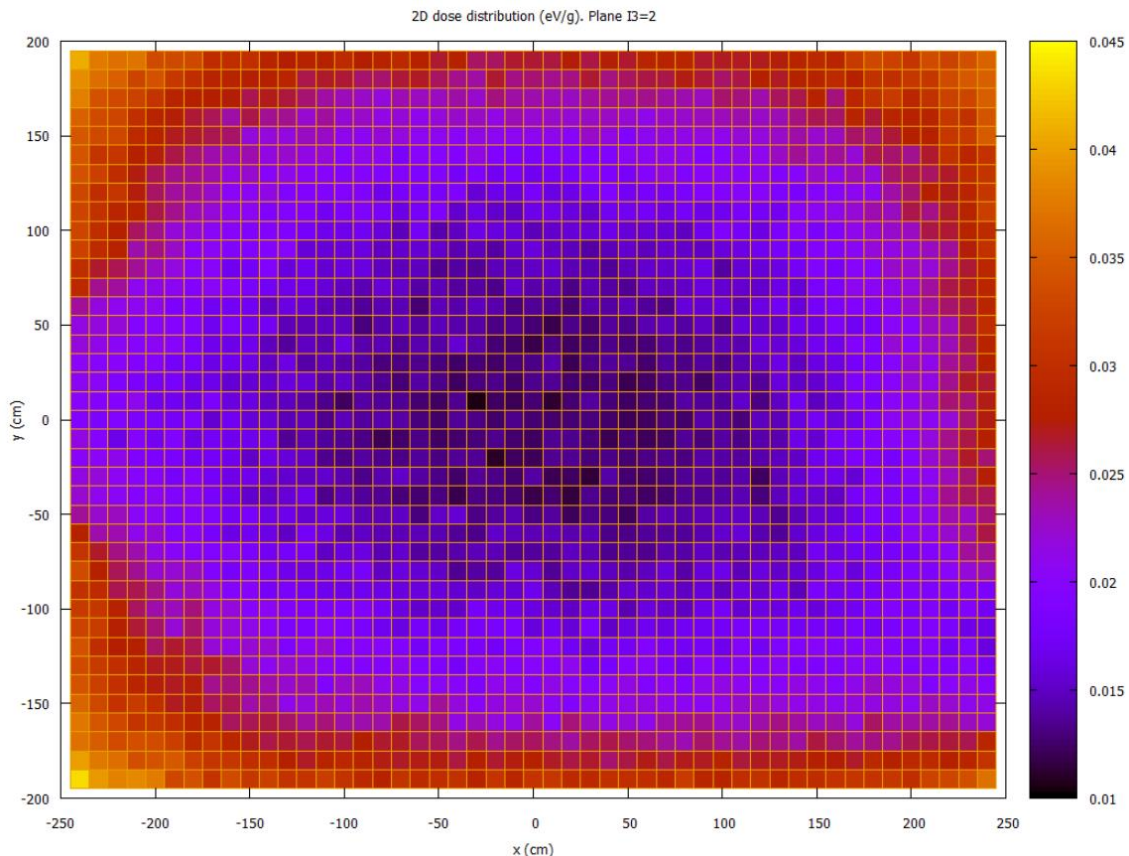
3.5.10 Δοσιμετρική κατανομή από φωτόνια 1460keV

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η κατανομή της δόσης μέσα στο δωμάτιο εξαιτίας της εκπομπής φωτονίων ενέργειας 1460keV. Τα φωτόνια αυτά εκπέμπονται από ασταθείς πυρήνες καλίου, που θεωρούμε ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι στο εσωτερικό των τοίχων, με ποσοστό εκπομπής 10.70%. Στην Εικόνα Β 11 του Παραρτήματος Β φαίνεται το αρχείο εισόδου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα Γ 10 του Παραρτήματος Γ. Η μέγιστη δόση που αποτίθεται στον ανιχνευτή είναι:

$$(43.8 \pm 3.9) \cdot 10^{-3} \text{ eV} / (\text{g} \cdot \text{φωτόνιο}) \quad (3.23)$$

Η δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο, εξαιτίας φωτονίων ενέργειας 1460keV, απεικονίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος *gnuplot* στο Σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19: Δοσιμετρική κατανομή στο δωμάτιο – φωτόνια 1460keV

3.5.11 Συνολική δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο

Σε αυτή την ενότητα θα εκτιμηθεί η μέση συνολική ετήσια δόση στο εσωτερικό του δωματίου και θα συγκριθεί με την αντίστοιχη βιβλιογραφική τιμή της τεχνικής έκθεσης *Radiation Protection 112* της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission, 1999). Για το σκοπό αυτό ελήφθησαν υπόψη τα $eV/(g \cdot \text{φωτόνιο})$ που καταγράφει κάθε ένα από τα κελιά του ανιχνευτή δόσης (2000 κελιά) για κάθε μία από τις ενέργειες της προσομοίωσης, τα ποσοστά εκπομπής των φωτονίων της προσομοίωσης (Πίνακας 3.1), οι συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων, ο όγκος του σκυροδέματος από τον οποίο αποτελείται το δωμάτιο και ο οποίος λειτουργεί ως πηγή όγκου, η πυκνότητα του σκυροδέματος, καθώς και ο ετήσιος χρόνος παραμονής στο δωμάτιο. Αφού πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της μέσης ετήσιας δόσης για κάθε ομάδα φωτονίων (των φωτονίων που εκπέμπονται από θυγατρικά της φυσικής ραδιενεργού σειράς του ^{238}U , της φυσικής ραδιενεργού σειράς του ^{232}Th , καθώς και του ραδιενεργού ^{40}K), τα αποτελέσματα αθροίζονται ώστε να προκύψει η συνολική μέση ετήσια δόση. Η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά ακολούθως.

	^{226}Ra			^{232}Th				^{40}K
Ενέργειες (keV)	609	1120	1764	239	338	583	911	1460
<i>j</i> (%)	46.09	15.04	15.92	43.10	12.01	86.50	29.00	10.70

Πίνακας 3.1: Τα ποσοστά εκπομπής *j* των φωτονίων της προσομοίωσης

Να σημειωθεί ότι το ^{226}Ra χρησιμοποιείται ως ισότοπο αναφοράς για τη ραδιενεργό σειρά του ^{238}U , ενώ το ^{232}Th ως ισότοπο αναφοράς για την αντίστοιχη ραδιενεργό σειρά.

Ο υπολογισμός της συνολικής μέσης ετήσιας δόσης θα γίνει με βάση τη σχέση:

$$D^{\text{ολική}}(mSv) = \sum_{i=Ra,Th,K} D_i(mSv) \quad (3.24)$$

όπου:

$D^{\text{ολική}}$ η συνολική μέση ετήσια δόση στο εσωτερικό του δωματίου,

D_{Ra} η μέση ετήσια δόση στο εσωτερικό του δωματίου που οφείλεται στα φωτόνια που εκπέμπει το βραχύβιο θυγατρικό του ραδονίου, ^{214}Bi (609keV, 1120keV, 1764keV), το οποίο ανήκει στη φυσική ραδιενεργό σειρά του ^{238}U ,

D_{Th} η μέση ετήσια δόση στο εσωτερικό του δωματίου που οφείλεται στα φωτόνια που εκπέμπουν το θυγατρικό ^{228}Ac (338keV , 911keV) του ραδίου καθώς και τα θυγατρικά ^{212}Pb (239keV) και ^{208}Tl (583keV) του ραδονίου, τα οποία ανήκουν στη φυσική ραδιενεργό σειρά του ^{232}Th ,

και D_K η μέση ετήσια δόση στο εσωτερικό του δωματίου που οφείλεται στα φωτόνια που εκπέμπει το ραδιενεργό ^{40}K (1460keV).

Αναλυτικά, το D_{Ra} (mSv) δίνεται από τη σχέση:

$$D_{Ra}(mSv) = \sum_{k=1}^3 \left\{ \frac{1}{2000} \sum_{l=1}^{2000} D_l^{\text{προσομ}} \left(\frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \right) \times j_k^{Ra} \left(\frac{\text{φωτόνιο}}{\text{διάσπαση}} \right) \right. \\ \times A_{Ra} \left(\frac{\text{διάσπαση}/s}{kg} \right) \times V_{concrete}(m^3) \times \rho_{concrete} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times \Delta t(s) \quad (3.25) \\ \left. \times 1.1214 \times 10^{-13} \left(\frac{g}{eV} mSv \right) \right\}$$

όπου $D_l^{\text{προσομ}}$ η δόση στο εσωτερικό του δωματίου που καταγράφει κάθε ένα από τα κελιά του ανιχνευτή δόσης (2000 κελιά), j_k^{Ra} , $k = 1,2,3$ οι συντελεστές εκπομπής για τις τρεις ενέργειες που εκπέμπονται από το θυγατρικό ^{214}Bi , της σειρά του ^{238}U , (609keV , 1120keV , 1764keV) όπως αυτοί δίνονται στον Πίνακα 3.1, $A_{Ra} = 40 \frac{Bq}{kg}$ η τυπική συγκέντρωση του ^{226}Ra στα οικοδομικά υλικά (European Commission, 1999), $V_{concrete}$ ο συνολικός όγκος του σκυροδέματος που εκπέμπει ραδιενέργεια, $\rho_{concrete} = 2350 \frac{kg}{m^3}$ η πυκνότητα του σκυροδέματος, $\Delta t = 7000h$ ο χρόνος έκθεσης (European Commission, 1999) και $1.1214 \times 10^{-13} = 1,602 \times 10^{-16} \times 0.7 \times 10^3 \left(\frac{g}{eV} mSv \right)$ ο συντελεστής μετατροπής των eV/g σε mSv , λαμβάνοντας υπόψη ότι $1Gy = 0.7Sv$.

Ενδεικτικά, παραθέτουμε έναν αναλυτικό υπολογισμό, χρησιμοποιώντας τρεις τυχαίες τιμές δόσης σε $\frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}}$, μία από κάθε προσομοίωση:

$$\begin{aligned}
D_{Ra}^{ENV\delta}(mSv) = & \left(1.614 \times 10^{-2} \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \times 0.4609 \frac{\text{φωτόνιο}}{\text{διάσπαση}} + 3.095 \right. \\
& \times 10^{-2} \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \times 0.1504 \frac{\text{φωτόνιο}}{\text{διάσπαση}} + 4.976 \\
& \left. \times 10^{-2} \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \times 0.1592 \frac{\text{φωτόνιο}}{\text{διάσπαση}} \right) \times 40 \frac{\text{διάσπαση}/s}{kg} \quad (3.26) \\
& \times 19.348 m^3 \times 2350 \frac{kg}{m^3} \times 7000 \times 3600s \times 1.1214 \\
& \times 10^{-13} \frac{g \cdot mSv}{eV} = 0.1028
\end{aligned}$$

Αντίστοιχα, για τα θυγατρικά που ανήκουν στη σειρά του ^{232}Th , η μέση ετήσια δόση δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned}
D_{Th}(mSv) = & \sum_{k=1}^4 \left\{ \frac{1}{2000} \sum_{m=1}^{2000} D_m^{\pi\rho\sigma\sigma\mu} \left(\frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \right) \times j_k^{Th} \left(\frac{\text{φωτόνιο}}{\text{διάσπαση}} \right) \right. \\
& \times A_{Th} \left(\frac{\text{διάσπαση}/s}{kg} \right) \times V_{concrete}(m^3) \times \rho_{concrete} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times \Delta t(s) \quad (3.27) \\
& \left. \times 1.1214 \times 10^{-13} \left(\frac{g}{eV} mSv \right) \right\}
\end{aligned}$$

όπου $D_m^{\pi\rho\sigma\sigma\mu}$ η δόση στο εσωτερικό του δωματίου που καταγράφει κάθε ένα από τα κελιά του ανιχνευτή δόσης (2000 κελιά), $j_k^{Th}, k = 1,2,3,4$ οι συντελεστές εκπομπής για τις τέσσερις ενέργειες που εκπέμπονται από θυγατρικά της σειρά του ^{232}Th (338keV, 911keV, 239keV και 583keV) όπως αυτοί δίνονται στον Πίνακα 3.1, $A_{Th} = 30 \frac{Bq}{kg}$ η τυπική συγκέντρωση του ^{232}Th στα οικοοικοδομικά υλικά (European Commission, 1999), $V_{concrete}$ ο συνολικός όγκος του σκυροδέματος που εκπέμπει ραδιενέργεια, $\rho_{concrete} = 2350 \frac{kg}{m^3}$ η πυκνότητα του σκυροδέματος, $\Delta t = 7000h$ ο χρόνος έκθεσης (European Commission, 1999) και $1.1214 \times 10^{-13} = 1,602 \times 10^{-16} \times 0.7 \times 10^3 \left(\frac{g}{eV} mSv \right)$ ο συντελεστής μετατροπής των eV/g σε mSv , λαμβάνοντας υπόψη ότι $1Gy = 0.7Sv$.

