

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΣΗΣ ΕΞ ΑΙΤΙΑΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ
ΑΚΤΙΝΩΝ-Χ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE-CARLO**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Β. ΜΑΝΩΛΑΚΑ
Σπουδαστή της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επίκουρος Καθηγητής Μ.Ι. Αναγνωστάκης
Συνεργασία: Κ.Λ. Καρφόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2007

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε κατά την περίοδο Μαΐου – Οκτωβρίου 2007 στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ και αναφέρεται στις δυνατότητες υπολογισμού και ελέγχου θωρακίσεων χώρων μέσα στους οποίους λειτουργούν μηχανές ακτίνων-Χ μέσω του κώδικα προσομοίωσης αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας και ύλης PENELOPE, που είναι εγκατεστημένος στο υπολογιστικό σύστημα του Εργαστηρίου του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μ. Αναγνωστάκη, επιβλέποντα αυτής της εργασίας, και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κ. Καρφόπουλο για την άψογη συνεργασία μας και την πολύτιμη βοήθειά τους. Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας για την βοήθεια και το άριστο κλίμα συνεργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
---------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΩΡΑΚΙΣΕΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

ΜΗΧΑΝΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ -Χ

2.1 Γενικά.....	10
2.2 Μηχανή ακτίνων-Χ.....	10
2.3 Θεμελιώδη μεγέθη από τη δοσιμετρία και την ακτινοπροστασία.....	12
2.4 Θεμελιώδη μεγέθη για τον υπολογισμό θωρακίσεων μηχανών ακτίνων-Χ.....	16
2.4.1 Όρια δόσεων.....	19
2.5 Μια απλή μέθοδος για τον υπολογισμό θωρακίσεων.....	20
2.6 Βελτιώσεις της μεθόδου υπολογισμού θωρακίσεων.....	26
2.6.1 Γενικά.....	26
2.6.2 Τροποποιήσεις στο φόρτο εργασίας (workload) και στο φορτίο της λυχνίας.....	28
2.6.3 Τροποποιήσεις στον παράγοντα χρήσης (Use Factor, U).....	30
2.6.4 Τροποποιήσεις στον παράγοντα χρήσης του χώρου (Occupancy Factor, T).....	32
2.7 Άλλες μέθοδοι υπολογισμού θωρακίσεων.....	32
2.7.1 Υπολογισμός επιπλέον απαιτούμενης θωράκισης από περισσότερες πηγές με τη μέθοδο McGuire.....	33
2.7.2 Αναλυτικός υπολογισμός επιπλέον θωράκισης.....	35
Πίνακες Κεφαλαίου 2.....	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΟΣΕΩΣ ΜΕΣΩ

ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ Monte-Carlo

3.1 Εισαγωγή στην τεχνική της προσομοίωσης με τη μέθοδο Monte Carlo.....	42
3.2 Ο κώδικας PENELOPE.....	43
3.2.1 Ο κώδικας χρήστη penmain.....	45
3.2.1.1 Τα αρχεία εισόδου του κώδικα penmain.....	45
3.2.1.2 Εικονικοί ανιχνευτές.....	47
3.2.1.2.α Ανιχνευτής Αλληλεπίδρασης.....	47
3.2.1.2.β Ανιχνευτής Αποτιθέμενης Ενέργειας.....	48
3.2.1.2.γ Ανιχνευτής Δόσης.....	49
3.2.1.3 Τα αρχεία εξόδου του κώδικα penmain.....	49
3.2.1.3.α Το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή αλληλεπίδρασης.....	50
3.2.1.3.β Το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας.....	53
3.2.1.3.γ Τα αρχεία εξόδου του ανιχνευτή δόσης (dose enclosure).....	53
3.3 Έλεγχος της ακρίβειας των αποτελεσμάτων του Ανιχνευτή Δόσης.....	55
3.3.1 Υπολογισμός της δόσης εξαιτίας παράλληλης δέσμης φωτονίων ενέργειας.....	55
3.3.1.1 Διερεύνηση παραμέτρων που επηρεάζουν τον υπολογισμό της δόσης.....	66
3.3.2 Υπολογισμός της δόσης σημειακής πηγής πίσω από απλή θωράκιση μολύβδου.....	70
3.4 Υπολογισμός κατανομής δόσης.....	78
Πίνακες Κεφαλαίου 3.....	81
Διαγράμματα Κεφαλαίου 3.....	95

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗΣ ΔΟΣΗΣ

4.1 Γενικά.....	98
4.2 Περιγραφή του προβλήματος.....	99
4.3 Δωμάτιο με σκεδαστή της πρωτεύουσας δέσμης.....	102
4.3.1 Αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας.....	102
4.3.2 Αρχείο εισόδου δεδομένων.....	105
4.4 Δωμάτιο χωρίς σκεδαστή της πρωτεύουσας δέσμης.....	107
4.4.1 Αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας.....	107
4.4.2 Αρχείο εισόδου δεδομένων.....	108
4.5 Προσομοίωση της διαρρέουσας ακτινοβολίας.....	109
4.5.1 Προσομοίωση της διαρρέουσας ακτινοβολίας, μετά από θωράκιση μολύβδου.....	110
4.5.1.1 Προσομοίωση του φάσματος της πρωτεύουσας ακτινοβολίας της μηχανής, πίσω από θωράκιση Pb 2.5mm.....	111
4.5.1.2 Υπολογισμός της δόσης σε ανθρώπινο ιστό πίσω από τη μηχανή, λόγω του φάσματος ακτινοβολίας διαρροής που εκτιμάται μετά την διέλευση της πρωτεύουσας δέσμης μέσα από θωράκιση Pb 2.5mm.....	115
4.5.2 Προσομοίωση του φάσματος της πρωτεύουσας ακτινοβολίας της μηχανής, πίσω από θωράκιση σιδήρου.....	117
4.5.2.1 Προσομοίωση του φάσματος της πρωτεύουσας ακτινοβολίας της μηχανής, πίσω από θωράκιση σιδήρου 5 mm.....	117
4.5.2.2 Υπολογισμός της δόσης σε ανθρώπινο ιστό πίσω από τη μηχανή, λόγω του φάσματος ακτινοβολίας διαρροής που προκύπτει μετά την διέλευση της πρωτεύουσας δέσμης μέσα από θωράκιση σιδήρου 5 mm.....	119
4.5.2.3 Προσομοίωση του φάσματος της πρωτεύουσας ακτινοβολίας της μηχανής, πίσω από θωράκιση Fe 4 mm.....	119
4.5.2.4 Υπολογισμός της δόσης σε ανθρώπινο ιστό πίσω από τη μηχανή, λόγω του φάσματος ακτινοβολίας διαρροής που προκύπτει μετά την δίοδο	

της πρωτεύουσας δέσμης μέσα από θωράκιση σιδήρου 4 mm.....	121
4.6 Αποτελέσματα.....	122
Πίνακες Κεφαλαίου 4.....	129
Διαγράμματα Κεφαλαίου 4.....	186
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	189
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.....	192

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) έχει ως στόχο τη διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης του κώδικα PENELOPE, ο οποίος πραγματοποιεί προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων σωματιδίων-β και φωτονίων με την ύλη, για την εκτίμηση δόσεων και τον υπολογισμό θωρακίσεων χώρων μέσα στους οποίους λειτουργούν μηχανές ακτίνων-X. Οι μηχανές ακτίνων-X χρησιμοποιούνται συνήθως σε ιατρικές εφαρμογές, κυρίως σε απεικονιστικές μεθόδους, όπως η απλή ακτινογραφία, η μαστογραφία και η υπολογιστική τομογραφία. Μία άλλη συνήθης εφαρμογή τους είναι η βιομηχανική ραδιογραφία. Σε κάθε περίπτωση, η εκτίμηση της δόσης σε διάφορες θέσεις και ο εν συνεχεία υπολογισμός της θωράκισης του χώρου όπου λειτουργεί η μηχανή είναι ζήτημα κεφαλαιώδους σημασίας για λόγους ακτινοπροστασίας. Πρώτιστο μέλημα του σχεδιαστή της θωράκισης αποτελεί η ελαχιστοποίηση της ακτινοβόλησης, τόσο του προσωπικού που χειρίζεται τη μηχανή, όσο και του ασθενή ή του επισκέπτη, στην περίπτωση της ιατρικής εφαρμογής. Οι μέθοδοι και οι τεχνικές υπολογισμού θωρακίσεων που χρησιμοποιούνται ποικίλουν. Συναντώνται, τόσο απλές μέθοδοι, που μέσω προσεγγίσεων και παραδοχών οδηγούν στο αποτέλεσμα, όσο και πολύπλοκες μέθοδοι, οι οποίες στηρίζονται στην προσομοίωση της κατάστασης λειτουργίας του προς θωράκιση χώρου. Εννοείται ότι στην δεύτερη περίπτωση τα αποτελέσματα είναι πολύ πιο ακριβή, και για το λόγο αυτό οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα τείνουν προς την κατεύθυνση αυτή. Η δομή της ΔΕ ακολουθεί περίπου την εξέλιξη των μεθόδων πραγματοποίησης δοσιμετρικών υπολογισμών και υπολογισμών θωρακίσεων.

Η αρχή γίνεται στο 2^ο Κεφάλαιο όπου παρουσιάζονται οι μέθοδοι υπολογισμού θωρακίσεων χώρων όπου λειτουργούν μηχανές ακτίνων-X ιατρικών εφαρμογών, οι οποίες συναντώνται στην βιβλιογραφία. Οι μέθοδοι αυτοί έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό τους τη μη χρησιμοποίηση προσομοίωσης και γενικότερα υπολογιστικών μεθόδων μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα αποτελέσματα προκύπτουν έπειτα από χρήση σχετικά απλών σχέσεων της δοσιμετρίας και της ακτινοπροστασίας και με την χρησιμοποίηση αρκετών απλουστευτικών παραδοχών, έτσι ώστε οι υπολογισμοί να παραμείνουν απλοί. Οι θωρακίσεις που υπολογίζονται με τις μεθόδους αυτές είναι πάντοτε υπερεκτιμημένες. Καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα με τις μεθόδους αυτές να γίνει

ακριβής υπολογισμός των θωρακίσεων, οι παραδοχές και οι απλουστεύσεις γίνονται πάντα προς την «ασφαλή πλευρά» και τα αποτελέσματα αναμένονται, και είναι άλλωστε, δικαιολογημένα υπερεκτιμημένα. Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί είναι αρκετές και μερικές από αυτές, ίσως και οι πιο συνήθεις, παρουσιάζονται μαζί με μικρά παραδείγματα. Στις Η.Π.Α μάλιστα, η πρώτη από τις μεθόδους που παρουσιάζεται αποτελεί Κανονισμό, τον οποίο πρέπει να ακολουθούν οι σχεδιαστές θωρακίσεων και εκφραζόταν παλαιότερα μέσα από το NCRP¹ REPORT N° 49 και από τον Οκτώβριο του 2004 από το αναθεωρημένο NCRP REPORT N° 147.