Ενδεικτικά, παραθέτουμε έναν αναλυτικό υπολογισμό για το ^{232}Th , χρησιμοποιώντας τέσσερις τυχαίες τιμές δόσης σε $\frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}}$, μία από κάθε προσομοίωση:

$$\begin{aligned}
D_{Th}^{\text{ενδ}}(mSv) = & \left(4.55 \times 10^{-3} \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \times 0.4310 \frac{\text{φωτόνιο}}{\text{διάσπαση}} + 7.28 \right. \\
& \times 10^{-3} \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \times 0.1201 \frac{\text{φωτόνιο}}{\text{διάσπαση}} + 1.56 \times 10^{-2} \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \\
& \times 0.8650 \frac{\text{φωτόνιο}}{\text{διάσπαση}} + 2.48 \times 10^{-2} \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \\
& \left. \times 0.2900 \frac{\text{φωτόνιο}}{\text{διάσπαση}} \right) \times 30 \frac{\text{διάσπαση}/s}{kg} \times 19.348 m^3 \times 2350 \frac{kg}{m^3} \\
& \times 7000 \times 3600s \times 1.1214 \times 10^{-13} \frac{g \cdot mSv}{eV} = 0.0907
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Τέλος, για το ^{40}K , η μέση ετήσια δόση δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned}
D_K(mSv) = & \frac{1}{2000} \sum_{n=1}^{2000} D_n^{\text{προσομ}} \left(\frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \right) \times j_K \left(\frac{\text{φωτόνιο}}{\text{διάσπαση}} \right) \\
& \times A_K \left(\frac{\text{διάσπαση}/s}{kg} \right) \times V_{\text{concrete}}(m^3) \times \rho_{\text{concrete}} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times \Delta t(s) \\
& \times 1.1214 \times 10^{-13} \left(\frac{g}{eV} mSv \right)
\end{aligned} \tag{3.29}$$

όπου $D_n^{\text{προσομ}}$ η δόση στο εσωτερικό του δωματίου που καταγράφει κάθε ένα από τα κελιά του ανιχνευτή δόσης (2000 κελιά), j_K ο συντελεστής εκπομπής για την ενέργεια του ^{40}K (1460keV) όπως αυτός δίνεται στον Πίνακα 3.1, $A_K = 400 \frac{Bq}{kg}$ η τυπική συγκέντρωση του ^{40}K στα οικοδομικά υλικά (European Commission, 1999), V_{concrete} ο συνολικός όγκος του σκυροδέματος που εκπέμπει ραδιενέργεια, $\rho_{\text{concrete}} = 2350 \frac{kg}{m^3}$ η πυκνότητα του σκυροδέματος, $\Delta t = 7000h$ ο χρόνος έκθεσης (European Commission, 1999) και $1.1214 \times 10^{-13} = 1,602 \times 10^{-16} \times 0.7 \times 10^3 \left(\frac{g}{eV} mSv \right)$ ο συντελεστής μετατροπής των eV/g σε mSv , λαμβάνοντας υπόψη ότι $1Gy = 0.7Sv$.

Ενδεικτικά, παραθέτουμε έναν αναλυτικό υπολογισμό για το ^{40}K , χρησιμοποιώντας μία τυχαία τιμή της δόσης σε $\frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}}$:

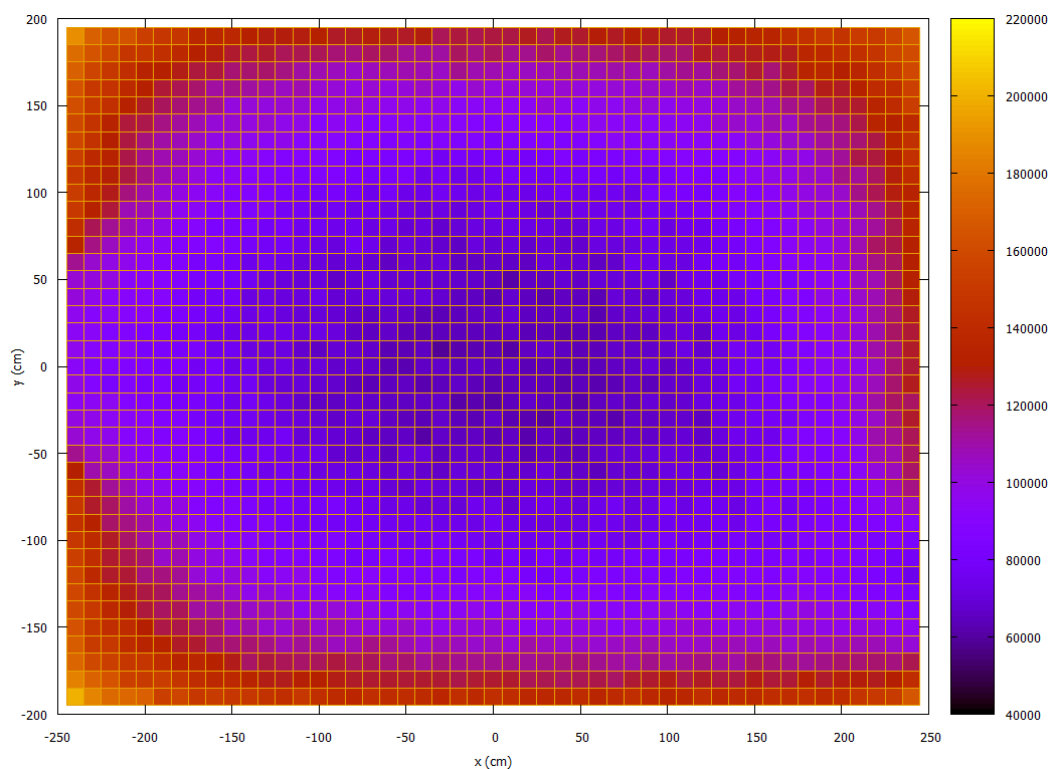
$$\begin{aligned}
D_K^{\text{ενδ}}(mSv) = & \left(3.21 \times 10^{-2} \frac{eV}{g \cdot \text{φωτόνιο}} \times 0.107 \frac{\text{φωτόνιο}}{\text{διάσπαση}} \right) \times 400 \frac{\text{διάσπαση}/s}{kg} \\
& \times 19.348 m^3 \times 2350 \frac{kg}{m^3} \times 7000 \times 3600s \times 1.1214 \\
& \times 10^{-13} \frac{g \cdot mSv}{eV} = 0.1764
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Ο συνολικός όγκος του σκυροδέματος είναι:

$$\begin{aligned}
 V_{concrete} &= V_{συμπαγές\ κουτί} - V_{εσωτερικό} - V_{παράθυρο} - V_{πόρτα} \\
 &= 5.4m \times 4.4m \times 3.2m - 5m \times 4m \times 2.8m - 1.2m \times 1.2m \times 0.2m \\
 &\quad - 0.9m \times 2.2m \times 0.2m = 19.348m^3
 \end{aligned} \quad (3.31)$$

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *Libre Office Calc* 5.3.

Τα δεδομένα για τη συνολική δόση (2000 κελιά) όπως υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα *Libre Office Calc* 5.3 εισήχθησαν σε ένα νέο αρχείο και με το πρόγραμμα *gnuplot* πραγματοποιήθηκε η οπτική αναπαράσταση της κατανομής του συνολικού ρυθμού δόσης $eV/(g \cdot s)$ μέσα στο δωμάτιο (Σχήμα 3.20).



Σχήμα 3.20: Η κατανομή του ρυθμού δόσης $eV/(g \cdot s)$ μέσα στο δωμάτιο από την επαλληλία και των οκτώ ενεργειών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις

Για τα θυγατρικά της σειράς του ^{238}U , η μέση τιμή της ετήσιας δόσης προκύπτει:

$$D_{Ra}(mSv) = 0.0529 \quad (3.32)$$

Για τα θυγατρικά της σειράς του ^{232}Th , η μέση τιμή της ετήσιας δόσης προκύπτει:

$$D_{Th}(mSv) = 0.0486 \quad (3.33)$$

Για το ^{40}K , η μέση τιμή της ετήσιας δόσης προκύπτει:

$$D_K(mSv) = 0.1142 \quad (3.34)$$

Από τις Σχέσεις (3.32), (3.33), (3.34), η σχέση (3.24) γίνεται:

$$D^{ολική}(mSv) = 0.2158 \quad (3.35)$$

Προκειμένου να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα της μέσης συνολικής ετήσιας δόσης, ακολουθούμε αντίστοιχη διαδικασία με την παραπάνω, για τις αβεβαιότητες που μας δίνει η προσομοίωση. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε και πάλι το πρόγραμμα *Libre Office Calc* 5.3.

Για τα θυγατρικά της σειράς του ^{238}U , η μέση τιμή της αβεβαιότητας προκύπτει:

$$\delta D_{Ra}(mSv) = 0.0078 \quad (3.36)$$

Για τα θυγατρικά της σειράς του ^{232}Th , η μέση τιμή της αβεβαιότητας προκύπτει:

$$\delta D_{Th}(mSv) = 0.0091 \quad (3.37)$$

Για το ^{40}K , η μέση τιμή της αβεβαιότητας προκύπτει:

$$\delta D_K(mSv) = 0.0144 \quad (3.38)$$

Η συνολική αβεβαιότητα είναι:

$$\delta D^{ολική}(mSv) = 0.0313 \quad (3.39)$$

Συνεπώς, η μέση συνολική ετήσια δόση, με βάση τις Σχέσεις (3.35) και (3.39) διαμορφώνεται ως εξής:

$$D^{ολική}(mSv) = 0.2158 \pm 0.0313 \approx 0.22 \pm 0.03 \quad (3.40)$$

Σύμφωνα με την τεχνική έκθεση *Radiation Protection 112* της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission, 1999), για τις συγκεντρώσεις των ισοτόπων που χρησιμοποιήσαμε παραπάνω και προκειμένου να ικανοποιείται το κριτήριο δόσης, η συνολική ετήσια δόση (πέραν του υποβάθρου), είναι:

$$D_{rp112}^{ολική}(mSv) = 0.25 \quad (3.41)$$

Παρατηρούμε ότι το αποτέλεσμα του υπολογισμού μας - Σχέση (3.40) - είναι λίγο μικρότερο από τη βιβλιογραφική τιμή που χρησιμοποιήσαμε ως τιμή αναφοράς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην προσομοίωση δεν χρησιμοποιήσαμε το συνολικό πλήθος των ενεργειών που εκπέμπονται από τις φυσικές ραδιενεργές σειρές, παρά μόνο οκτώ ενέργειες. Επιπλέον, η γεωμετρία που χρησιμοποιήσαμε περιλαμβάνει και δύο ανοίγματα

στους τοίχους (πόρτα και παράθυρο), σε αντίθεση με τη γεωμετρία στην οποία βασίζεται το αποτέλεσμα της τεχνικής έκθεσης *Radiation Protection 112* από όπου απουσιάζουν πόρτες ή παράθυρα. Αυτό έχει σαν συνέπεια την απόθεση και καταγραφή χαμηλότερων δόσεων καθώς ο συνολικός όγκος των πηγών όγκου εμφανίζεται μειωμένος. Πάντως, εάν ληφθεί υπόψη και η στατιστική αβεβαιότητα που συνοδεύει τον υπολογισμό, είναι προφανές πως η βιβλιογραφική τιμή βρίσκεται εντός των ορίων της στατιστικής αβεβαιότητας και ως εκ τούτου η εκτίμηση της δόσης με τη βοήθεια της προσομοίωσης συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με την τιμή της βιβλιογραφίας.