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφεται σύντομα ο κώδικας προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων σωματιδίων-β και φωτονίων με την ύλη PENELOPE, ο οποίος χρησιμοποιείται στα πλαίσια της ΔΕ, και γίνεται εισαγωγή στις έννοιες οι οποίες είναι απαραίτητες, για τον υπολογισμό θωρακίσεων μέσω της προσομοίωσης Monte-Carlo. Μία τέτοια σημαντική έννοια είναι αυτή του ανιχνευτή απορροφούμενης δόσης ή **Dose enclosure (DE)**. Πρόκειται για μια δυνατότητα που προσφέρει στο χρήστη ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE και αφορά τον υπολογισμό της δόσης σε ένα σώμα που ακτινοβολείται. Δίδεται έτσι η δυνατότητα, αφού πραγματοποιηθούν οι απαραίτητοι δοσιμετρικοί υπολογισμοί, να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα που είναι ο έλεγχος της επάρκειας των ήδη υπαρχόντων θωρακίσεων ή ο υπολογισμός νέων. Στα πλαίσια της ΔΕ έγινε ενδελεχής διερεύνηση της λειτουργίας ενός ανιχνευτή απορροφούμενης δόσης. Η διερεύνηση αυτή έγινε με την σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνει σε σχέση με θεωρητικούς υπολογισμούς, καθώς και με στοιχεία από την βιβλιογραφία. Επισημαίνεται ότι μια δυνατότητα που προσφέρει στο χρήστη ο κώδικας PENELOPE, είναι και η χρήση του ανιχνευτή απορροφούμενης δόσης για τον υπολογισμό της κατανομής της δόσης σε ένα ακτινοβολούμενο σώμα, π.χ. κατά τη διάρκεια μίας θεραπευτικής ακτινοβολήσης. Στο τέλος του Κεφαλαίου δίνεται μια απλή εφαρμογή της υπολογισμού της κατανομής της δόσης σε ένα ακτινοβολούμενο σώμα.

Αφού διαπιστώθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο ο τρόπος που λειτουργεί ο ανιχνευτής απορροφούμενης δόσης και αφού επιβεβαιώθηκε η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που δίνει, στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται το επόμενο βήμα για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων. Το πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίζεται στο παρόν Κεφάλαιο είναι αυτό ενός τυπικού δωματίου

¹ National Council on Radiation Protection and Measurements

μέσα στο οποίο λειτουργεί μια μηχανή ακτίνων-X. Για την περίπτωση αυτή υπολογίζεται η δόση που δέχεται ανθρώπινος ιστός, εξαιτίας της λειτουργίας αυτής της μηχανής, έξω από το δωμάτιο, πίσω από τους διάφορους τοίχους του δωματίου. Επισημαίνεται ότι ανάλογα από τη σχετική θέση του ανθρώπου και δέσμης των ακτίνων-X, η δόση αυτή οφείλεται στην πρωτογενή δέσμη, την σκεδαζόμενη, ή τη διαρρέουσα από τη μηχανή ακτινοβολία. Για τα δύο πρώτα είδη ακτινοβολίας ο υπολογισμός μπορεί να γίνεται από τον κώδικα απευθείας. Όσον αφορά στην έκθεση λόγω της διαρρέουσας ακτινοβολίας, για τον υπολογισμό της χρειάστηκε να αναπτυχθεί ειδική τεχνική.

Στο 5^ο και τελευταίο Κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των όσων έγιναν στα πλαίσια της εκπόνησης αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν τα οποία είναι και άμεσα εφαρμόσιμα και δίνεται μια ιδέα για το τι μπορεί να αποτελέσει το μέλλον αυτής της μεθόδου, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, πως μπορεί να αναπτυχθεί περαιτέρω ποιες επιλογές μπορεί να δώσει σε αυτόν που θα επιλέξει να τη χρησιμοποιήσει είτε να την βελτιώσει.

Η εργασία ολοκληρώνεται με 1 Παράρτημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΩΡΑΚΙΣΕΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ-X

2.1 Γενικά

Ο σκοπός των κάθε είδους θωρακίσεων ιοντιζουσών ακτινοβολιών είναι η μείωση της ακτινοβολίας στην οποία εκτίθενται και της δόσης η οποία απορροφάται από εργαζόμενους σε χώρους ακτινοβόλησης αλλά και από απλούς επισκέπτες των χώρων αυτών, ή γειτονικών, μέσα στα επιτρεπτά όρια, τα οποία τίθενται από τους διεθνείς Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της θωράκισης δωματίων, στα οποία λειτουργούν μηχανές ακτίνων-X για ιατρικές εξετάσεις. Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί έχουν μεταξύ τους πολλά κοινά στοιχεία και δεν θα ήταν λάθος αν κάποιος θεωρούσε τη μια μέθοδο εξέλιξη της άλλης. Όλες ωστόσο είναι συμβατές με τις συστάσεις του Διεθνή Οργανισμού Ακτινοπροστασίας (International Commission on Radiation Protection, ICRP). Στις Ηνωμένες Πολιτείες οι μέθοδοι αυτές έχουν οδηγήσει στην έκδοση από το Εθνικό Συμβούλιο για την Μέτρηση και την Προστασία από τη Ακτινοβολία (National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP) ενιαίου Κανονισμού υπό την μορφή Report, με τίτλο **“NCRP Report No 147 Structural Shielding Design For Medical X-Ray Imaging Facilities”**. Στη συνέχεια της Εργασίας, πριν από την παράθεση των μεθόδων υπολογισμού θωρακίσεων, κρίνεται απαραίτητο να παρατεθούν πολύ συνοπτικά οι αρχές λειτουργίας μίας μηχανής ακτίνων-X, καθώς και βασικά μεγέθη και ορισμοί από το χώρο της ακτινοπροστασίας.

2.2 Η μηχανή ακτίνων-X

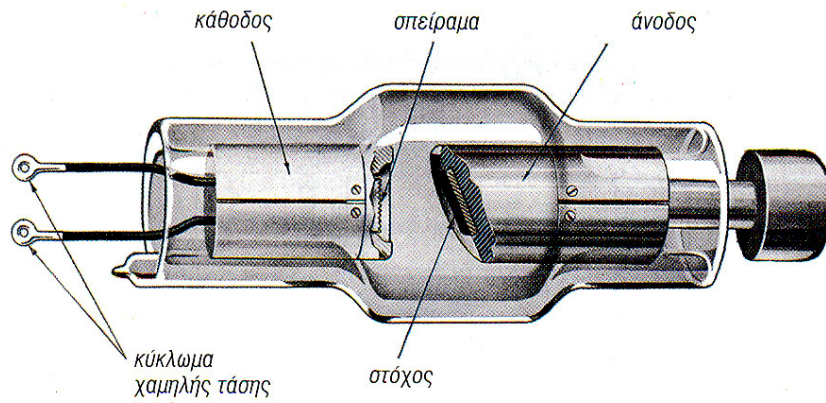
Η ακτινοβολία X παράγεται μέσα σε γυάλινους σωλήνες υψηλού κενού (λυχνία Coolidge), μέσα στους οποίους ηλεκτρόνια επιταχύνονται εξαιτίας ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου και προσπίπτουν πάνω σε στόχο. Οι ακτίνες-X που παράγονται από την πρόσπτωση των ηλεκτρονίων στο στόχο είναι, αφενός μεν χαρακτηριστικές ακτίνες-X του υλικού του στόχου (άνοδος), αφετέρου δε ακτίνες-X με συνεχές ενεργειακό φάσμα (ακτινοβολία πεδήσεως, Bremsstrahlung).

Οι σύγχρονες λυχνίες Coolidge χρησιμοποιούν ηλεκτρόνια ως φορτισμένα σωματίδια, τα οποία εκπέμπονται από τη θερμαινόμενη κάθοδο της λυχνίας λόγω του φαινομένου της θερμοϊονικής εκπομπής. Η κάθοδος της λυχνίας είναι φτιαγμένη από νήμα δύστηκτου μετάλλου (π.χ. Βολφράμιο) και διαρρέεται από ρεύμα το οποίο έχει ως συνέπεια τη θέρμανση της καθόδου και την εν συνεχεία θερμοϊονική εκπομπή ηλεκτρονίων. Το ρεύμα των ηλεκτρονίων που επιταχύνονται μεταξύ καθόδου και ανόδου (mA), σε συνδυασμό με το χρονικό διάστημα που λειτουργεί η μηχανή (s), προσδιορίζει τελικά την ποσότητα των ηλεκτρονίων που θα φτάσουν στην άνοδο της μηχανής (mA·s) και κατά συνέπεια το πλήθος των ακτίνων-X που θα παραχθούν κατά τη λειτουργία της μηχανής.

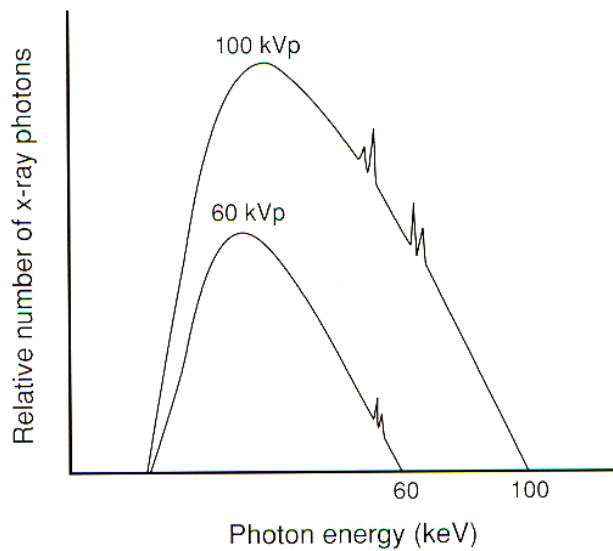
Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος στο οποίο πρέπει να γίνει αναφορά είναι η Τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου της λυχνίας. Πρόκειται για υψηλή τάση, της τάξης των αρκετών χιλιάδων volts (kilovolts) και το μέγεθος που την εκφράζει κατά την πραγματοποίηση μιας ακτινογραφίας είναι τα kVp (kilo Volt peak). Η υψηλή τάση καθορίζει τη μέγιστη τιμή της ενέργειας των ηλεκτρονίων του φάσματος εκπομπής της λυχνίας (keV) και προσδιορίζει την ποιότητα και τη διαπερατότητα της δέσμης της ακτινοβολίας:

- υψηλό kVp \in υψηλή ενέργεια \in υψηλή διαπερατότητα \in σκληρή δέσμη, αντίθετα,
- χαμηλό kVp \in χαμηλή ενέργεια \in χαμηλή διαπερατότητα \in μαλακή δέσμη.

Συνοπτικά, μια σύγχρονη μηχανή ακτίνων-X αποτελείται από ένα γυάλινο σωλήνα υψηλού κενού, την άνοδο που είναι συνήθως ένας περιστρεφόμενος δίσκος με συχνότητα 3000 – 9000 RPM από δύστηκτο μέταλλο, συνήθως Βολφράμιο (W), το ηλεκτρικό κύκλωμα που παρέχει την τάση για την παραγωγή του ρεύματος στην κάθοδο, το ηλεκτρικό κύκλωμα υψηλής τάσης για την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων, ένα σύστημα ψύξης της λυχνίας καθώς και ένα μεταλλικό κέλυφος που περιβάλλει τον σωλήνα κενού, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της διαρρέουσας από τη λυχνία ακτινοβολίας. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται μια τυπική λυχνία Coolidge σταθερής (μη περιστρεφόμενης) ανόδου και στο σχήμα (2.1) παρατίθεται τυπικό ενεργειακό φάσμα μηχανής ακτίνων-X.