4 Συμπεράσματα – Προτάσεις για το μέλλον

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ήταν η εκτίμηση της δοσιμετρικής κατανομής μέσα σε ένα δωμάτιο τυπικών διαστάσεων, εξαιτίας της ραδιενέργειας των οικοδομικών υλικών. Η δοσιμετρική αυτή κατανομή πραγματοποιήθηκε με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo και συγκεκριμένα με χρήση του κώδικα PENELOPE 2011. Ο κώδικας αυτός αντλεί πληροφορίες από τρία αρχεία: το αρχείο γεωμετρίας, το αρχείο εισόδου και το αρχείο υλικών.

Το αρχείο γεωμετρίας περιέχει πληροφορίες για τη γεωμετρική κατασκευή στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις. Πρόκειται για μία αρκετά πολύπλοκη γεωμετρία: ένα δωμάτιο με εσωτερικές διαστάσεις $5m \times 4m \times 2.8m$, με πάχος τοίχων, οροφής και δαπέδου $20cm$. Διαθέτει πόρτα και παράθυρο, ενώ για την κατασκευή του απαιτήθηκε η δημιουργία δεκατριών σωμάτων.

Στο αρχείο εισόδου εισήχθησαν πληροφορίες που αφορούν στην πηγή και ορίστηκαν οι εικονικοί ανιχνευτές. Ως πηγές όγκου ορίστηκαν τα προαναφερθέντα δεκατρία σώματα που συναποτελούν το δωμάτιο. Ο κώδικας προσομοίωσης, με τη βοήθεια των “τυχαίων” αριθμών, κατανέμει ομοιόμορφα, σε όλο τον όγκο των πηγών, τους ασταθείς πυρήνες και υπολογίζει τις τροχιές και τις πιθανές αλληλεπιδράσεις καθενός από τα εκπεμπόμενα φωτόνια με τα δομικά συστατικά της ύλης. Στο εσωτερικό του δωματίου και σε απόσταση $140cm$ από το δάπεδο εκτείνεται σε όλο το μήκος και πλάτος του δωματίου ο ανιχνευτής δόσης, με το υλικό του οποίου αλληλεπιδρούν τα εκπεμπόμενα από τις πηγές όγκου φωτόνια (καθώς και πιθανά δευτερογενή σώματα), αποθέτοντας την ενέργειά τους. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκε η αποτιθέμενη ενέργεια στο χώρο και έγινε η εκτίμηση της δόσης.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν οκτώ προσομοιώσεις: μία για κάθε ενέργεια εκπεμπόμενων φωτονίων. Αυτές τις ενέργειες τις επικαλείται η βιβλιογραφία ως τις ενέργειες με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη δόση και από την επαλληλία αυτών προέκυψε, τελικά, η

συνολική δόση μέσα στο δωμάτιο. Οι τρεις από αυτές τις ενέργειες εκπέμπονται από το βραχύβιο θυγατρικό του ραδονίου, ^{214}Bi (609keV , 1120keV , 1764keV), το οποίο ανήκει στη φυσική ραδιενεργό σειρά του ^{238}U . Οι τέσσερις επόμενες εκπέμπονται από το θυγατρικό πυρήνα ^{228}Ac (338keV , 911keV) του ραδίου, καθώς και τους θυγατρικούς πυρήνες ^{212}Pb (239keV) και ^{208}Tl (583keV) του ραδονίου, οι οποίοι ανήκουν στη φυσική ραδιενεργό σειρά του ^{232}Th . Η όγδοη είναι η ενέργεια που εκπέμπεται από το ραδιενεργό ^{40}K (1460keV). Για κάθε μία από τις οκτώ αυτές ενέργειες, ο κώδικας της προσομοίωσης υπολόγισε τη δοσιμετρική κατανομή στο δωμάτιο. Η οπτική απεικόνιση των κατανομών πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος *gnuplot*.

Η γενική εικόνα που αποκομίζουμε είναι ότι όσο απομακρυνόμαστε από κάποιο τοίχο η αποτιθέμενη δόση μειώνεται. Πιο συγκεκριμένα, στο εσωτερικό του δωματίου, η αποτιθέμενη δόση στον αέρα παίρνει τις υψηλότερες τιμές της κοντά στους τοίχους και ιδιαίτερα στις τρεις από τις τέσσερις γωνίες του δωματίου.

Η αποτιθέμενη ενέργεια είναι σημαντικά μικρότερη κοντά στις περιοχές όπου υπάρχουν ανοίγματα στους τοίχους (πόρτα και παράθυρο), αφού αυτές οι περιοχές εκτίθενται λιγότερο σε ακτινοβολία. Αυτό εξηγεί το γεγονός ότι στην τέταρτη γωνία του δωματίου, η οποία βρίσκεται κοντά στην πόρτα, δεν καταγράφεται το ίδιο υψηλή δόση όπως στις άλλες τρεις γωνίες.

Για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας δόσης, ελήφθησαν υπόψη οι συντελεστές εκπομπής των φωτονίων που εκπέμπονται από τους θυγατρικούς πυρήνες των φυσικών ραδιενεργών σειρών του ^{238}U και του ^{232}Th , καθώς και από το ραδιενεργό ^{40}K , ενώ θεωρήθηκε ότι ο μέσος χρόνος διαμονής του πληθυσμού στο εσωτερικό των κτηρίων ανέρχεται στις 7000 ώρες ετησίως.

Η μέση συνολική ετήσια δόση εκτιμάται στα 0.2158mSv . Η αβεβαιότητα που συνοδεύει τη μέτρηση υπολογίζεται, με βάση τις τιμές των αβεβαιοτήτων που μας παρέχει ο κώδικας προσομοίωσης, σε κάθε μία από τις οκτώ προσομοιώσεις, στα 0.0313mSv . Συνεπώς, η μέση συνολική ετήσια δόση εκτιμάται στα $(0.22 \pm 0.03)\text{mSv}$.

Η τιμή αυτή της μέσης συνολικής ετήσιας δόσης συγκρίθηκε με τη βιβλιογραφική τιμή των 0.25mSv που αντλήθηκε από την τεχνική έκθεση *Radiation Protection 112* της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η τιμή των 0.22mSv που υπολογίστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν αναμενόμενο να βρίσκεται λίγο χαμηλότερα από τη βιβλιογραφική τιμή καθώς στην προσομοίωση δεν λήφθηκε υπόψη το συνολικό πλήθος των ενεργειών που εκπέμπονται, παρά μόνο οκτώ ενέργειες. Επιπλέον, η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει και δύο ανοίγματα στους τοίχους (πόρτα και παράθυρο), σε αντίθεση με τη γεωμετρία στην

οποία βασίζεται το αποτέλεσμα της τεχνικής έκθεσης *Radiation Protection 112* από όπου απουσιάζουν πόρτες ή παράθυρα. Αυτό έχει σαν συνέπεια την απόθεση και καταγραφή χαμηλότερων δόσεων καθώς ο συνολικός όγκος των πηγών όγκου εμφανίζεται μειωμένος. Πάντως, η βιβλιογραφική τιμή βρίσκεται εντός των ορίων της στατιστικής αβεβαιότητας που συνοδεύει τον υπολογισμό μας.

Η κατασκευή της γεωμετρίας, στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αποτελεί ένα βήμα προς την κατεύθυνση της διερεύνησης ζητημάτων ακτινοπροστασίας και μπορεί να αποτελέσει την απαρχή μιας σειράς μελλοντικών διπλωματικών εργασιών που θα διερευνήσουν περαιτέρω το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο.

Μία πρόταση για κάποια μελλοντική Διπλωματική Εργασία θα ήταν να εξεταστεί σε τι βαθμό η συγκεκριμένη γεωμετρία θωρακίζει έναντι της ακτινοβολίας του εδάφους. Τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελούνται οι κατασκευές λειτουργούν ως πηγές ακτινοβολίας, από την άλλη πλευρά, όμως, δρουν και ως ασπίδα έναντι της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από εξωτερικές πηγές. Θα μπορούσε να εκτιμηθεί η κατανομή της δόσης στο δωμάτιο, εξαιτίας της ακτινοβολίας του εδάφους, για διάφορα πάχη τοίχων, οροφής και δαπέδου και έπειτα να επαληθευτεί το βιβλιογραφικό όριο (πάχος δομικών στοιχείων ~40cm) της πλήρους θωράκισης. Κάτι αντίστοιχο θα μπορούσε να γίνει και για τη δευτερογενή (φωτονιακή) ακτινοβολία κοσμικής προέλευσης, αν και η επίδρασή της στη δόση αναμένεται να είναι αμελητέα σε σχέση με την ακτινοβολία του εδάφους.

Μία ακόμα πρόταση θα ήταν να μελετηθεί η δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο, λαμβάνοντας υπόψη και την ύπαρξη γειτονικών δωματίων. Κάτι τέτοιο θα αντιπροσώπευε σε μεγαλύτερο βαθμό μία τυπική κατάσταση αστικής δόμησης. Η ύπαρξη γειτονικών δωματίων αναμένεται να επηρεάζει τη δόση που αποτίθεται στο προς μελέτη δωμάτιο, αφού για πάχος δομικών στοιχείων μικρότερο των 40cm η απορρόφηση των φωτονίων από το υλικό των τοίχων δεν είναι πλήρης, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία από τα γειτονικά δωμάτια να αποκόπτεται μερικώς και όχι πλήρως.

Θα μπορούσε, επίσης, να διερευνηθεί το κατά πόσο επηρεάζει τη δοσιμετρική κατανομή μέσα στο δωμάτιο και η επίδραση των υπολοίπων φωτονίων που εκπέμπονται, πέραν των οκτώ φωτονίων που παρουσιάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Ακόμα, θα μπορούσε να εξεταστεί και η επίδραση στη δόση των σωματίων β^- που εκπέμπονται από τα οικοδομικά υλικά, καθώς και η επίδραση της ακτινοβολίας πέδησης (ακτίνες X) που παράγουν τα σωματίδια β^- κατά την επιβράδυσή τους στην ύλη. Σημαντικό ρόλο, τέλος, παίζει και η ύπαρξη υλικών επικάλυψης σε δάπεδο και τοίχους. Στο παρόν αρχείο γεωμετρίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχει γίνει πρόβλεψη για τη μελλοντική προσθήκη

υλικού επικάλυψης στο δάπεδο (υπάρχει έτοιμο σώμα το οποίο στην παρούσα εργασία αποτελείται από σκυρόδεμα και εκπέμπει φωτόνια ίδιας ενέργειας με τα φωτόνια που εκπέμπονται από τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία του δωματίου). Τα υλικά επικάλυψης (πλακάκια) ενδέχεται να εκπέμπουν περισσότερα σωμάτια β^- σε σχέση με το σκυρόδεμα, καθότι συχνά περιέχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις ^{210}Pb . Με δεδομένο ότι η εμβέλεια των σωματίων β^- είναι περιορισμένη (εξαρτάται από την ενέργειά τους) αναμένεται η επίδρασή τους να είναι εντονότερη κοντά στους τοίχους.