Εικ. 2.1 Λυχνία Coolidge σταθερής ανόδου



Σχήμα 2.1 Τυπικό ενεργειακό φάσμα μηχανής ακτίνων-Χ, με άνοδο από Βολφράμιο και τη λυχνία να λειτουργεί στα 60 και 100 kVp

2.3 Θεμελιώδη μεγέθη από τη δοσιμετρία και την ακτινοπροστασία

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η μεθοδολογία υπολογισμού δόσεων, η οποία απαντάται στη βιβλιογραφία, είναι απαραίτητη η εισαγωγή ορισμένων σημαντικών ορισμών και εννοιών που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς αυτούς, καθώς και ορισμένοι όροι από την ακτινοπροστασία.

- **Έκθεση (X):** Η έκθεση είναι ένα μέτρο του βαθμού ιονισμού του αέρα, λόγω ακτινοβόλησης από ακτινοβολίας-X ή ακτινοβολίας-γ. Μονάδες της στο σύστημα SI είναι το 1 C/kg, ενώ η μονάδα που συνήθως χρησιμοποιείται είναι το Röntgen (R) όπου $1R = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$. Ως **Ρυθμός Έκθεσης** ορίζεται το μέγεθος dX/dt (π.χ σε mR h^{-1}).
- **Απορροφούμενη δόση (D):** Είναι η ενέργεια που **αποτίθεται** στην ύλη, από οποιοδήποτε είδος ιοντίζουσας ακτινοβολίας, ανά μονάδα ακτινοβολούμενης μάζας. Στο σύστημα SI οι μονάδες της είναι $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. Μία άλλη μονάδα, που σπάνια χρησιμοποιείται πλέον σήμερα είναι το rad (**r**adiation **a**bsorbed **d**ose). Ισχύει η σχέση: $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$. Ως **Ρυθμός Απορροφούμενης Δόσης** ορίζεται το μέγεθος dD/dt (π.χ σε nGy h^{-1}).
- **KERMA (Kinetic Energy Released in Matter):** Κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας-X ή της ακτινοβολίας-γ με τον αέρα προκαλούνται ιονισμοί, κατά τους οποίους **απελευθερώνονται** ηλεκτρόνια με ορισμένη κινητική ενέργεια. Το KERMA (ή air-kerma) είναι ένα μέτρο αυτής της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων η οποία απελευθερώνεται στον αέρα, λόγω της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας-X ή ακτινοβολίας-γ με αυτόν. Η μονάδα Air KERMA στο σύστημα SI είναι το 1 Gy (1 J/kg αέρα). Για ένα πεδίο φωτονιακών ακτινοβολιών, η Απορροφούμενη Δόση είναι πάντα μικρότερη ή ίση από το KERMA, καθώς είναι δυνατόν, ένα τμήμα μόνον της κινητικής ενέργειας που απελευθερώνεται σε ένα σημείο (air-kerma) να απορροφηθεί τοπικά (Δόση), ενώ το υπόλοιπο τμήμα της κινητικής ενέργειας που απελευθερώνεται μπορεί να απορροφηθεί μακρύτερα. Έκθεση σε 1R αντιστοιχεί σε air-kerma 8.76 mGy .
- **Εξασθένηση:** Η μείωση του air-kerma ή του ρυθμού έκθεσης κατά την διέλευση της ακτινοβολίας μέσα από την ύλη. Στην πραγματικότητα, αυτό που εξασθενεί είναι η ροή της ακτινοβολίας (fluence φωτόνια/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) και ως αποτέλεσμα, η δυνατότητα της να προκαλέσει ιονισμούς και να αποθέσει ενέργεια στο υλικό με το οποίο αλληλεπιδρά (οπότε εξασθενεί το air-kerma ή η δόση).

- **Controlled area:** Μια περιοχή στην οποία υπάρχει πεδίο ακτινοβολιών (λόγω π.χ. της λειτουργίας μίας μηχανής ακτίνων-X) και στην οποία έχει πρόσβαση μόνο εξουσιοδοτημένο προσωπικό το οποίο και δοσιμετρείται (περιορισμένη πρόσβαση). Η επαγγελματική έκθεση του προσωπικού σε ακτινοβολία στην περιοχή αυτή ελέγχεται από τον αρμόδιο υπεύθυνο για την ακτινοπροστασία. Προφανώς, στην περίπτωση των ιατρικών εφαρμογών, στην ελεγχόμενη περιοχή είναι δυνατή και η είσοδος ασθενούς που υπόκειται σε εξέταση ή θεραπεία με χρήση της υπόψη ακτινοβολίας.
- **Uncontrolled area:** Οποιοσδήποτε χώρος που δεν χαρακτηρίζεται ως controlled area.
- **Όριο δόσης:** Το όριο για την απορροφούμενη δόση, προκειμένου να αποφευχθούν τα ντετερμινιστικά και να μειωθούν σε ένα αποδεκτά όρια τα στοχαστικά αποτελέσματα στον ανθρώπινο οργανισμό λόγω ακτινοβόλησης.
- **Shielding design goal:** Το όριο δόσης το οποίο γίνεται προσπάθεια να επιτευχθεί με κατάλληλη σχεδίαση και τοποθέτηση της θωράκισης.

Κατά τον υπολογισμό μίας θωράκισης, ένα πολύ σημαντικό στοιχείο το οποίο πάντα λαμβάνεται υπόψη είναι τα ισχύοντα όρια δόσης, τα οποία καθορίζονται από Διεθνείς Οργανισμούς. Προκειμένου να εκτιμηθεί η επικινδυνότητα η οποία συνδέεται με την έκθεση ενός ατόμου σε ακτινοβολία, δεν αρκεί μόνο η μέτρηση (ή ο υπολογισμός) της Απορροφούμενης Δόσης, δηλαδή της ενέργειας που αποτίθεται στον ανθρώπινο οργανισμό κατά την ακτινοβόληση (J/kg). Καθώς η επικινδυνότητα που συνεπάγεται η έκθεση σε ακτινοβολία εξαρτάται και από το όργανο ή τον ιστό που ακτινοβολείται, αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας (φωτόνια σωματίδια-β κλπ), είναι απαραίτητος ο ορισμός ενός μεγέθους το οποίο να λαμβάνει υπόψη του τις παραμέτρους αυτές. Για το σκοπό αυτό, ορίζεται αρχικά η **Ισοδύναμη Δόση (H)**, που είναι το μέγεθος το οποίο εκφράζει το βιολογικό αποτέλεσμα της απορροφούμενης δόσης, ανάλογα με το είδος της ακτινοβολίας. Η ισοδύναμη Δόση για ένα είδος ακτινοβολίας (R) υπολογίζεται από τη σχέση :

$$H_{T,R} = W_R * D_{T,R} \quad (2.1)$$

όπου $D_{T,R}$ είναι η μέση Απορροφούμενη Δόση σε ένα όργανο ή ιστό (T) εξαιτίας ενός είδους ακτινοβολίας (R). Ο συντελεστής στάθμισης w_R ονομάζεται συντελεστής στάθμισης του είδους της ακτινοβολίας. Οι τιμές αυτού του συντελεστή εξαρτώνται από το είδος και την ποιότητα (ενέργεια) της ακτινοβολίας. Στον Πίνακα 2-1 στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται οι τιμές του συντελεστή αυτού για διάφορα είδη ακτινοβολιών.

Όταν η ακτινοβολία ενός οργάνου ή ιστού γίνεται με ακτινοβολίες διαφόρων ειδών και ενεργειών, τότε η Συνολική Ισοδύναμη Δόση παρέχεται από το άθροισμα:

$$H_T = \sum_R w_R * D_{T,R} \quad (2.2)$$

όπου η άθροιση περιλαμβάνει όλα τα είδη των ακτινοβολιών. Μονάδα τους Ισοδύναμης Δόσης στο σύστημα SI είναι το (**Sievert, Sv**) και ισχύει $1\text{Sv} = 1\text{J/kg}$. Μία άλλη μονάδα, που σπάνια χρησιμοποιείται πλέον σήμερα, είναι το rem (**roentgen equivalent man**). Ισχύει η σχέση: $1\text{Sv} = 100\text{ rem}$.

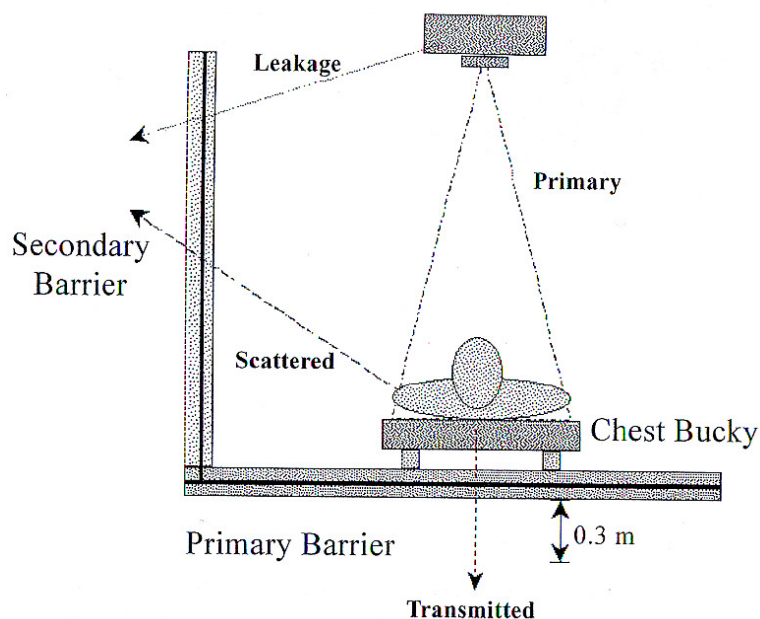
Η Ισοδύναμη Δόση λαμβάνει υπόψη τη διαφορετική επίδραση των διαφόρων ειδών ακτινοβολίας τους ιστούς, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη διαφορετική απόκριση (ευαισθησία) καθενός ιστού. Το μέγεθος το οποίο εισάγεται προκειμένου να εκφράσει τη συνολική επικινδυνότητα για τον άνθρωπο, εξαιτίας της έκθεσης σε ακτινοβολία ολοκλήρου του ανθρώπινου σώματος, ή τμημάτων αυτού, είναι η **Ενεργός Δόση (Effective Dose)**. Καθώς η Ενεργός Δόση είναι ένα μέγεθος που εκφράζει την επικινδυνότητα συνολικά για έναν άνθρωπο, είναι και αυτή που συχνά υπόκειται στα διάφορα όρια δόσεων τα οποία τίθενται και χρησιμοποιείται ως βάση για τους υπολογισμούς των θωρακίσεων. Η ενεργός Δόση (E) υπολογίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα των ισοδύναμων δόσεων σε διάφορα όργανα και ιστούς, με χρήση συντελεστών στάθμισης, ανάλογα με την ευαισθησία κάθε ιστού. Είναι δηλαδή:

$$E = \sum_T w_T * \sum_R (w_R * D_{T,R}) \quad (2.3)$$

όπου w_T είναι ο συντελεστής στάθμισης ιστού, ο οποίος έχει διάφορες τιμές, ανάλογα με το είδος του ιστού που ακτινοβολείται. Τιμές του συντελεστή w_T Παρατίθενται στον Πίνακα 2-2 στο τέλος του κεφαλαίου.

2.4 Θεμελιώδη μεγέθη για τον υπολογισμό θωρακίσεων μηχανών ακτίνων-X

Για τον υπολογισμό της θωράκισης ενός χώρου όπου λειτουργεί μία μηχανή ακτίνων-X πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφορες παράμετροι, όπως π.χ. το κατά πόσον ένας τοίχος εκτίθεται απευθείας στη δέσμη των ακτίνων-X, ή έμμεσα, στη σκεδαζόμενη ακτινοβολία στους τοίχους ή στον ασθενή κλπ. Στη συνέχεια δίδονται μία σειρά από ορισμούς, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την κατανόηση της μεθοδολογίας υπολογισμού θωρακίσεων μίας μηχανής ακτίνων-X. Τα μεγέθη τα οποία ορίζονται διακρίνονται στην εικόνα 2.2:



Εικ. 2.2 Τυπική διάταξη χώρου ακτινογράφησης

- **Πρωτεύουσα ακτινοβολία (primary beam):** Η ακτινοβολία που εκπέμπεται απευθείας από την πηγή και η οποία χρησιμοποιείται για την διαδικασία της απεικόνισης. Στην περίπτωση μίας μηχανής ακτίνων-X πρόκειται για την ακτινοβολία που εξέρχεται από το παράθυρο της μηχανής.

- **Ακτινοβολία διαρροής (leakage radiation):** Κάθε άλλη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την πηγή και η οποία δεν θεωρείται primary beam. Στην περίπτωση μίας μηχανής ακτίνων-X πρόκειται για την ακτινοβολία που εξέρχεται από οπουδήποτε αλλού εκτός από το παράθυρο της μηχανής (π.χ. πίσω από τη μηχανή). Παρόλο που μία μηχανή ακτίνων-X φέρει κατάλληλη θωράκιση, ένα τμήμα της ακτινοβολίας που παράγεται στο εσωτερικό της μπορεί να διαφύγει μέσω της θωράκισης.
- **Σκεδαζόμενη ακτινοβολία (scattered radiation):** Η ακτινοβολία η οποία, μετά από την αλληλεπίδρασή της πρωτεύουσας ακτινοβολίας με την ύλη, παρουσιάζεται με διεύθυνση διαφορετική από τη διεύθυνση της πρωτεύουσας και σχεδόν πάντα με χαμηλότερη ενέργεια. Στην περίπτωση υπολογισμού θωρακίσεων, ως σκεδαζόμενη ακτινοβολία θεωρείται η ακτινοβολία που προέρχεται από τη σκέδαση της πρωτεύουσας ακτινοβολίας με τον ασθενή, τους τοίχους του δωματίου ή και ενδεχομένως ειδικά πετάσματα που έχουν τοποθετηθεί για λόγους ακτινοπροστασίας.
- **Πάχους Υποδιπλασιασμού (Half Value Layer HVL).** Πρόκειται για μία έννοια που έχει πολύ μεγάλη σημασία στην ακτινοπροστασία και κατά τον υπολογισμό θωρακίσεων. Για την περίπτωση παράλληλης μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων, το HVL για ένα υλικό ορίζεται ως το πάχος του υλικού το οποίο επαρκεί για τη μείωση της έντασης της δέσμης των παρθενικών φωτονίων στο μισό. Συνδέεται άμεσα με τον ολικό **γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ** του υλικού για την υπόψη ενέργεια, μέσω της σχέσης **$HVL = \ln 2 / \mu$** . Στην περίπτωση της ιατρικής ραδιολογίας, όπου η δέσμη των φωτονίων στην έξοδο μίας μηχανής ακτίνων-X δεν είναι μονοενεργειακή, το HVL ενός συγκεκριμένου υλικού ορίζεται ως το πάχος του υλικού το οποίο απαιτείται για να μειωθεί η δέσμη ακτίνων-X, κατά το ήμισυ της αρχικής τιμής της, όπως μετράται με ένα όργανο βαθμονομημένο για μέτρηση της Έκθεσης. Αυτός ο ορισμός του HVL χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας (**Quality**) μίας δέσμης.
- **Primary barrier:** Πρόκειται για το σώμα αυτό (π.χ ένας τοίχος, ή ένα πέτασμα) που έχει στόχο να περιορίσει την πρωτεύουσα ακτινοβολία κάτω από ένα επιθυμητό όριο. Στην περίπτωση μίας μηχανής ακτίνων-X είναι συνήθως ο τοίχος απέναντι από την

έξοδο της πρωτεύουσας δέσμης. Στην περίπτωση που μία μηχανή μπορεί να περιστρέφεται ώστε η έξοδος της να είναι δυνατόν να βρεθεί απέναντι από πολλούς τοίχους, τότε κάθε τοίχος πρέπει να θεωρείται και να υπολογίζεται ως Primary barrier.

- **Secondary barrier:** Πρόκειται για το σώμα αυτό (π.χ ένας τοίχος, ή ένα πέτασμα) που έχει στόχο να περιορίσει την διαρρέουσα και τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι, η μεθοδολογία που συνήθως χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θωράκισης ενός χώρου όπου λειτουργεί μία μηχανή ακτίνων-X, δεν αποσκοπεί στον περιορισμό του ρυθμού απορροφούμενης δόσης στους ανθρώπους που βρίσκονται σε γειτονικούς χώρους (π.χ. στο διπλανό δωμάτιο), αλλά στο περιορισμό της συνολικής απορροφούμενης δόσης, την οποία θα δεχθεί ένας άνθρωπος ο οποίος βρίσκεται στους χώρους αυτούς. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η υιοθέτηση ορισμένων σεναρίων, σχετικά με τη χρήση της μηχανής ακτίνων-X και την παρουσία ανθρώπων στους διάφορους χώρους. Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένοι όροι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των σεναρίων αυτών ακτινοβολήσης.

- **Φόρτος εργασίας (workload W):** Ο βαθμός χρήσης της μηχανής των ακτίνων X. Στην περίπτωση υπολογισμού των θωρακίσεων ο φόρτος εργασίας της μηχανής εκφράζεται σε μονάδες mA·min, που είναι το γινόμενο του ρεύματος στο οποίο δουλεύει η μηχανή (mA) για το συγκεκριμένο τύπου εξέτασης για τον οποίο χρησιμοποιείται, επί το συνολικό χρόνο λειτουργίας της μηχανής (min).
- **Παράγοντας χρήσης του χώρου (occupancy factor T):** Παράγοντας που εκφράζει, ως κλάσμα του φόρτου εργασίας της μηχανής, πόσο χρονικό διάστημα παρευρίσκονται άτομα στους χώρους πίσω από τη θωράκιση (π.χ. στο διπλανό δωμάτιο, το διάδρομο κλπ).
- **Παράγοντας χρήσης (Use factor U):** Το ποσοστό του φόρτου εργασίας της μηχανής κατά το οποίο η πρωτεύουσα ακτινοβολία προσπίπτει επάνω στο συγκεκριμένο barrier το οποίο εξετάζεται (primary ή secondary). Ο παράγοντας αυτός έχει τιμή διαφορετική

της μονάδας, στην περίπτωση που η μηχανή μπορεί να κινείται και να περιστρέφεται, και κατά συνέπεια υπάρχουν περισσότεροι του ενός τοίχοι (ή και το ίδιο το δάπεδο) του θα πρέπει να θεωρηθούν ως primary barriers).

Τα όρια δόσεων που τίθενται σε κάθε περίπτωση διαφέρουν ανάλογα με τον χώρο στον οποίο αναφέρονται (controlled ή uncontrolled περιοχές) και το κατά πόσον το άτομο θεωρείται ή όχι επαγγελματικά εκτιθέμενο σε ακτινοβολία (και άρα δοσιμετρούμενο) ή όχι. Ειδικά για την περίπτωση ακτινοβόλησης εξαιτίας της λειτουργίας μίας μηχανής ιατρικών ακτίνων-X, τα όρια δόσεων αναφέρονται σε ένα συγκεκριμένο σημείο πίσω από ένα προστατευτικό barrier. Τα όρια αυτά εκφράζονται τις περισσότερες φορές σε εβδομαδιαίες τιμές, αφού έτσι εκφράζεται παραδοσιακά και το φορτίο της μηχανής.

2.4.1 Όρια δόσεων

Αναφορικά με τον τρόπο προσδιορισμού των ορίων δόσεων, παρατίθενται στη συνέχεια ορισμένοι απλοί συλλογισμοί.

Για τις ενέργειες των φωτονίων X που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται στην ακτινοδιαγνωστική (50 – 150 keV) και για μαλακούς ιστούς (όχι για τα οστά), έχει προσδιοριστεί ότι πρακτικά ισχύει η αριθμητική αντιστοιχία:

$$1 \text{ R} \rightarrow 1 \text{ rem} \rightarrow 1 \text{ rad}$$

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για φωτόνια, ο συντελεστής w_R είναι ίσος με 1, καθώς και στο γεγονός ότι για μαλακούς ιστούς και για την υπόψη ενεργειακή περιοχή Έκθεση 1R οδηγεί σε απορροφούμενη δόση 1 rad. Τελικά δηλαδή, η Ισοδύναμη Δόση (σε rem) η και η Απορροφούμενη Δόση (σε rad) είναι προσεγγιστικά ίσες **αριθμητικά** με την Έκθεση (σε R). Για τα οστά, όπου στην υπόψη ενεργειακή περιοχή, 1R οδηγεί σε απορροφούμενη δόση ~5rad, η ισοδύναμη δόση (σε rem) είναι πέντε περίπου φορές μεγαλύτερη (αριθμητικά) της τιμής της Έκθεσης (σε R). Με βάση την παραπάνω αντιστοιχία εκθέσεων και δόσεων, και τα επιτρεπτά όρια δόσης έχουν καθοριστεί τα όρια για τις ελεγχόμενες και μη ελεγχόμενες περιοχές. Τα όρια αυτά εκφράζονταν παλαιότερα ως όρια έκθεσης ενώ πλέον εκφράζονται ως όρια απορροφούμενη δόσης σε μονάδες mSv/week.

Όπως είναι φυσικό, οι εργαζόμενοι που απασχολούνται σε *controlled area* έχουν σημαντική πιθανότητα να εκτεθούν σε ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της εργασίας τους. Οι άνθρωποι αυτοί είναι εν γένει κατάλληλα εκπαιδευμένοι στο χειρισμό των ακτινοβολιών και υπόκεινται σε συνεχή παρακολούθηση και δοσιμέτρηση. Το NCRP (1993) συνιστά ένα ετήσιο όριο ενεργού δόσης $E = 50 \text{ mSv y}^{-1}$, όπου η συνολική ενεργός δόση δεν πρέπει επιπλέον να υπερβαίνει το γινόμενο $A \cdot 10 \text{ mSv}$, όπου A είναι η ηλικία του εργαζομένου. Για το σχεδιασμό νέων εγκαταστάσεων η ενεργός δόση E πρέπει να είναι ένα κλάσμα των 10 mSv y^{-1} . Λαμβάνοντας υπόψη και άλλες παραμέτρους, όπως την έκθεση εγκύου επαγγελματικά εκτιθέμενης, το (NCRP Report No 147) συνιστά ετήσιο όριο της ενεργού δόσης E τα 5 mSv y^{-1} . Ως αποτέλεσμα, το όριο το οποίο θα πρέπει να αποτελεί το στόχο για την οποιαδήποτε θωράκιση (shielding design goal) διαμορφώνεται τελικά σε **0.1 mSv/week** ή **5 mSv/yr** για την ενεργή δόση, ή αντίστοιχα σε **0.1 mGy/week** ή **5 mGy/yr** για το air-kerma.