Επίσης, θα μπορούσε να εκτιμηθεί και η επίδραση της ακτινοβολίας σε μία σειρά από διαφορετικά υλικά, πέραν του αέρα. Η απόθεση ενέργειας σε ανθρώπινο ιστό, για παράδειγμα, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Τέλος, ένα ζήτημα που χρήζει βελτίωσης αφορά στην ταχύτητα με την οποία πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας, από τη μία πλευρά, και η πεπερασμένη επεξεργαστική ισχύς, από την άλλη, αποτελούν εμπόδιο στη γρήγορη εκτέλεση του κώδικα. Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (για την πλέον πολύπλοκη γεωμετρία του δωματίου), η χρονική διάρκεια των προσομοιώσεων κυμάνθηκε μεταξύ οκτώ και δέκα ημερών, η κάθε μία. Ένας τρόπος επιτάχυνσης της διαδικασίας θα ήταν να οριστούν, στα αρχεία εισόδου της προσομοίωσης, μεγαλύτερες τιμές για τις ενέργειες αποκοπής. Κάτι τέτοιο, όμως, ενδεχομένως να οδηγούσε στο να αμεληθούν ορισμένα φωτόνια ακτίνων X που παράγονται δευτερογενώς, με αποτέλεσμα να χαθεί πληροφορία. Θα μπορούσαν, ωστόσο, να επιλεγούν μέσω δοκιμών οι καταλληλότερες τιμές των ενεργειών αποκοπής, ώστε να διασφαλιστεί η βέλτιστη δυνατή σχέση αξιοπιστίας - απόδοσης.

Βιβλιογραφία

Επιστημονικά άρθρα

M.J. Anagnostakis, E.P. Hinis, S.E. Simopoulos and M.G. Angelopoulos, 1996, *Natural radioactivity mapping of Greek surface soils*, Elsevier Science, Environment International, Vol. 22, pp. 0-8

M.J. Anagnostakis and S.E. Simopoulos, 1995, *An experimental numerical method for the efficiency calibration of low energy germanium detectors*, Elsevier Science, Environment International, Vol. 22, pp. 0-99

M.J. Anagnostakis and S.E. Simopoulos, 1994, *Efficiency calibration for low energy germanium detectors*, E. Giakoumakis, M.J. Anagnostakis and N.P. Petropoulos (Eds), In Proceedings of 1st Mediterranean Congress on Radiation Protection 5-7 April 1994, pp. 273-290

M.J. Anagnostakis, E.P. Hinis, S.E. Simopoulos and M.G. Angelopoulos, 1994, *Natural radioactivity mapping of Greek surface soils*, E. Giakoumakis, M.J. Anagnostakis and N.P. Petropoulos (Eds), In Proceedings of 1st Mediterranean Congress on Radiation Protection 5-7 April 1994, pp. 219-232

D. Amrani, M. Tahtat, 2000, *Natural radioactivity in Algerian building materials*, Elsevier Science, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 54, pp. 687-689

F.S. Al-Saleh and B. Al-Berzan, 2007, *Measurements of natural radioactivity in some kinds of marble and granite used in Riyadh region*, Journal of Nuclear and Radiation Physics, Vol. 2, pp. 25-36

- O. Baykara, S. Karatepe, M. Dogru, 2010, Assessments of natural radioactivity and radiological hazards in construction materials used in Elazig, Turkey, Elsevier Science, *Radiation Measurements*, Vol. 46, pp. 153-158
- L. Bruzzi, M. Baroni, G. Mazzoti, R. Mele and S. Righi, 2000, *Radioactivity in raw materials and end products in the Italian ceramics industry*, Elsevier Science, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 47, pp. 171-181
- European Commission, 1999, Radiation Protection 112 – Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, Directorate – General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection
- N.W. El-Dine, A. El-Shershaby, F. Ahmed and A.S. Abdel-Haleem, *Measurement of radioactivity and radon exhalation rate in different kinds of marbles and granites*, Elsevier Science, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 55, pp. 853-860
- A. El-Taher, 2011, Assessment of natural radioactivity levels and radiation hazards for building materials used in Qassim area, *Environmental Physics*, Vol. 57, pp. 726-735
- O.B. Flores, A.M. Estrada, R.R. Suarez, J.T. Zerquera, A.H. Perez, 2008, *Natural radionuclide content in building materials and gamma dose rate in dwellings in Cuba*, Elsevier Science, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 99, pp. 1834-1837
- R.H. Higgy, M.S. El-Tahawy, A.T. Abdel-Fattah, U.A. Al-Akabawy, 2000, *Radionuclide content of building materials and associated gamma dose rates in Egyptian dwellings*, Elsevier Science, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 50, pp. 253-261
- P. Hayumbu, M.B. Zaman, N.C.H. Lubaba, S.S. Munsanje, D. Muleya, 1995, *Natural Radioactivity in Zambian Building Materials collected from Lusaka*, Springer, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 199, pp. 229-238
- N. Hizem, A. Ben Fredj, L. Ghedira, 2005, *Determination of natural radioactivity in building materials used in Tunisian dwellings by gamma ray spectrometry*, Oxford University Press, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 114, pp. 533-537
- A. Kumar, M. Kumar, B. Singh, S. Singh, 2003, *Natural activities of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in some Indian building materials*, Elsevier Science, *Radiation Measurements*, Vol. 36, pp. 465-469
- A. Louizi, C. Proukakis, N.P. Petropoulos and S.E. Simopoulos, 1995, *Natural radioactivity content and radon exhalation rates of Greek building materials*, In *Proceedings International Workshop: Indoor Air – An Integrated Approach*, Vol. 27, pp. 131-134

- A. Malanca, V. Pessina, G. Dallara, C. Newby Luce and L. Gaidolfi, 1995, *Natural Radioactivity in Building Materials from the Brazilian State of Espirito Santo*, Elsevier Science, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 46, pp. 1387-1392
- C. Nuccetelli, F. Leonardi, R. Trevisi, 2015, *A new accurate and flexible index to assess the contribution of building materials to indoor gamma exposure*, Elsevier Science, Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 143, pp. 70-75
- S. Pavlidou, A. Koroneos, C. Papastefanou, G. Christofides, S. Stoulos, M. Vavelides, 2006, *Natural radioactivity of granites used as building materials*, Elsevier Science, Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 89, pp. 48-60
- N.P. Petropoulos, M.J. Anagnostakis and S.E. Simopoulos, 2002, *Photon attenuation, natural radioactivity content and radon exhalation rate of building materials*, Elsevier Science, Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 61, pp. 257-269
- S. Righi, L. Bruzzi, 2006, *Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings*, Elsevier Science, Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 88, pp. 158-170
- S. Risica, C. Bolzan, C. Nuccetelli, 2001, *Radioactivity in building materials: room model analysis and experimental methods*, Elsevier Science, Science of The Total Environment, Vol. 272, pp. 0-126
- S. Stoulos, M. Manolopoulou, C. Papastefanou, 2003, *Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece*, Elsevier Science, Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 69, pp. 225-240
- E. Straden, 1979, *Radioactivity of building materials and the gamma radiation in dwellings*, Institute of Physics, Physics in Medicine and Biology, Vol. 24, pp. 921-930
- M. Tufail, N. Ahmad, S. Almakky, M.S. Zafar, H.A. Khan, 1992, *Natural radioactivity in the ceramics used in dwellings as construction material*, Elsevier Science, Science of The Total Environment, Vol. 127, pp. 243-253
- R. Trevisi, S. Risica, M. D'Alessandro, D. Paradiso, C. Nuccetelli, 2012, *Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database and an estimate of radiological significance*, Elsevier Science, Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 105, pp. 11-20
- K.N. Yu, Z.J. Guan, M.J. Stokes & E.C.M. Young, 1991, *The Assessment of the Natural Radiation Dose Committed to the Hong Kong People*, Elsevier Science, Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 17, pp. 31-48

Βιβλία

Δ. Λεωνίδου, 1984, *Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολιών & ύλης – Δοσιμετρία – Θωράκιση*, Ε.Μ.Π.

Mika Markkanen, 1995, *Radiation Dose Assessments for Materials with Elevated Natural Radioactivity*, Sateilyturvakeskus, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety

James E. Martin, 2006, *Physics for Radiation Protection*, WILEY-VCH

Raimo Mustonen, 1992, *Building materials as sources of indoor exposure to ionizing radiation*, Sateilyturvakeskus, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety


```

00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) Plane Y=-0.5
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AY=(+1.0000000000000E+00, 0)
AO=(+0.5000000000000E+00, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) Plane Y=+0.5
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AY=(+1.0000000000000E+00, 0)
AO=(-0.5000000000000E+00, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) Plane Z=+49.5
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AZ=(+1.0000000000000E+00, 0)
AO=(-4.9500000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) Plane Z=+50.5
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AZ=(+1.0000000000000E+00, 0)
AO=(-5.0500000000000E+01, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) Plane X=-0.5
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AX=(+1.0000000000000E+00, 0)
AO=(+0.5000000000000E+00, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) Plane X=+0.5
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AX=(+1.0000000000000E+00, 0)
AO=(-0.5000000000000E+00, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 1)
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) SPHERE R=55
INDICES=( 1, 1, 1, 0, -1)
X-SCALE=( 0.5500000000000E+02, 0)
Y-SCALE=( 0.5500000000000E+02, 0)
Z-SCALE=( 0.5500000000000E+02, 0)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 2)
MATERIAL( 0)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(-1)
BODY ( 1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 3)
MATERIAL( 0)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

Εικόνα A 2: Αρχείο γεωμετρίας (σημειακή πηγή – ιστός)


```

000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 12) Plane X=+0.5
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=(+1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-0.500000000000000E+00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 2)
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 13) SPHERE R=80
INDICES=( 1, 1, 1, 0, -1)
X-SCALE=( 0.800000000000000E+02, 0)
Y-SCALE=( 0.800000000000000E+02, 0)
Z-SCALE=( 0.800000000000000E+02, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 3)
MATERIAL( 0)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(-1)
BODY ( 1)
BODY ( 2)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 4)
MATERIAL( 0)
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

Εικόνα A 3: Αρχείο γεωμετρίας (πηγή όγκου – ιστός)


```

SURFACE ( 39) Plane Z=-140
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AZ=(+1.000000000000000E+00, 0)
    A0=(+1.400000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 40) Plane Z=-40
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AZ=(+1.000000000000000E+00, 0)
    A0=(+0.400000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 41) Plane X=-250
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AX=(+1.000000000000000E+00, 0)
    A0=(+2.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 42) Plane X=-270
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AX=(+1.000000000000000E+00, 0)
    A0=(+2.700000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 7)
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 37), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 38), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 39), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 40), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 41), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 42), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 43) Plane Y=-200
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AY=(+1.000000000000000E+00, 0)
    A0=(+2.000000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 44) Plane Y=-60
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AY=(+1.000000000000000E+00, 0)
    A0=(+0.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 45) Plane Z=-40
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AZ=(+1.000000000000000E+00, 0)
    A0=(+0.400000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 46) Plane Z=+80
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AZ=(+1.000000000000000E+00, 0)
    A0=(-0.800000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```


Παράρτημα Β

Αρχεία εισόδου

```
SKPAR 2          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.09e5    [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SCONE 0 0 180   [Conical beam; angles in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Tissue.mat          [Material file, up to 20 chars] &*
MSIMPA 2e4 6e3 2e4 0.1 0.1 2e4 6e3      [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] &*
.
>>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN simeio.geo         [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -0.5 0.5           [X coordinates of the dose box vertices]
GRIDY -0.5 0.5           [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ 49.5 50.5          [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN 1 1 1             [Numbers of bins]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dmp          [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp         [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 100                [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 3e9              [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10                [Allotted simulation time, in sec]
.
END                      [Ends the reading of input data]
```

Εικόνα Β 1: Αρχείο εισόδου (σημειακή πηγή – ιστός)


```

>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.09e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SBOX 100 100 20 [Source box dimensions]
SBODY 1 [Active source body; one line for each body] *
.
>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Concrete.mat [Material file, up to 20 chars] &*
MSIMPA 2e4 6e3 2e4 0.1 0.1 2e4 6e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] &*
MFNAME Tissue.mat [Material file, up to 20 chars] &*
MSIMPA 2e4 6e3 2e4 0.1 0.1 2e4 6e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] &*
.
>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN plaka.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -0.5 0.5 [X coordinates of the dose box vertices]
GRIDY -0.5 0.5 [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ 49.5 50.5 [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN 1 1 1 [Numbers of bins]
.
>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 100 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10 [Allotted simulation time, in sec]
.
END [Ends the reading of input data]

```

Εικόνα Β 2: Αρχείο εισόδου (πηγή όγκου – ιστός)

```

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.120e6 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SBOX 540 440 280 [Source box dimensions]
SBODY 1 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 2 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 3 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 4 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 5 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 6 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 7 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 8 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 9 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 10 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 11 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 12 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 13 [Active source body; one line for each body] *
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Concrete.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 37e3 11e3 37e3 0.1 0.1 37e3 11e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
MFNAME Air.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 37e3 11e3 37e3 0.1 0.1 37e3 11e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
.
>>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN room.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -400 400 [X coordinates of the dose box vertices]
GRIDY -350 350 [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ -5 5 [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN 80 70 1 [Numbers of bins]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 200 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 2e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10 [Allotted simulation time, in sec]
.
END [Ends the reading of input data]

```

Εικόνα Β 3: Αρχείο εισόδου (δωμάτιο – διευρυμένο)

```

>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 6.09e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SBOX 540 440 280 [Source box dimensions]
SBODY 1 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 2 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 3 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 4 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 5 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 6 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 7 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 8 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 9 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 10 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 11 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 12 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 13 [Active source body; one line for each body] *
.
>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Concrete.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 2e4 6e3 2e4 0.1 0.1 2e4 6e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
MFNAME Air.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 2e4 6e3 2e4 0.1 0.1 2e4 6e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
.
>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN room.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -250 250 [X coordinates of the dose box vertices]
GRIDY -200 200 [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ -5 5 [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN 50 40 1 [Numbers of bins]
.
>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 500 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.2e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10 [Allotted simulation time, in sec]
.
END [Ends the reading of input data]

```

Εικόνα Β 4: Αρχείο εισόδου – φωτόνια 609keV


```

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.120e6 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SBOX 540 440 280 [Source box dimensions]
SBODY 1 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 2 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 3 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 4 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 5 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 6 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 7 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 8 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 9 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 10 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 11 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 12 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 13 [Active source body; one line for each body] *
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Concrete.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 37e3 11e3 37e3 0.1 0.1 37e3 11e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
MFNAME Air.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 37e3 11e3 37e3 0.1 0.1 37e3 11e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
.
>>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN room.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -250 250 [X coordinates of the dose box vertices]
GRIDY -200 200 [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ -5 5 [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN 50 40 1 [Numbers of bins]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 500 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.2e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10 [Allotted simulation time, in sec]
.
END [Ends the reading of input data]

```

Εικόνα Β 5: Αρχείο εισόδου – φωτόνια 1120keV

```

>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.764e6 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SBOX 540 440 280 [Source box dimensions]
SBODY 1 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 2 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 3 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 4 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 5 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 6 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 7 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 8 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 9 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 10 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 11 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 12 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 13 [Active source body; one line for each body] *
.
>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Concrete.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 59e3 18e3 59e3 0.1 0.1 59e3 18e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
MFNAME Air.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 59e3 18e3 59e3 0.1 0.1 59e3 18e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
.
>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN room.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -250 250 [X coordinates of the dose box vertices]
GRIDY -200 200 [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ -5 5 [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN 50 40 1 [Numbers of bins]
.
>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 500 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.2e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10 [Allotted simulation time, in sec]
.
END [Ends the reading of input data]

```

Εικόνα Β 6: Αρχείο εισόδου – φωτόνια 1764keV

```

>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 2.39e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SBOX 540 440 280 [Source box dimensions]
SBODY 1 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 2 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 3 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 4 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 5 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 6 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 7 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 8 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 9 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 10 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 11 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 12 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 13 [Active source body; one line for each body] *
.
>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFILENAME Concrete.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 8e3 2.4e3 8e3 0.1 0.1 8e3 2.4e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
MFILENAME Air.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 8e3 2.4e3 8e3 0.1 0.1 8e3 2.4e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
.
>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN room.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -250 250 [X coordinates of the dose box vertices]
GRIDY -200 200 [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ -5 5 [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN 50 40 1 [Numbers of bins]
.
>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 3600 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.2e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10 [Allotted simulation time, in sec]
.
END [Ends the reading of input data]

```

Εικόνα Β 7: Αρχείο εισόδου – φωτόνια 239keV

```

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 3.38e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SBOX 540 440 280 [Source box dimensions]
SBODY 1 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 2 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 3 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 4 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 5 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 6 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 7 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 8 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 9 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 10 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 11 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 12 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 13 [Active source body; one line for each body] *
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Concrete.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 11.3e3 3.4e3 11.3e3 0.1 0.1 11.3e3 3.4e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
MFNAME Air.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 11.3e3 3.4e3 11.3e3 0.1 0.1 11.3e3 3.4e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
.
>>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN room.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -250 250 [X coordinates of the dose box vertices]
GRIDY -200 200 [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ -5 5 [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN 50 40 1 [Numbers of bins]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 3600 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.2e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10 [Allotted simulation time, in sec]
.
END [Ends the reading of input data]

```

Εικόνα Β 8: Αρχείο εισόδου – φωτόνια 338keV

```

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 5.83e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SBOX 540 440 280 [Source box dimensions]
SBODY 1 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 2 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 3 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 4 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 5 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 6 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 7 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 8 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 9 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 10 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 11 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 12 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 13 [Active source body; one line for each body] *
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Concrete.mat [Material file, up to 20 chars] &*
MSIMPA 19.5e3 5.8e3 19.5e3 0.1 0.1 19.5e3 5.8e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] &*
MFNAME Air.mat [Material file, up to 20 chars] &*
MSIMPA 19.5e3 5.8e3 19.5e3 0.1 0.1 19.5e3 5.8e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] &*
.
>>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN room.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -250 250 [X coordinates of the dose box vertices]
GRIDY -200 200 [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ -5 5 [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN 50 40 1 [Numbers of bins]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 3600 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.2e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10 [Allotted simulation time, in sec]
.
END [Ends the reading of input data]

```

Εικόνα Β 9: Αρχείο εισόδου – φωτόνια 583keV


```

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 9.11e5 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SBOX 540 440 280 [Source box dimensions]
SBODY 1 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 2 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 3 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 4 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 5 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 6 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 7 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 8 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 9 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 10 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 11 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 12 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 13 [Active source body; one line for each body] *
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Concrete.mat [Material file, up to 20 chars] &*
MSIMPA 30.4e3 9.1e3 30.4e3 0.1 0.1 30.4e3 9.1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] &*
MFNAME Air.mat [Material file, up to 20 chars] &*
MSIMPA 30.4e3 9.1e3 30.4e3 0.1 0.1 30.4e3 9.1e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] &*
.
>>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN room.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -250 250 [X coordinates of the dose box vertices]
GRIDY -200 200 [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ -5 5 [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN 50 40 1 [Numbers of bins]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 3600 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.2e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10 [Allotted simulation time, in sec]
.
END [Ends the reading of input data]

```

Εικόνα Β 10: Αρχείο εισόδου – φωτόνια 911keV

```

>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 1.460e6 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SBOX 540 440 280 [Source box dimensions]
SBODY 1 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 2 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 3 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 4 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 5 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 6 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 7 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 8 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 9 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 10 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 11 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 12 [Active source body; one line for each body] *
SBODY 13 [Active source body; one line for each body] *
.
>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Concrete.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 48e3 15e3 48e3 0.1 0.1 48e3 15e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
MFNAME Air.mat [Material file, up to 20 chars] *&
MSIMPA 48e3 15e3 48e3 0.1 0.1 48e3 15e3 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR] *&
.
>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN room.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -250 250 [X coordinates of the dose box vertices]
GRIDY -200 200 [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ -5 5 [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN 50 40 1 [Numbers of bins]
.
>>>>>> Job properties.
RESUME dump.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 300 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1.2e9 [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10 [Allotted simulation time, in sec]
.
END [Ends the reading of input data]

```

Εικόνα Β 11: Αρχείο εισόδου – φωτόνια 1460keV

Παράρτημα Γ

Αρχεία αποτελεσμάτων

```
*****
** Program PENMAIN. Results. **
*****

Simulation time ..... 7.897391E+03 sec
Simulation speed ..... 3.798723E+05 showers/sec

Simulated primary showers ..... 3.000000E+09

Primary particles: photons

Upbound primary particles ..... 1.499938E+09
Downbound primary particles ..... 1.500062E+09
Absorbed primary particles ..... 4.000000E+00

Upbound fraction ..... 4.999792E-01 +- 2.7E-05
Downbound fraction ..... 5.000208E-01 +- 2.7E-05
Absorption fraction ..... 1.333333E-09 +- 2.0E-09

Secondary-particle generation probabilities:
-----
|          | electrons | photons | positrons |
-----
| upbound  | 1.756667E-07 | 7.666667E-09 | 0.000000E+00 |
|          | +- 2.3E-08  | +- 4.8E-09  | +- 0.0E+00  |
-----
| downbound| 2.533333E-08 | 5.333333E-09 | 0.000000E+00 |
|          | +- 8.7E-09  | +- 4.0E-09  | +- 0.0E+00  |
-----
| absorbed | 3.367000E-06 | 7.000000E-09 | 0.000000E+00 |
|          | +- 1.3E-07  | +- 4.6E-09  | +- 0.0E+00  |
-----

Average deposited energies (bodies):
Body 1 ..... 5.816608E-01 +- 2.3E-02 eV (effic. = 7.35E-01)

Maximum dose ... 5.816608E-01 +- 2.3E-02 eV/g (effic. = 7.35E-01)

Last random seeds = 843872250 , 269499705
```

Εικόνα Γ 1: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (σημειακή πηγή – ιστός)


```

*****
**  Program PENMAIN. Results.  **
*****

Simulation time ..... 4.940671E+05 sec
Simulation speed ..... 2.024016E+03 showers/sec

Simulated primary showers ..... 1.000000E+09

Primary particles: photons

Upbound primary particles ..... 5.426490E+08
Downbound primary particles ..... 8.487349E+07
Absorbed primary particles ..... 3.724775E+08

Upbound fraction ..... 5.431697E-01 +- 4.9E-05
Downbound fraction ..... 8.500637E-02 +- 2.8E-05
Absorption fraction ..... 3.724775E-01 +- 4.6E-05

Secondary-particle generation probabilities:
-----
|           | electrons | photons | positrons |
-----
| upbound  | 1.127941E-03 | 5.206960E-04 | 0.000000E+00 |
|           | +- 3.2E-06  | +- 2.2E-06  | +- 0.0E+00   |
-----
| downbound| 8.131400E-05 | 1.328850E-04 | 0.000000E+00 |
|           | +- 8.6E-07  | +- 1.1E-06  | +- 0.0E+00   |
-----
| absorbed | 3.102938E+00 | 3.771226E-02 | 0.000000E+00 |
|           | +- 2.5E-04  | +- 1.9E-05  | +- 0.0E+00   |
-----

Average deposited energies (bodies):
Body 1 ..... 3.395843E+05 +- 2.5E+01 eV (effic. = 3.42E+03)
Body 2 ..... 7.394759E-01 +- 4.2E-02 eV (effic. = 5.53E-03)

Maximum dose ... 7.394759E-01 +- 4.2E-02 eV/g (effic. = 5.53E-03)

Last random seeds = 2025350343 , 2060701944

```

Εικόνα Γ 2: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (πηγή όγκου - ιστός)

```

*****
** Program PENMAIN. Results. **
*****

```

```

Simulation time ..... 9.446214E+05 sec
Simulation speed ..... 1.270350E+03 showers/sec

```