Για τις περιοχές που χαρακτηρίζονται ως *uncontrolled areas*, τα όρια δόσης είναι σαφώς μικρότερα. Πρόκειται για χώρους όπου κυκλοφορούν ασθενείς, επισκέπτες, εργαζόμενοι οι οποίοι δεν προβλέπεται να ακτινοβολούνται ως αποτέλεσμα της δραστηριότητάς τους, και γενικότερα άτομα μη επαγγελματικά εκτιθέμενα, τα οποία χαρακτηρίζονται ως «κοινό». Βάσει των κανονισμών του ICRP (NCRP Report No 147) για την ακτινοβόληση του κοινού, η θωράκιση πρέπει να εξασφαλίζει ότι η ατομική δόση δεν θα υπερβαίνει την τιμή **των 1 mSv/yr** για την ενεργή δόση, ή την τιμή **1 mGy/yr** για το **air-kerma**. Αυτό επιτυγχάνεται τελικά θέτοντας ως shielding design goal την τιμή των **0.02 mGy/week**.

2.5 Μία απλή μέθοδος για τον υπολογισμό θωρακίσεων

Η θωράκιση ενός δωματίου στο οποίο λειτουργεί μία μηχανή ακτίνων-X έχει ως στόχο την προστασία των ατόμων (επαγγελματικά ή μη εκτιθέμενων) που κινούνται και εργάζονται στα γειτονικά δωμάτια, δηλαδή τη μείωση της δόσης στην οποία μπορεί αυτά να εκτεθούν. Ο υπολογισμός της θωράκισης συνίσταται καταρχήν στον έλεγχο της επάρκειας των δομικών στοιχείων της κατασκευής (τοίχοι, πατώματα κλπ) για τη μείωση της δόσης στα επιτρεπτά επίπεδα. Στην περίπτωση που τα δομικά στοιχεία της κατασκευής δεν επαρκούν για το σκοπό αυτό, υπολογίζεται επιπλέον θωράκιση (συνήθως από μολύβι) η οποία τοποθετείται επιπρόσθετα στους τοίχους, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Για τον υπολογισμό των θωρακίσεων δωματίων όπου λειτουργούν μηχανές ακτίνων-X, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι, οι περισσότερες όμως αποτελούν εξελίξεις και βελτιώσεις μιας κύριας και αρκετά απλουστευμένης μεθόδου. Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζεται πρώτα η απλουστευμένη αυτή μέθοδος, αυτή που περιγράφεται στο NCRP 49, ενώ στη συνέχεια, σε επόμενες παραγράφους, ακολουθεί η παρουσίαση και των άλλων νεότερων και ακριβέστερων μεθόδων. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η μέθοδος που προτείνεται στις Η.Π.Α. από το NCRP (Report No 147) και η οποία αποτελεί κανονισμό. Πρόκειται για την νεότερη των μεθόδων, η οποία εκδόθηκε τον Οκτώβριο του 2004 και η οποία δεν αποτελεί απλή οδηγία αλλά επίσημο Κανονισμό για τις ΗΠΑ.

Ο υπολογισμός και η κατασκευή των θωρακίσεων σύμφωνα με την απλούστερη μέθοδο περιλαμβάνει τρία στάδια:

1. Κατ'αρχήν, υπολογίζεται το πάχος της θωράκισης που απαιτείται για κάθε ένα από τα barriers ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη τη σχεδίαση και τις διαστάσεις του δωματίου, τη φύση και την ποσότητα της ακτινοβολίας και τις παραδοχές για το ποια και πόσα άτομα και το πώς πρόκειται να εκτεθούν σε αυτήν.
2. Σε δεύτερο στάδιο, αφού υπολογιστούν και κατασκευαστούν οι απαραίτητες θωρακίσεις, ελέγχεται η επάρκεια και η ακεραιότητά τους με μια σειρά από κατάλληλες και εκτενείς μετρήσεις.
3. Τέλος αφού η θωράκιση περάσει τις κατάλληλες δοκιμές, εφοδιάζεται με πιστοποιητικά ελέγχου και καταλληλότητας και γίνεται ο σχεδιασμός μελλοντικών ελέγχων της.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, το πρώτο στάδιο που αφορά τον υπολογισμό των θωρακίσεων είναι και το πλέον κρίσιμο. Στο στάδιο αυτό θα εστιάσει η παρούσα ΔΕ. Για τον καθορισμό του πάχους των θωρακίσεων, οι οποίες απαιτούνται για την προστασία των χώρων που περιβάλλουν έναν ακτινολογικό θάλαμο, προαπαιτείται ο υπολογισμός της Έκθεσης (R/week) σε αυτούς τους χώρους. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με την παρακάτω σχέση [Κανδαράκης Ι., 1998] :

$$E = \varepsilon * W * U * T * \frac{1}{x^2} \quad (2.4)$$

όπου:

- ε** είναι ένας συντελεστής μονάδων που εκφράζει πόσα Roentgen αντιστοιχούν στο συνολικό φορτίο mA·min που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη όλων των ακτινογραφιών κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την απόσταση από τη μηχανή και τα kVp. Τυπικές τιμές του ε δίνονται στον Πίνακα 2-3 στο τέλος του Κεφαλαίου. Ωστόσο, πολύ συχνά ο συντελεστής ε θεωρείται ότι έχει σταθερή τιμή για τις κοινές ακτινογραφικές λυχνίες ίση με 1R/mA.min ή 0.01Gy/mA.min air-kerma σε απόσταση 1m από τη λυχνία. Έτσι, στους υπολογισμούς μας τελικά θεωρούμε ότι $\epsilon = 1$.
- E** είναι η έκθεση σε Roentgen ανά εβδομάδα (R/week),
- W** είναι ο φόρτος εργασίας της μηχανής (workload) σε mA·min/week. Η τιμή του φόρτου εργασίας που χρησιμοποιείται εξαρτάται από το είδος της εξέτασης, από τον αριθμό των εξεταζομένων ατόμων στη μονάδα χρόνου και από το συνολικό χρόνο λειτουργίας της ακτινοδιαγνωστικής μονάδας. Οι τιμές του W έχουν καθοριστεί από τους διεθνείς κανονισμούς ακτινοπροστασίας και ορισμένες τιμές για τυπικές περιπτώσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-4 στο τέλος του Κεφαλαίου.
- U** είναι ο παράγοντας χρήσης (use factor) που δείχνει το ποσοστό του φόρτου εργασίας της μηχανής κατά το οποίο η πρωτεύουσα ακτινοβολία προσπίπτει επάνω στο barrier που εξετάζεται (πρωτεύον ή δευτερεύον κατά περίπτωση). Τυπικές τιμές της παραμέτρου παρατίθενται στον Πίνακα 2-5 στο τέλος του Κεφαλαίου.
- T** είναι ο παράγοντας χρήσης του χώρου (occupancy factor) που εκφράζει, ως κλάσμα του φόρτου εργασίας της μηχανής, πόσο χρονικό διάστημα παρευρίσκονται άτομα στους χώρους πίσω από το barrier που εξετάζεται. Τυπικές τιμές παρατίθενται στον Πίνακα 2-6 στο τέλος του Κεφαλαίου.
- x** είναι η απόσταση (σε m) από τη λυχνία του σημείου στο οποίο υπολογίζεται η έκθεση.

Σε περίπτωση που δεν είναι γνωστός ο φόρτος εργασίας της μηχανής (workload), ο υπολογισμός του μπορεί να γίνει εύκολα με την χρήση της σχέσης:

$$W = N * \text{Φορτίο} \quad (2.5)$$

όπου:

N ο αριθμός των ιατρικών εξετάσεων που γίνονται με την υπόψη μηχανή την εβδομάδα,

Φορτίο το φορτίο της μηχανής (m·As) για τη συγκεκριμένη εξέταση.

Για παράδειγμα, αν με μία μηχανή ακτίνων-X γίνονται 100 εξετάσεις ορισμένου τύπου (π.χ ακτινογραφίες θώρακα) την εβδομάδα, και το *Φορτίο* είναι 60 m·As ανά εξέταση, τότε το W της μηχανής διαμορφώνεται σε:

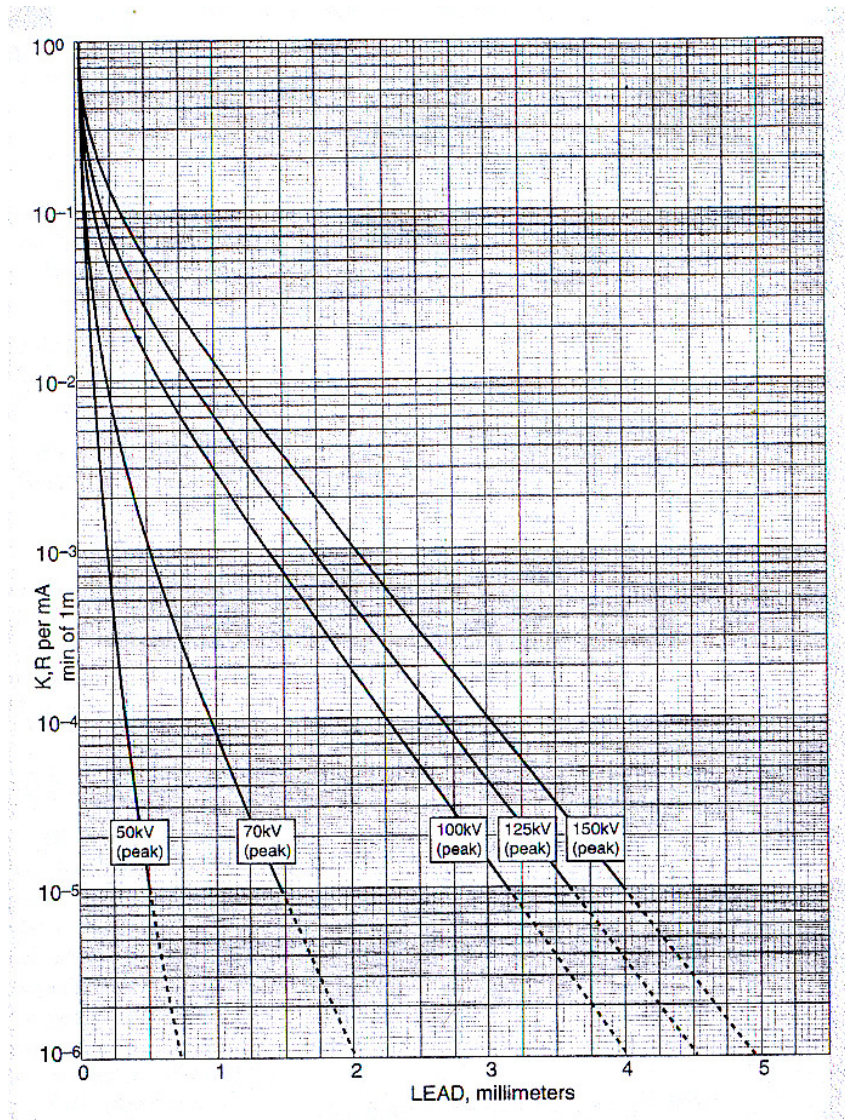
$$W = 100 \text{ (εξετάσεις/week)} * 60 \text{ (m·As/εξέταση)} * 1/60 = 100 \text{ mA.min}$$

Όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, η σχέση (2.4) δεν λαμβάνει καθόλου υπόψη την εξασθένηση της ακτινοβολίας, μέσα από τα δομικά στοιχεία του δωματίου, ή την επιπλέον θωράκιση που ενδεχομένως υπάρχει. Η συνολική εξασθένηση που παρέχεται από τα δομικά στοιχεία και τη θωράκιση του δωματίου (που στη συνέχεια για λόγους συντομίας θα ονομάζεται συνολική θωράκιση) εκφράζεται μέσω ενός **Συντελεστή Εξασθένησης K**. Ο συντελεστής αυτός που εκφράζεται σε μονάδες R/mA.min στο 1 m, πρέπει να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να οδηγήσει στον υπολογισμό της έκθεσης ενός ατόμου σε μία ορισμένη θέση πίσω από τη θωράκιση (στο 1m). Τελικά, η τιμή του E υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$E = K * \varepsilon * W * U * T * \frac{1}{x^2} \quad (2.6)$$

Αυτή είναι και η τιμή που πρέπει να εναρμονίζεται με τους Διεθνείς Κανονισμούς και τα όρια που τίθενται για λόγους ακτινοπροστασίας. Ο συντελεστής εξασθένησης K, δεν βρίσκεται από Πίνακες, αλλά υπολογίζεται από τη σχέση (2.6), θέτοντας ως όριο για την Έκθεση E το **shielding design goal** της θωράκισης της οποίας γίνεται ο υπολογισμός (παράγραφος 2-3). Μετά τον υπολογισμό του K, με τη βοήθεια πινάκων και διαγραμμάτων της βιβλιογραφίας, με βάση το K και ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένη η θωράκιση (π.χ. ο τοίχος), υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος της. Στο Διάγραμμα 2-1 παρατίθενται καμπύλες συσχέτισης του συντελεστή εξασθένησης K με το πάχος της απαιτούμενης θωράκισης μολύβδου (mm), με παράμετρο τα kVp της μηχανής. Πολλές φορές οι υπολογισμοί του πάχους γίνονται από

διαγράμματα που συσχετίζουν το συντελεστή εξασθένησης K με το πάχος υποδιπλασιασμού (HVL). Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζονται πόσα πάχη υποδιπλασιασμού από συγκεκριμένο υλικό της θωράκισης, απαιτούνται ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός υποβιβασμός της έκθεσης.