```

Simulated primary showers ..... 1.200000E+09

```

Primary particles: photons

```

Upbound primary particles ..... 1.499315E+08
Downbound primary particles ..... 1.029032E+08
Absorbed primary particles ..... 9.471653E+08

```

```

Upbound fraction ..... 1.251600E-01 +- 3.0E-05
Downbound fraction ..... 8.591553E-02 +- 2.5E-05
Absorption fraction ..... 7.893044E-01 +- 3.5E-05

```

Average deposited energies (bodies):

Body	1	.....	5.283799E+03	+-	2.4E+00	eV	(effic. = 4.57E+01)
Body	2	.....	2.033476E+03	+-	1.5E+00	eV	(effic. = 1.81E+01)
Body	3	.....	1.570382E+05	+-	2.1E+01	eV	(effic. = 5.15E+02)
Body	4	.....	1.573837E+05	+-	2.1E+01	eV	(effic. = 5.17E+02)
Body	5	.....	4.036407E+04	+-	1.1E+01	eV	(effic. = 1.26E+02)
Body	6	.....	2.554874E+04	+-	9.8E+00	eV	(effic. = 6.50E+01)
Body	7	.....	3.946475E+04	+-	1.2E+01	eV	(effic. = 1.01E+02)
Body	8	.....	1.799917E+04	+-	8.3E+00	eV	(effic. = 4.49E+01)
Body	9	.....	1.801032E+04	+-	8.3E+00	eV	(effic. = 4.49E+01)
Body	10	.....	5.703061E+03	+-	4.5E+00	eV	(effic. = 1.50E+01)
Body	11	.....	8.450110E+04	+-	1.7E+01	eV	(effic. = 2.35E+02)
Body	12	.....	5.264217E+03	+-	4.5E+00	eV	(effic. = 1.31E+01)
Body	13	.....	1.160409E+01	+-	1.2E-01	eV	(effic. = 8.67E-02)
Body	14	.....	8.884261E+02	+-	9.9E-01	eV	(effic. = 7.72E+00)

```

Maximum dose ... 1.799660E-02 +- 2.3E-03 eV/g (effic. = 5.62E-04)

```

```

Last random seeds = 1370988783 , 1494491717

```

Εικόνα Γ 3: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης – φωτόνια 609keV

```

*****
**  Program PENMAIN. Results.  **
*****

Simulation time ..... 7.808613E+05 sec
Simulation speed ..... 1.536765E+03 showers/sec

Simulated primary showers ..... 1.200000E+09

Primary particles: photons

Upbound primary particles ..... 1.851920E+08
Downbound primary particles ..... 1.098748E+08
Absorbed primary particles ..... 9.049332E+08

Upbound fraction ..... 1.553948E-01 +- 3.4E-05
Downbound fraction ..... 9.232257E-02 +- 2.7E-05
Absorption fraction ..... 7.541110E-01 +- 3.7E-05

Average deposited energies (bodies):
Body 1 ..... 6.423842E+03 +- 2.9E+00 eV (effic. = 5.67E+01)
Body 2 ..... 2.555636E+03 +- 2.2E+00 eV (effic. = 1.52E+01)
Body 3 ..... 2.902206E+05 +- 4.0E+01 eV (effic. = 6.21E+02)
Body 4 ..... 2.907063E+05 +- 4.0E+01 eV (effic. = 6.24E+02)
Body 5 ..... 8.062153E+04 +- 2.1E+01 eV (effic. = 1.69E+02)
Body 6 ..... 4.757620E+04 +- 1.8E+01 eV (effic. = 7.92E+01)
Body 7 ..... 7.170529E+04 +- 2.2E+01 eV (effic. = 1.19E+02)
Body 8 ..... 3.352109E+04 +- 1.5E+01 eV (effic. = 5.45E+01)
Body 9 ..... 3.352745E+04 +- 1.5E+01 eV (effic. = 5.45E+01)
Body 10 ..... 1.056655E+04 +- 8.5E+00 eV (effic. = 1.80E+01)
Body 11 ..... 1.560537E+05 +- 3.1E+01 eV (effic. = 2.83E+02)
Body 12 ..... 9.447442E+03 +- 8.2E+00 eV (effic. = 1.54E+01)
Body 13 ..... 1.510891E+01 +- 2.0E-01 eV (effic. = 6.89E-02)
Body 14 ..... 1.792202E+03 +- 2.0E+00 eV (effic. = 9.39E+00)

Maximum dose ... 3.308213E-02 +- 3.2E-03 eV/g (effic. = 1.21E-03)

Last random seeds = 1064331145 , 1082383165

```

Εικόνα Γ 4: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης – φωτόνια 1120keV

```
*****
** Program PENMAIN. Results. **
*****
```

```
Simulation time ..... 9.583508E+05 sec
Simulation speed ..... 1.252151E+03 showers/sec
```

```
Simulated primary showers ..... 1.200000E+09
```

```
Primary particles: photons
```

```
Upbound primary particles ..... 2.126594E+08
Downbound primary particles ..... 1.106746E+08
Absorbed primary particles ..... 8.766660E+08
```

```
Upbound fraction ..... 1.823705E-01 +- 3.9E-05
Downbound fraction ..... 9.624617E-02 +- 3.1E-05
Absorption fraction ..... 7.305550E-01 +- 3.8E-05
```

```
Average deposited energies (bodies):
```

Body 1	.....	7.149284E+03	+-	3.2E+00	eV	(effic. = 4.57E+01)
Body 2	.....	2.937271E+03	+-	3.0E+00	eV	(effic. = 8.96E+00)
Body 3	.....	4.577945E+05	+-	6.3E+01	eV	(effic. = 5.01E+02)
Body 4	.....	4.583670E+05	+-	6.3E+01	eV	(effic. = 5.03E+02)
Body 5	.....	1.323300E+05	+-	3.4E+01	eV	(effic. = 1.45E+02)
Body 6	.....	7.559310E+04	+-	2.9E+01	eV	(effic. = 6.46E+01)
Body 7	.....	1.111934E+05	+-	3.5E+01	eV	(effic. = 9.47E+01)
Body 8	.....	5.330021E+04	+-	2.5E+01	eV	(effic. = 4.44E+01)
Body 9	.....	5.332851E+04	+-	2.5E+01	eV	(effic. = 4.44E+01)
Body 10	.....	1.668864E+04	+-	1.3E+01	eV	(effic. = 1.44E+01)
Body 11	.....	2.460488E+05	+-	5.0E+01	eV	(effic. = 2.29E+02)
Body 12	.....	1.441012E+04	+-	1.3E+01	eV	(effic. = 1.20E+01)
Body 13	.....	1.741979E+01	+-	2.7E-01	eV	(effic. = 3.96E-02)
Body 14	.....	3.048955E+03	+-	3.1E+00	eV	(effic. = 9.11E+00)

```
Maximum dose ... 5.183106E-02 +- 4.4E-03 eV/g (effic. = 1.32E-03)
```

```
Last random seeds = 1683955504 , 1964503309
```

Εικόνα Γ 5: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης – φωτόνια 1764keV

```

*****
**   Program PENMAIN. Results.   **
*****

Simulation time ..... 7.225025E+05 sec
Simulation speed ..... 1.660894E+03 showers/sec

Simulated primary showers ..... 1.200000E+09

Primary particles: photons

Upbound primary particles ..... 9.754649E+07
Downbound primary particles ..... 7.793742E+07
Absorbed primary particles ..... 1.024516E+09

Upbound fraction ..... 8.130081E-02 +- 2.4E-05
Downbound fraction ..... 6.495786E-02 +- 2.2E-05
Absorption fraction ..... 8.537634E-01 +- 3.1E-05

Average deposited energies (bodies):
Body  1 ..... 2.869521E+03 +- 1.5E+00 eV   (effic. = 4.61E+01)
Body  2 ..... 1.208499E+03 +- 8.5E-01 eV   (effic. = 2.54E+01)
Body  3 ..... 6.199373E+04 +- 8.5E+00 eV   (effic. = 6.59E+02)
Body  4 ..... 6.212672E+04 +- 8.5E+00 eV   (effic. = 6.61E+02)
Body  5 ..... 1.308179E+04 +- 4.1E+00 eV   (effic. = 1.28E+02)
Body  6 ..... 9.983591E+03 +- 3.9E+00 eV   (effic. = 8.21E+01)
Body  7 ..... 1.586744E+04 +- 4.9E+00 eV   (effic. = 1.32E+02)
Body  8 ..... 7.046758E+03 +- 3.3E+00 eV   (effic. = 5.70E+01)
Body  9 ..... 7.050711E+03 +- 3.3E+00 eV   (effic. = 5.70E+01)
Body 10 ..... 2.244979E+03 +- 1.8E+00 eV   (effic. = 1.90E+01)
Body 11 ..... 3.336660E+04 +- 6.8E+00 eV   (effic. = 3.02E+02)
Body 12 ..... 2.128760E+03 +- 1.8E+00 eV   (effic. = 1.71E+01)
Body 13 ..... 6.805921E+00 +- 6.5E-02 eV   (effic. = 1.38E-01)
Body 14 ..... 3.160094E+02 +- 3.5E-01 eV   (effic. = 1.04E+01)

Maximum dose ... 6.177113E-03 +- 1.3E-03 eV/g (effic. = 2.86E-04)

Last random seeds = 1435670120 , 1724515315

```

Εικόνα Γ 6: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης – φωτόνια 239keV

```
*****
**  Program PENMAIN. Results.  **
*****
```

```
Simulation time ..... 7.107262E+05 sec
Simulation speed ..... 1.688414E+03 showers/sec
```

```
Simulated primary showers ..... 1.200000E+09
```

```
Primary particles: photons
```

```
Upbound primary particles ..... 1.173983E+08
Downbound primary particles ..... 8.961890E+07
Absorbed primary particles ..... 9.929828E+08
```

```
Upbound fraction ..... 9.786769E-02 +- 2.6E-05
Downbound fraction ..... 7.471071E-02 +- 2.3E-05
Absorption fraction ..... 8.274857E-01 +- 3.3E-05
```

```
Average deposited energies (bodies):
```

Body	1	.....	3.815890E+03	+-	1.8E+00	eV	(effic. = 5.41E+01)
Body	2	.....	1.505364E+03	+-	1.0E+00	eV	(effic. = 2.74E+01)
Body	3	.....	8.712592E+04	+-	1.2E+01	eV	(effic. = 6.77E+02)
Body	4	.....	8.731064E+04	+-	1.2E+01	eV	(effic. = 6.80E+02)
Body	5	.....	2.007464E+04	+-	5.9E+00	eV	(effic. = 1.47E+02)
Body	6	.....	1.408066E+04	+-	5.4E+00	eV	(effic. = 8.49E+01)
Body	7	.....	2.216522E+04	+-	6.8E+00	eV	(effic. = 1.35E+02)
Body	8	.....	9.927626E+03	+-	4.6E+00	eV	(effic. = 5.87E+01)
Body	9	.....	9.938283E+03	+-	4.6E+00	eV	(effic. = 5.88E+01)
Body	10	.....	3.156399E+03	+-	2.5E+00	eV	(effic. = 1.97E+01)
Body	11	.....	4.689433E+04	+-	9.5E+00	eV	(effic. = 3.10E+02)
Body	12	.....	2.971529E+03	+-	2.5E+00	eV	(effic. = 1.75E+01)
Body	13	.....	8.478886E+00	+-	8.0E-02	eV	(effic. = 1.43E-01)
Body	14	.....	4.715510E+02	+-	5.1E-01	eV	(effic. = 1.10E+01)

```
Maximum dose ... 8.099182E-03 +- 1.5E-03 eV/g (effic. = 3.64E-04)
```

```
Last random seeds = 1462601065 , 280969999
```

Εικόνα Γ 7: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης – φωτόνια 338keV

```

*****
**  Program PENMAIN. Results.  **
*****

Simulation time ..... 1.233236E+06 sec
Simulation speed ..... 9.730495E+02 showers/sec

Simulated primary showers ..... 1.200000E+09

Primary particles: photons

Upbound primary particles ..... 1.475118E+08
Downbound primary particles ..... 1.021654E+08
Absorbed primary particles ..... 9.503228E+08

Upbound fraction ..... 1.231184E-01 +- 3.0E-05
Downbound fraction ..... 8.528341E-02 +- 2.5E-05
Absorption fraction ..... 7.919356E-01 +- 3.5E-05

Average deposited energies (bodies):
Body 1 ..... 5.184904E+03 +- 2.4E+00 eV (effic. = 3.48E+01)
Body 2 ..... 1.993898E+03 +- 1.4E+00 eV (effic. = 1.41E+01)
Body 3 ..... 1.502884E+05 +- 2.0E+01 eV (effic. = 3.94E+02)
Body 4 ..... 1.506003E+05 +- 2.0E+01 eV (effic. = 3.96E+02)
Body 5 ..... 3.836190E+04 +- 1.1E+01 eV (effic. = 9.59E+01)
Body 6 ..... 2.444134E+04 +- 9.4E+00 eV (effic. = 4.98E+01)
Body 7 ..... 3.781538E+04 +- 1.2E+01 eV (effic. = 7.73E+01)
Body 8 ..... 1.722188E+04 +- 7.9E+00 eV (effic. = 3.44E+01)
Body 9 ..... 1.722750E+04 +- 7.9E+00 eV (effic. = 3.44E+01)
Body 10 ..... 5.456247E+03 +- 4.3E+00 eV (effic. = 1.15E+01)
Body 11 ..... 8.088689E+04 +- 1.6E+01 eV (effic. = 1.80E+02)
Body 12 ..... 5.045967E+03 +- 4.3E+00 eV (effic. = 1.00E+01)
Body 13 ..... 1.134878E+01 +- 1.2E-01 eV (effic. = 6.76E-02)
Body 14 ..... 8.472208E+02 +- 9.4E-01 eV (effic. = 5.94E+00)

Maximum dose ... 1.763546E-02 +- 2.4E-03 eV/g (effic. = 4.01E-04)

Last random seeds = 530640303 , 689455260

```

Εικόνα Γ 8: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης – φωτόνια 583keV


```
*****
** Program PENMAIN. Results. **
*****
```

```
Simulation time ..... 1.138475E+06 sec
Simulation speed ..... 1.054042E+03 showers/sec
```

```
Simulated primary showers ..... 1.200000E+09
```

```
Primary particles: photons
```

```
Upbound primary particles ..... 1.728458E+08
Downbound primary particles ..... 1.081728E+08
Absorbed primary particles ..... 9.189814E+08
```

```
Upbound fraction ..... 1.446726E-01 +- 3.3E-05
Downbound fraction ..... 9.060503E-02 +- 2.7E-05
Absorption fraction ..... 7.658178E-01 +- 3.7E-05
```

```
Average deposited energies (bodies):
```

Body 1	.....	6.090618E+03	+-	2.7E+00	eV	(effic. = 3.89E+01)
Body 2	.....	2.385466E+03	+-	1.9E+00	eV	(effic. = 1.21E+01)
Body 3	.....	2.357046E+05	+-	3.2E+01	eV	(effic. = 4.27E+02)
Body 4	.....	2.361148E+05	+-	3.2E+01	eV	(effic. = 4.29E+02)
Body 5	.....	6.398128E+04	+-	1.7E+01	eV	(effic. = 1.12E+02)
Body 6	.....	3.854171E+04	+-	1.5E+01	eV	(effic. = 5.42E+01)
Body 7	.....	5.859525E+04	+-	1.8E+01	eV	(effic. = 8.26E+01)
Body 8	.....	2.714565E+04	+-	1.2E+01	eV	(effic. = 3.74E+01)
Body 9	.....	2.716023E+04	+-	1.2E+01	eV	(effic. = 3.74E+01)
Body 10	.....	8.573183E+03	+-	6.8E+00	eV	(effic. = 1.24E+01)
Body 11	.....	1.267562E+05	+-	2.6E+01	eV	(effic. = 1.95E+02)
Body 12	.....	7.758358E+03	+-	6.7E+00	eV	(effic. = 1.07E+01)
Body 13	.....	1.385994E+01	+-	1.7E-01	eV	(effic. = 5.51E-02)
Body 14	.....	1.402739E+03	+-	1.6E+00	eV	(effic. = 6.26E+00)

```
Maximum dose ... 2.803782E-02 +- 3.0E-03 eV/g (effic. = 7.00E-04)
```

```
Last random seeds = 104874010 , 148180149
```

Εικόνα Γ 9: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης – φωτόνια 911keV


```

*****
**   Program PENMAIN. Results.   **
*****

Simulation time ..... 1.022649E+06 sec
Simulation speed ..... 1.173423E+03 showers/sec

Simulated primary showers ..... 1.200000E+09

Primary particles: photons

Upbound primary particles ..... 2.013773E+08
Downbound primary particles ..... 1.109217E+08
Absorbed primary particles ..... 8.877010E+08

Upbound fraction ..... 1.704329E-01 +- 3.7E-05
Downbound fraction ..... 9.439354E-02 +- 2.9E-05
Absorption fraction ..... 7.397508E-01 +- 3.8E-05

Average deposited energies (bodies):
Body 1 ..... 6.828255E+03 +- 3.1E+00 eV (effic. = 4.31E+01)
Body 2 ..... 2.770815E+03 +- 2.7E+00 eV (effic. = 9.59E+00)
Body 3 ..... 3.787905E+05 +- 5.2E+01 eV (effic. = 4.72E+02)
Body 4 ..... 3.793611E+05 +- 5.2E+01 eV (effic. = 4.73E+02)
Body 5 ..... 1.079292E+05 +- 2.8E+01 eV (effic. = 1.33E+02)
Body 6 ..... 6.234709E+04 +- 2.4E+01 eV (effic. = 6.05E+01)
Body 7 ..... 9.270664E+04 +- 2.9E+01 eV (effic. = 8.98E+01)
Body 8 ..... 4.393175E+04 +- 2.0E+01 eV (effic. = 4.16E+01)
Body 9 ..... 4.394780E+04 +- 2.0E+01 eV (effic. = 4.16E+01)
Body 10 ..... 1.381181E+04 +- 1.1E+01 eV (effic. = 1.36E+01)
Body 11 ..... 2.036199E+05 +- 4.1E+01 eV (effic. = 2.15E+02)
Body 12 ..... 1.210721E+04 +- 1.1E+01 eV (effic. = 1.15E+01)
Body 13 ..... 1.653705E+01 +- 2.4E-01 eV (effic. = 4.26E-02)
Body 14 ..... 2.451795E+03 +- 2.6E+00 eV (effic. = 7.81E+00)

Maximum dose ... 4.386908E-02 +- 3.9E-03 eV/g (effic. = 1.13E-03)