Διάγραμμα 2-1 Διάγραμμα συσχέτισης του συντελεστή εξασθένησης K με το πάχος του primary barrier για θωράκιση μολύβδου [Πηγή NCRP Report 147]

Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί την πρώτη προσέγγιση στον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους θωράκισης ακτινοβολίας που θεωρείται ως πρωτεύουσα (primary barrier). Στην περίπτωση που η δομική κατασκευή (π.χ. υπάρχον τοίχος) παρέχει ήδη κάποιου είδους θωράκιση, προκειμένου να εκτιμηθεί η επιπλέον θωράκιση (π.χ. φύλλο μολύβδου) που πρέπει να

τοποθετηθεί, εκτιμάται το ισοδύναμο πάχος μολύβδου της υπάρχουσας δομικής κατασκευής (mm), οπότε η επιπλέον θωράκιση που απαιτείται (σε mm) είναι η διαφορά του απαιτούμενου πάχους θωράκισης από το ήδη υπάρχον.

Οι θωρακίσεις ωστόσο έχουν σκοπό την προστασία προσωπικού και του κοινού όχι μόνο από τη πρωτεύουσα ακτινοβολία αλλά και από την ακτινοβολία διαρροής και τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία. Τέτοιου είδους θωρακίσεις χαρακτηρίζονται ως δευτερεύουσες, με τα πάχη τους να είναι σαφώς μικρότερα (secondary barrier). Είναι προφανές επίσης ότι για έναν τοίχο όπου έχει υπολογισθεί ως πρωτεύουσα θωράκιση, υπερκαλύπτεται ταυτόχρονα και η απαίτηση υπολογισμού του ως δευτερεύουσα θωράκιση (π.χ. αν η μηχανή στραφεί προς άλλο τοίχο, οπότε ο αρχικός τοίχος εκτίθεται πλέον σε σκεδαζόμενη ή διαρρέουσα ακτινοβολία).

Για τον υπολογισμό της Έκθεσης που προκαλείται από τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία πίσω από τη θωράκιση (secondary barrier) χρησιμοποιείται η σχέση:

$$E_S = K_S * W * T * F * a * \frac{1}{400 d_{sca}^2 d_{sec}^2} \quad (2.7)$$

όπου:

- K_S** ο συντελεστής εξασθένισης της δέσμης εξαιτίας του barrier
- d_{sec}** απόσταση από την πηγή μέχρι το σημείο που εξετάζεται (m)
- d_{sca}** η απόσταση (m) από την πηγή ως το σκεδαστή της ακτινοβολίας (π.χ. τον ασθενή)
- F** η επιφάνεια του σκεδαστή (cm^2)
- a** συντελεστής που εκφράζει το ποσοστό της έκθεσης σε σκεδαζόμενη ακτινοβολία (R), ως προς την έκθεση σε πρωτογενή σε απόσταση 1m από το σημείο πρόσπτωσης, με το συντελεστή αυτό να εξαρτάται από τη γωνία της σκέδασης και από τις διαστάσεις του πεδίου της μηχανής.

Στη Εικόνα 2.3 διακρίνονται τα γεωμετρικά μεγέθη που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του secondary barrier από τη σχέση 2.7.

Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας ισχύει $U = 1$.

Παρόμοιος είναι και ο τύπος που αντιστοιχεί στην έκθεση από την ακτινοβολία διαρροής:

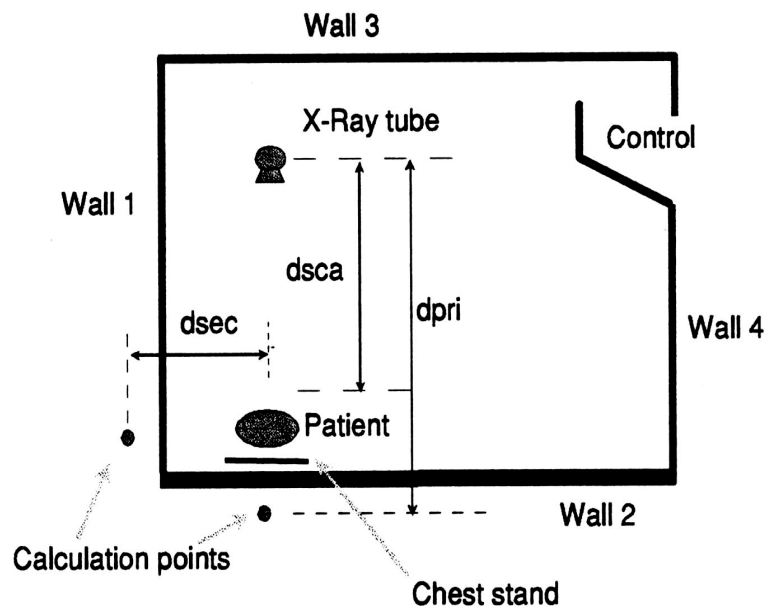
$$E_L = K_L * W * T * \frac{1}{x^2 * (600 * I)} \quad (2.8)$$

όπου:

K_L ο συντελεστής εξασθένησης της δέσμης,

I το μέγιστο συνεχές φορτίο της λυχνίας και

x η απόσταση της λυχνίας από το σημείο που εξετάζεται.



Εικ. 2.3 Γεωμετρικά μεγέθη απαραίτητα για τον υπολογισμό του secondary barrier

Στο Παράρτημα 1 παρατίθεται ένα παράδειγμα απλού υπολογισμού θωράκισης ενός ακτινογραφικού θαλάμου καρδιακού καθετηριασμού με την παραπάνω μέθοδο. Οι υπολογισμοί είναι βασισμένοι σε σχέσεις και δεδομένα από το NCRP Report No 49.

2.6 Βελτιώσεις της μεθόδου υπολογισμού θωρακίσεων

2.6.1 Γενικά

Η μέθοδος που παρουσιάστηκε παραπάνω για τον υπολογισμό των θωρακίσεων χώρων όπου λειτουργούν μηχανές ακτίνων-X είναι η απλούστερη που έχει χρησιμοποιηθεί και αποτελούσε

μέχρι πρόσφατα (2004) Κανονισμό, υποχρεωτικό για τη σχεδίαση ακτινοδιαγνωστικών εγκαταστάσεων στις Η.Π.Α.. Ο Κανονισμός αυτός περιεχόταν στο NCRP Report No 49 με τίτλο “*Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV.*” και ίσχυε στην Αμερική για πάνω από 25 χρόνια, κατά την διάρκεια των οποίων όλες οι θωρακίσεις ακτινοδιαγνωστικών εγκαταστάσεων υπολογίστηκαν βάσει αυτού. Ωστόσο, κάποια στιγμή δημιουργήθηκε η ανάγκη για αναθεώρηση του Κανονισμού εκείνου. Η κεντρική ιδέα των υπολογισμών παρέμεινε η ίδια, άλλαξαν ωστόσο τμήματα που αφορούσαν σε υπολογισμούς των συντελεστών που χρησιμοποιούνται, αναθεωρήθηκαν πίνακες και διαγράμματα και επανεξετάστηκαν παραδοχές που γίνονταν, με αποτέλεσμα πολλές από αυτές να αρθούν και τη θέση τους να πάρουν νέες, περισσότερο ρεαλιστικές. Αυτές οι αλλαγές και οι λόγοι οι οποίοι τις υπαγόρευαν, κατηγοριοποιούνται συνοπτικά στη συνέχεια:

- Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνταν στον παλαιότερο Κανονισμό αφορούσαν παλαιότερες μηχανές ακτίνες X και δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε τριφασικές ή σταθερού φορτίου μηχανές.
- Τα στοιχεία για θωράκιση από υλικά πέραν του μολύβδου και του σκυροδέματος ήταν από ελλιπή ως και ανύπαρκτα.
- Τα στοιχεία για τον τυπικό φόρτο εργασίας (workload) μίας μηχανής έχουν αλλάξει λόγω των εξελίξεων των ακτινογραφικών φιλμ και των ακτινοσκοπικών οθονών.
- Οι παράγοντες χρήσης του χώρου και της λυχνίας που χρησιμοποιούνταν δεν ανταποκρίνονται πλέον στο σημερινό τοπίο της ακτινοδιαγνωστικής.
- Δεν υπήρχε πρόνοια για θωράκιση από πολλαπλές πηγές ακτίνων X.
- Δεν γίνεται γινόταν αναφορά σε νέες τεχνικές απεικόνισης όπως η μαστογραφία, η υπολογιστική τομογραφία και η ψηφιακή απεικόνιση.

Το 1990 μια ομάδα επιστημόνων υπό την αιγίδα του *American Association of Physicists in Medicine (AAPM)*, άρχισε την αναδιαμόρφωση και επανέκδοση του Κανονισμού, προκειμένου αυτός να ανταποκρίνεται πια στα νέα δεδομένα. Μερικές από αυτές τις προτάσεις, οι σημαντικότερες ίσως, παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα. Πρόκειται για προτάσεις που αφορούν σε τροποποιήσεις στον υπολογισμό:

- του φόρτου εργασίας (workload),

- του φορτίου της μηχανής για μία συγκεκριμένη εξέταση (φορτίο, m·As),
- του παράγοντα χρήσης της μηχανής (use factor, U) και
- του παράγοντα χρήσης του χώρου (occupancy factor T).

2.6.2 Τροποποιήσεις στο φόρτο εργασίας (workload) και στο φορτίο της λυχνίας

Η πρώτη μελέτη με νέα δεδομένα για τον υπολογισμό του φόρτου εργασίας και του παράγοντα χρήσης των λυχνιών ακτίνων-X εκδόθηκε το 1996 από τον D.J. Simpkin [Simpkin, 1996]. Στοιχεία από αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν στην αναδιαμόρφωση του κανονισμού NCRP 49. Η μελέτη αυτή έγινε σε 14 ακτινοδιαγνωστικά κέντρα με 2500 ασθενείς και για επτά τύπους απεικονιστικών τεχνικών. Τα αποτελέσματα της υπόψη μελέτης για τον φόρτο εργασίας σε διάφορες ακτινοδιαγνωστικές εγκαταστάσεις, σε σύγκριση με τα δεδομένα από το NCRP Report No 49, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-8 που ακολουθεί.