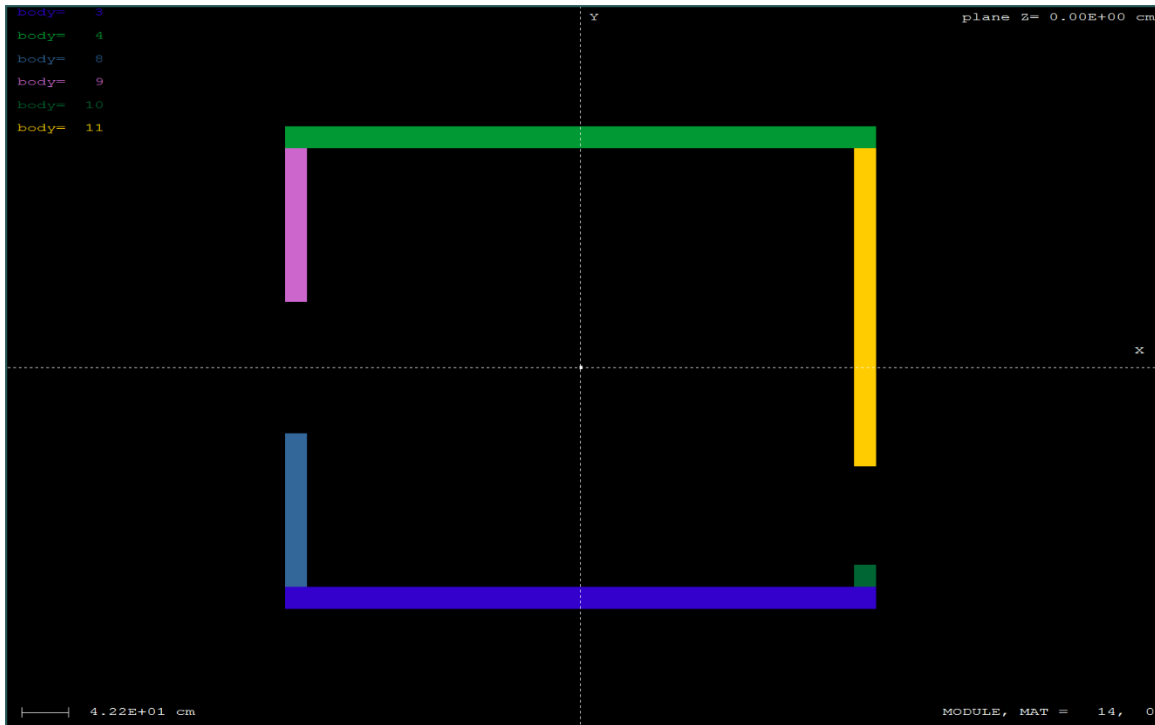
Last random seeds = 1932347906 , 553533406

```

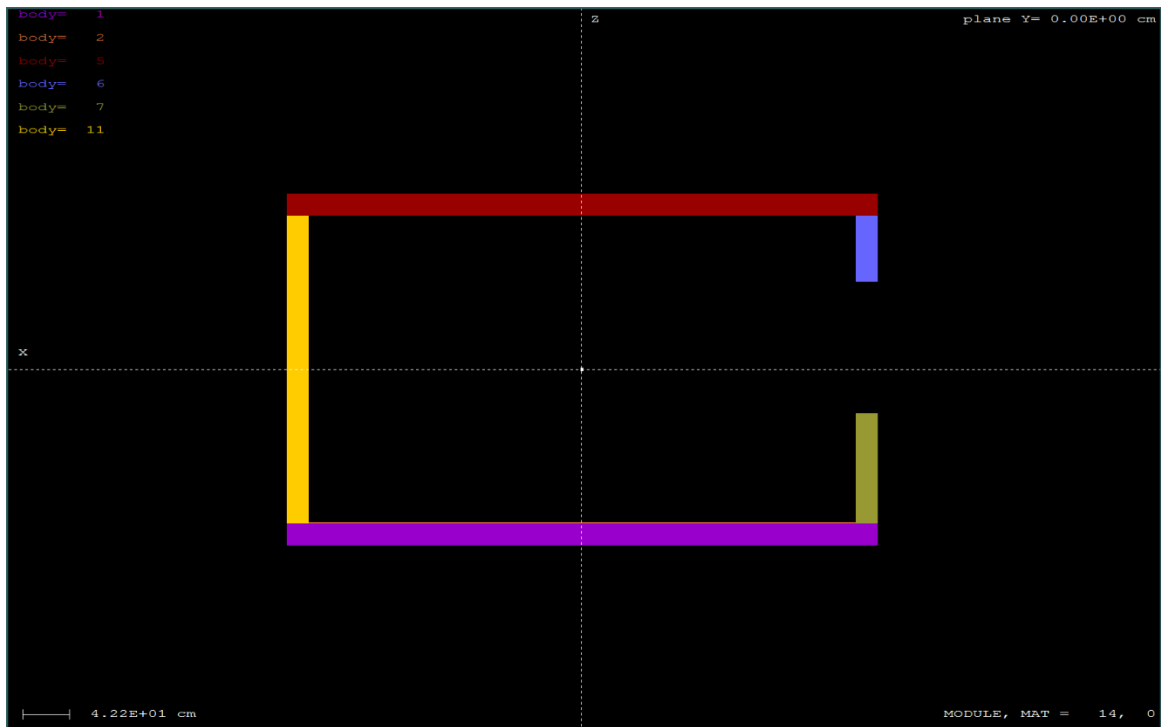
Εικόνα Γ 10: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης – φωτόνια 1460keV

Παράρτημα Δ

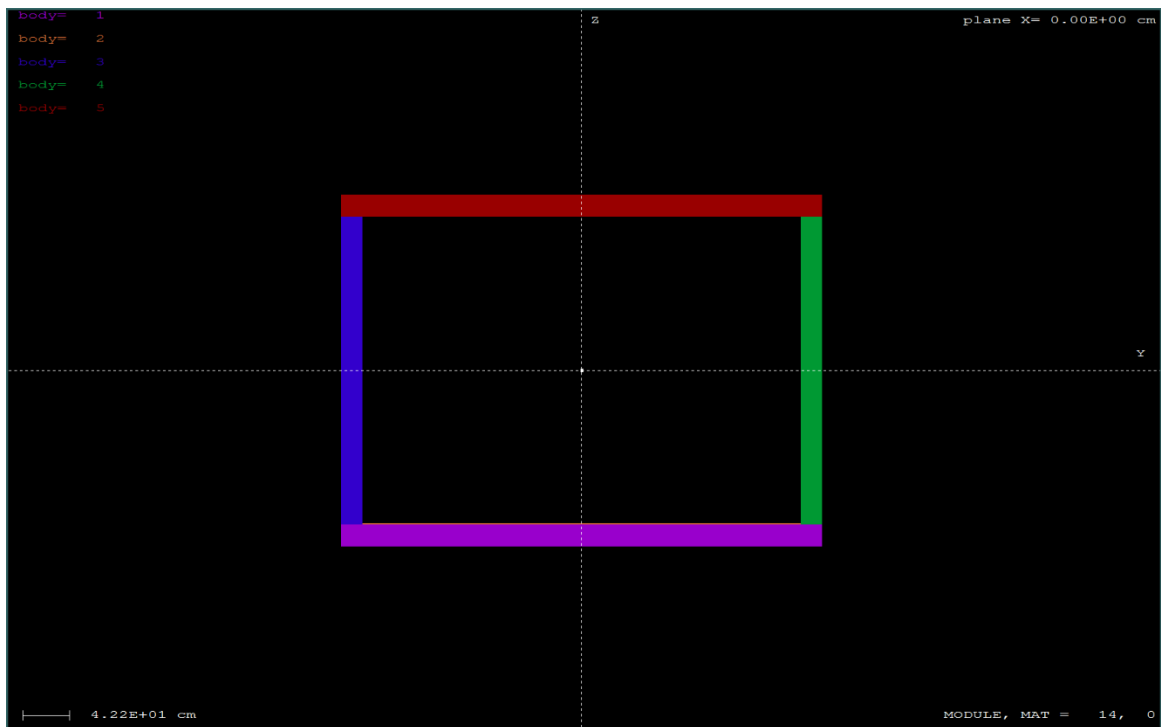
Αρχεία gview



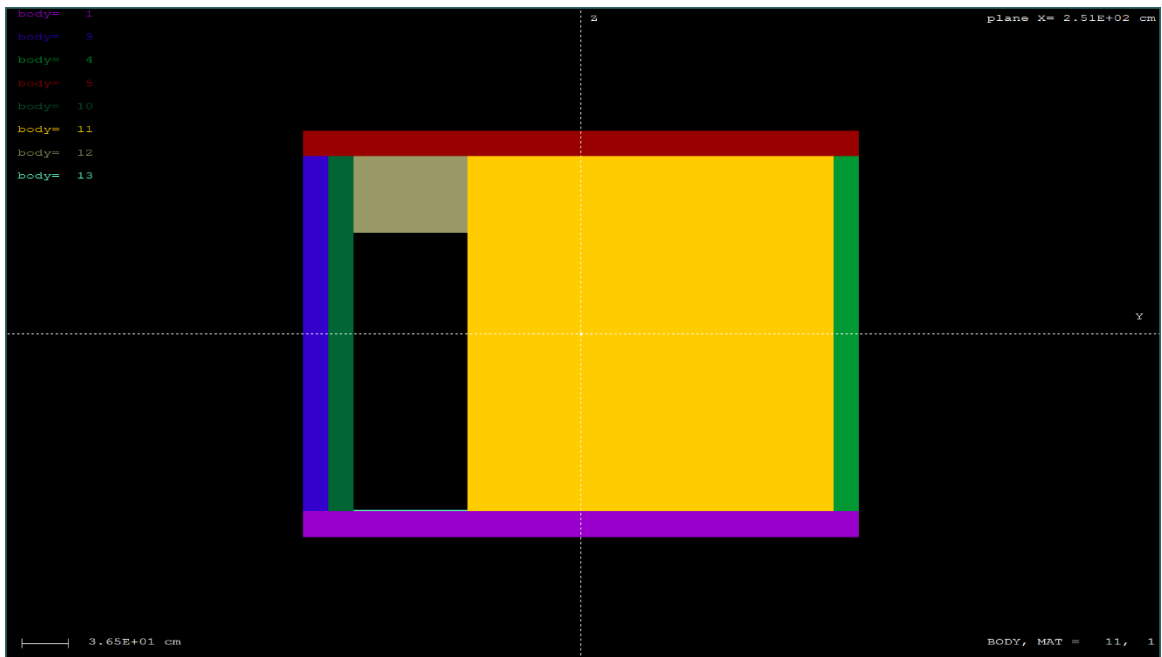
Σχήμα Δ 1: Τομή (κάτοψη) κατά xy επίπεδο, με διαφορετικά χρώματα φαίνονται τα σώματα που χρησιμοποιήθηκαν



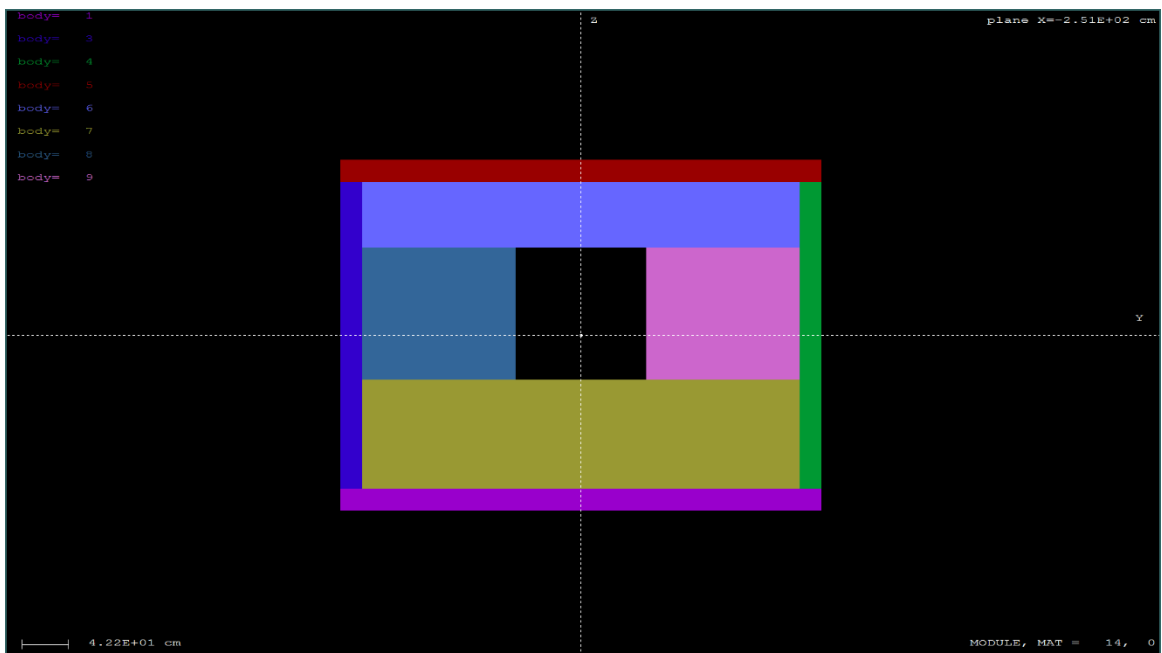
Σχήμα Δ 2: Τομή κατά xz επίπεδο, με διαφορετικά χρώματα φαίνονται τα σώματα που χρησιμοποιήθηκαν



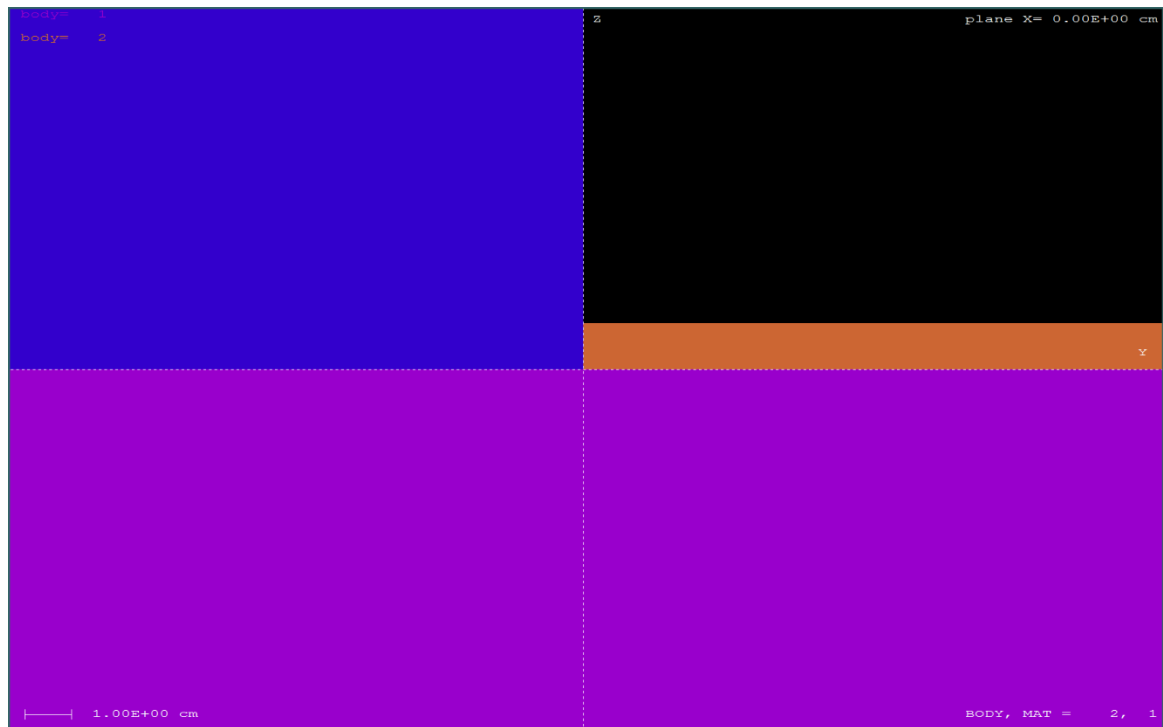
Σχήμα Δ 3: Τομή κατά yz επίπεδο, με διαφορετικά χρώματα φαίνονται τα σώματα που χρησιμοποιήθηκαν



Σχήμα Δ 4: Όψη σε yz επίπεδο, φαίνεται η πόρτα καθώς και τα σώματα που χρησιμοποιήθηκαν



Σχήμα Δ 5: Όψη σε yz επίπεδο, φαίνεται το παράθυρο καθώς και τα σώματα που χρησιμοποιήθηκαν



Σχήμα Δ 6: Τομή – λεπτομέρεια κατά yz επίπεδο. Διακρίνεται ο τοίχος (μπλε χρώμα), το δάπεδο (μωβ χρώμα), το υλικό επικάλυψης (πορτοκαλί χρώμα) και το εσωτερικό του δωματίου (μαύρο χρώμα)