Τύπος εγκατάστασης	Φόρτος εργασίας ανά ασθενή (mA min patient ⁻¹)		Αριθμός ασθενών την εβδομάδα		Ολικός φόρτος εργασίας (mA min week ⁻¹)	
	Simpkin	NCRP 49 100kVp	Simpkin	NCRP 49 100kVp	Simpkin	NCRP 49 100kVp
Δωμάτιο γενικής ακτινογραφίας	2.45	8.3	112	120	274	1000
Ακτινοσκόπηση	12.9	6.25	17.6	120	227	750
Ραδιογραφία	1.51	---	23.3	---	35	---
Ακτινογραφία θώρακα	0.216	0.5	206	300	44	150
Μαστογραφία	6.69	---	47.4	---	317	---
Καρδιακή Αγγειογραφία	160	---	19.1	---	3050	---
Περιφερειακή Αγγειογραφία	64.1	17.5	21	40	1350	700
Υπολογιστική τομογραφία	200	---	100	---	20000	---

Πίνακας 2-8 Συγκριτικές τιμές του φόρτου εργασίας της λυχνίας για διάφορες ακτινοδιαγνωστικές εγκαταστάσεις

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2-8, στο NCRP Report No 49 δεν υπάρχουν στοιχεία για εγκαταστάσεις ραδιογραφίας, μαστογραφίας και υπολογιστικής τομογραφίας. Οι εξετάσεις αυτές χρησιμοποιούνται κατά κόρον τα τελευταία χρόνια και αυτός ήταν και ένας από τους λόγους που

επέβαλαν την αναθεώρησης του κανονισμού NCRP Report 49, και την αντικατάστασή του από έναν νεότερο, ο οποίος, εκτός από τις ενημερώσεις στις ήδη υπάρχουσες τιμές θα δίνει και τιμές για εξετάσεις που δεν αναφέρονται στον παλαιότερο. Όσον αφορά τις τιμές που δίνονται στον Πίνακα 2-8, παρατηρείται μια αλλαγή στον αριθμό των ασθενών που εξυπηρετούνται την εβδομάδα. Επιπλέον, παρατηρούνται και αλλαγές στις τιμές του φόρτου εργασίας ανά ασθενή. Στον Πίνακα 2-8, οι τιμές της τρίτης στήλης (ολικός φόρτος εργασίας), προκύπτουν ως γινόμενο του φόρτου εργασίας ανά ασθενή και του αριθμού των ασθενών.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι, ο κανονισμός που βασίστηκε στο NCRP No 49, υπολογίζει το φόρτο εργασίας με την προϋπόθεση πως η εγκατάσταση λειτουργεί σε σταθερή τιμή kVp, π.χ. 1000mA·min/week στα 100 kVp. Στην πραγματικότητα όμως, ο φόρτος εργασίας αυτός, κατανέμεται σε ένα ευρύ φάσμα kVp της λυχνίας. Έτσι, για παράδειγμα, σε ένα γενικό ακτινολογικό δωμάτιο περίπου το 1/3 των εξετάσεων γίνεται στα 50 – 60 kVp, αρκετές εξετάσεις γίνονται στα 70 – 80 kVp, ενώ οι εξετάσεις θώρακα γίνονται σε περισσότερα από 100 kVp. Παρατηρούμε επομένως την ύπαρξη μίας φασματικής κατανομής των kVp στα οποία λειτουργεί η μηχανή. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με το ότι η δόση στον αέρα, αλλά και η εξασθένηση μέσα στη θωράκιση, παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από το φορτίο, εκφρασμένο σε kVp, οδηγεί στην ανάγκη για αναθεώρηση της παραδοχής περί υπολογισμού του φόρτου εργασίας υπό σταθερά kVp. Και η ανάγκη αυτή γίνεται ακόμα μεγαλύτερη αφού κατά τον υπολογισμό των θωρακίσεων, το πάχος του barrier δεν έχει απλά γραμμική εξάρτηση από τα kVp, όπως συμβαίνει με το φόρτο εργασίας, αλλά εκθετική, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται πολύ περισσότερο οι υπολογιζόμενες θωρακίσεις. Στον Πίνακα 2-9 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο φόρτος εργασίας σε μια εγκατάσταση, αλλά για δύο διαφορετικές μεθόδους απεικόνισης κάθε φορά και επομένως για δύο διαφορετικά kVp.

Εγκατάσταση	Φόρτος εργασίας ανά ασθενή (mA·min patient ⁻¹)	Αριθμός ασθενών την εβδομάδα Φορτίο εγκατάστασης		Ολικός φόρτος εργασίας (mA min week ⁻¹) Φορτίο εγκατάστασης	
		Μέσο	Μεγάλο	Μέσο	Μεγάλο
Δωμάτιο γενικής ακτινογραφίας (chest bucky)	0.6	120	160	75	100
Δωμάτιο γενικής ακτινογραφίας (floor barriers)	2.0	75	120	150	250
Ραδιογραφία – Ακτινοσκόπηση	13	20	30	250	400
Ραδιογραφία – Ακτινοσκόπηση (ραδιογραφία)	1.5	20	40	30	60
Αγγειογράφοι (καρδιακή αγγειογραφία)	160	20	30	3200	4800
Αγγειογράφοι (περιφερειακή αγγειογραφία)	65	20	30	1300	2000

Πίνακας 2-9 Φάσμα του φόρτου εργασίας της λυχνίας για διάφορες ακτινοδιαγνωστικές εγκαταστάσεις

Από τον Πίνακα 2-9 γίνεται εμφανές ότι σε μια εγκατάσταση, εφόσον δεν γίνονται συνεχώς οι ίδιες εξετάσεις, π.χ. σε έναν αγγειογράφο γίνονται καρδιακές αγγειογραφίες και περιφερειακές αγγειογραφίες, δεν είναι σωστό ο φόρτος εργασίας ανά ασθενή να θεωρείται σταθερός. Ανάλογα με το πόσες και ποιες εξετάσεις γίνονται ο φόρτος αυτός παρουσιάζει μια εντονότερη ή μη κατανομή η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Το μέγεθος που χρησιμοποιείται τελικά στους υπολογισμούς είναι η τελευταία στήλη του Πίνακα που προκύπτει και εδώ ως γινόμενο των δύο πρώτων στηλών.

2.6.3 Τροποποιήσεις στον παράγοντα χρήσης (use factor U)

Σύμφωνα με τον Κανονισμό του NCRP Νο 49, οι προτεινόμενοι παράγοντες χρήσης για το primary barrier είχαν τις τιμές:

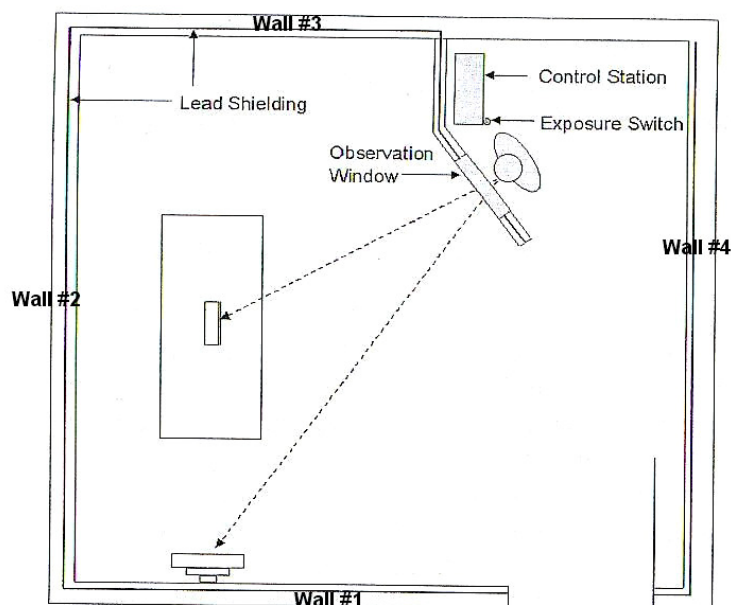
- U = 1 για δάπεδα και
- U = 0.25 για τους τοίχους.

Στον Πίνακα 2-10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας του Simpkin, σχετικά με τον παράγοντα χρήσης σε γενικό ακτινολογικό δωμάτιο για τα μοντέλα σταθερού φορτίου (single kVp) και φάσματος kVp (workload distribution).

Barrier	Use Factor U	
	Single kVp	Workload Distribution
Πάτωμα	0.7	1
Τοίχος #1 (chest image receptor)	0.25	1
Τοίχος #2 (cross table)	0.1	0.1
Τοίχος #3	0.05	0.05
Τοίχος #4 (control booth wall)	0	0

Πίνακας 2-10 Τιμές για τον Παράγοντα Χρήσης U σε γενικό ακτινολογικό δωμάτιο

Στον παραπάνω Πίνακα, ως Τοίχος #1 χαρακτηρίζεται ο τοίχος απέναντι από τη λυχνία κατά την ακτινογραφία θώρακα, ενώ ως Τοίχος #2 χαρακτηρίζεται ο τοίχος που είναι κάθετος στον Τοίχο #1. Τοίχος #4 είναι ο τοίχος προς την πλευρά του control room και Τοίχος #3 ο τελευταίος τοίχος του δωματίου όπως φαίνονται και στην εικόνα 2.4.



Εικ. 2.4 Χαρακτηριστική αρίθμηση τοίχων ακτινολογικού θαλάμου

Χαρακτηριστικό στη θεώρηση μοντέλων φάσματος kVp, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2-10 είναι η χρησιμοποίηση παράγοντα χρήσης $U = 1$ σε δύο περιπτώσεις μέσα στο δωμάτιο, σε αντίθεση με τη θεώρηση για τα μοντέλα σταθερού kVp. Ο φόρτος εργασίας για τον τοίχο #1 θεωρείται διαφορετικός από αυτόν των άλλων τοίχων, γιατί ο τοίχος #1 στον οποίο κατευθύνεται η δέσμη για τις ακτινογραφίες θώρακα, δέχεται ακτινοβολία μεγαλύτερης ενέργειας λόγω των περισσότερων kVp στις ακτινογραφίες αυτές. Λόγω λοιπόν των περισσότερων kVp που δέχεται ο τοίχος #1 θεωρείται πως έχει έναν παράγοντα χρήσης $U = 1$.

2.6.4 Τροποποιήσεις στον παράγοντα χρήσης του χώρου (occupancy factor T)

Στους υπολογισμούς των θωρακίσεων, το *shielding design goal* της λυχνίας σταθμίζεται με τη χρήση του παράγοντα χρήσης του χώρου που πρόκειται να προστατευθεί (π.χ. το γειτονικό γραφείο). Ο παράγοντας χρήσης ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο ένα άτομο βρίσκεται πίσω από τη θωράκιση, κατά τη διάρκεια που αυτή ακτινοβολείται εξαιτίας της λειτουργίας της μηχανής των ακτίνων-X. Υπενθυμίζεται ότι ως θωράκιση εννοείται αυτή που παρέχεται από τα δομικά στοιχεία, όπως οι τοίχοι του δωματίου και οποιαδήποτε επιπλέον θωράκιση.

Στο NCRP Report No 49, η τιμή του παράγοντα T λάμβανε τιμές από $T = 1/16$ έως $T = 1$ ανάλογα με το χώρο (Πίνακας 2-6). Σύμφωνα με τις τροποποιήσεις που προτείνονται:

- Ως ελάχιστη τιμή για τις μη ελεγχόμενες περιοχές (uncontrolled area) προτείνεται η τιμή $T = 1/40$.
- Για έναν διάδρομο έξω από ακτινολογικό εργαστήριο, προτείνεται η τιμή $T = 1/5$
- Για χώρους ακριβώς πίσω από πόρτα ακτινολογικού δωματίου προτείνεται η τιμή $T = 1/8$.

2.7 Άλλες μέθοδοι υπολογισμού θωρακίσεων

Ο σχεδιασμός των θωρακίσεων ακτινολογικών εργαστηρίων, τόσο στις ΗΠΑ, όσο και στις περισσότερες χώρες του κόσμου, γίνεται βάσει της μεθόδου που αναλύθηκε παραπάνω. Αποτελεί ίσως την πιο απλή μέθοδο. Με την πάροδο των ετών τα δεδομένα και οι απαιτήσεις για τις θωρακίσεις άλλαξαν και συνεχίζουν να αλλάζουν καθημερινά. Ως αποτέλεσμα, και η

μέθοδος άλλαξε αρκετά στις λεπτομέρειές της, χωρίς όμως να αλλάξει η βασική ιδέα του υπολογισμού.

Στην προσπάθεια για όσο το δυνατόν οικονομικότερες και ταυτόχρονα ασφαλέστερες θωρακίσεις ακτινοβολίας αναπτύχθηκαν και άλλες, διαφορετικής φιλοσοφίας, μέθοδοι υπολογισμού, με μερικές από αυτές να παραμένουν ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο, ενώ ορισμένες χρησιμοποιήθηκαν στις κατά καιρούς ανανεώσεις των εκάστοτε Κανονισμών. Στην εργασία αυτή, στη συνέχεια θα παρουσιαστούν δύο από αυτές τις μεθόδους που προσφέρουν τη δυνατότητα υπολογισμού επιπλέον θωράκισης σε ήδη προστατευόμενο δωμάτιο, καθώς και υπολογισμού θωράκισης για προστασία από περισσότερες της μίας μηχανές που λειτουργούν στον ίδιο χώρο. Η πρώτη από αυτές τις δυνατότητες προσφέρεται και στο NCRP Report N° 147, ενώ η δεύτερη δεν έχει ενσωματωθεί ακόμα σε κανένα Κανονισμό.

2.7.1 Υπολογισμός της επιπλέον απαιτούμενης θωράκισης εξαιτίας της λειτουργίας περισσότερων από μία πηγών με τη μέθοδο McGuire.

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τον McGuire [McGuire, 1983] και βασίζεται στον υπολογισμό της συνολικής εβδομαδιαίας δόσης $P(x)$, από n πηγές ακτίνων X που λειτουργούν μέσα στο ακτινολογικό δωμάτιο σε ένα σημείο πίσω από τη θωράκιση πάχους x του δωματίου, είτε πρόκειται για primary barrier είτε για secondary barrier, η οποία θα πρέπει να είναι ίση με το ανώτατο επιτρεπτό όριο. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με τη χρήση του παρακάτω της παρακάτω σχέσης:

$$P(x) = \sum_{i=1}^n P_{i,j} * T_{i,j}(x) \quad (2.9)$$

Στην σχέση (2.9) $P_{i,j}$ είναι η έκθεση εκφρασμένη σε mSv λόγω της ακτινοβολίας i , τύπου j . Με τον όρο ακτινοβολία i αναφερόμαστε στα τρία είδη ακτινοβολίας μέσα στον ακτινολογικό θάλαμο, την πρωτεύουσα ακτινοβολία, την σκεδαζόμενη και την ακτινοβολία διαρροής. Ο τύπος της ακτινοβολίας j αφορά το μέγιστο φορτίο της λυχνίας και θεωρείται σταθερός για όλες τις λυχνίες του δωματίου. Όλες οι λυχνίες δηλαδή λειτουργούν στο ίδιο μέγιστο φορτίο (kVp).

Με τον όρο $T_{i,j}$ εκφράζονται τα χαρακτηριστικά εξασθένησης, ο συντελεστής δηλαδή εξασθένησης, της ακτινοβολίας i μέσα από το barrier πάχους x . Για την πρωτεύουσα και την σκεδαζόμενη ακτινοβολία προσδιορίζονται μέσω του συντελεστή εξασθένησης K που έχει

εισαχθεί στην παράγραφο 2.5, ενώ για τη διαρρέουσα ακτινοβολία η εξασθένησή της εκφράζεται μέσω του HVL της υπάρχουσας θωράκισης και με μια πρώτη προσέγγιση να δίνεται από τον τύπο:

$$T_{L,j}(x) = \exp\left(-\frac{x \cdot \ln 2}{HVL_j}\right) \quad (2.10)$$

όπου $T_{L,j}$ η εξασθένηση της ακτινοβολίας διαρροής τύπου j .

Η παραπάνω μεθοδολογία προσφέρει το πλεονέκτημα του υπολογισμού θωράκισης σε χώρο ο οποίος ήδη είναι θωρακισμένος με άλλο υλικό, με την επιπλέον θωράκιση να έχει ως στόχο την επίτευξη των απαιτούμενων ορίων ακτινοπροστασίας.

Η υπάρχουσα θωράκιση αποτελείται από το υλικό #2, γνωστού πάχους x_2 και η νέα θωράκιση αποτελείται από υλικό #1, προσδιοριστέου πάχους x_1 . Η δέσμη της ακτινοβολίας περνά μέσα από το υλικό πάχους x_1 και θεωρείται ότι σκληραίνει² τόσο πολύ ώστε η δίοδος της μέσα από το δεύτερο υλικό να εκφράζεται με όρους HVL. Ξέροντας το x_2 , το άγνωστο πάχος x_1 μπορεί να προσδιοριστεί λύνοντας την εξίσωση:

$$P(x_1) = [P_{Pj} * T_{Pj}(x_1) + P_{Sj} * T_{Sj}(x_1) + P_{Lj} * T_{Lj}(x_1)] \exp(-x_2 * \ln 2 / HVL_{2j}) \quad (2.11)$$

Η εξίσωση (2.11) ισχύει για την περίπτωση μιας ή περισσότερων λυχνιών μέσα στο ακτινολογικό δωμάτιο, με την παραδοχή ότι αυτές λειτουργούν στο μέγιστο φορτίο τους και με τα ίδια kVp (δυσμενέστερη περίπτωση), οπότε ο τύπος της ακτινοβολίας j , όπως ορίζεται παραπάνω, είναι ο ίδιος για όλες. Όταν κάθε μια λυχνία λειτουργεί με διαφορετικό φορτίο, και επομένως διαφορετικά kVp, η εξίσωση (2.11) για τις M λυχνίες που εκπέμπουν M τύπους ακτινοβολιών γίνεται:

$$P(x) = \sum_{j=1}^M [P_{Pj} * T_{Pj}(x) + P_{Sj} * T_{Sj}(x) + P_{Lj} * T_{Lj}(x)] \quad (2.12)$$

ή, λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (2.10)

² Σκλήρυνση ακτινοβολίας (beam hardening) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, μία πολυενεργειακή ακτινοβολία, όπως αυτή που παράγεται σε μία μηχανή ακτίνων-X, εξαιτίας της διέλευσής της μέσα από έναν απορροφητή, αποκτά μέση ενέργεια φωτονίων υψηλότερη της αρχικής, και κατά συνέπεια αποκτά μεγαλύτερη διαπερατότητα.

$$P(x) = \sum_{j=1}^M [P_{Pj} * K_{Pj}(x) / K_o + P_{Sj} * K_{Sj}(x) / K_o + P_{Lj} * \exp(-x * \ln 2 / HVL_j)] \quad (2.13)$$

όπου:

P_{Pj} , P_{Sj} , P_{Lj} είναι η έκθεση λόγω της μη θωρακιζόμενης πρωτεύουσας, σκεδαζόμενης και διαφεύγουσας ακτινοβολίας αντίστοιχα,

K ο συντελεστές εξασθένησης και

K_o η έξοδος της λυχνίας εκφρασμένη σε (mSv.mA⁻¹min⁻¹ στο 1m).

Τέλος, για τον υπολογισμό θεωρείται πως το $P(x)$ είναι ίσο με το shielding design goal της θωράκισης σε mSv.

2.7.2 Αναλυτικός υπολογισμός επιπλέον θωράκισης

Η μέθοδος του McGuire στην περίπτωση επιπλέον θωράκισης δωματίου δέχεται πως η δέσμη της ακτινοβολίας φιλτράρεται σε πολύ μεγάλο βαθμό με το πέρασμά της μέσα από το πρώτο υλικό πάχους x_1 και σκληραίνει. Στη συνέχεια περνά μέσα από το υλικό πάχους x_2 και έτσι επιτυγχάνεται η τιμή της έκθεσης που αντιστοιχεί στα όρια ακτινοπροστασίας. Με τη μέθοδο αυτή, το πάχος του υλικού μέσα από το οποίο χρειάζεται να περάσει η δέσμη για να σκληρύνει δεν υπολογίζεται με μεγάλη ακρίβεια, με αποτέλεσμα η θωράκιση να υπερδιαστασιολογείται. Η μέθοδος που περιγράφεται στη συνέχεια δίνει λύση σε αυτό το πρόβλημα, αφού δεν στηρίζεται στην παραπάνω υπόθεση της σκλήρυνσης.

Υποτίθεται μια πηγή ακτινοβολίας που εκπέμπει πρωτεύουσα, σκεδαζόμενη και ακτινοβολία διαρροής. Εφόσον είναι γνωστή η Έκθεση στα τρία είδη ακτινοβολίας χωρίς θωράκιση P_P , P_S και P_L (mSv), είναι δυνατόν να υπολογισθεί η εξασθένηση της δέσμης των δύο πρώτων (πρωτογενής, σκεδαζόμενη) μέσα από το υλικό x_1 , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$P'_{P/S} = P_{P/S} * T_{P/S}(x_1) = [K(x_1) / K_o] * P_{P/S} \quad (2.14)$$

όπου $P'_{P/S}$ είναι η έκθεση πίσω από το υλικό x_1 με την ακτινοβολία να έχει εξασθενήσει από K_o σε $K(x_1)$ (mSv.mA⁻¹min⁻¹ στο 1m) και να συνεχίζει την εξασθένησή της με το πέρασμα μέσα από το υλικό x_2 . Για την ακτινοβολία διαρροής, η έκθεση πίσω από την πλάκα υλικού x_1 είναι:

$$P'_L = \exp(-x_1 * \ln 2 / HVL_1) * P_L \quad (2.15)$$

Μετά την έξοδο από το υλικό 1, η πρωτεύουσα και η σκεδαζόμενη ακτινοβολία έχουν μειωθεί από K_0 σε $K(x_1)$ και θα συνεχίσουν να μειώνονται μέχρι την τιμή $K(x_1+x_2)$ μετά την έξοδο και από το υλικό 2. Η έκθεση πίσω από όλη τη θωράκιση στην πρωτεύουσα και την σκεδαζόμενη ακτινοβολία θα είναι:

$$P''_{P/S} = P'_{P/S} * T_{P/S}(x_2) = [K(x_1 + x_2) / K(x_1)] * P'_{P/S} \quad (2.16)$$

ενώ από την ακτινοβολία διαρροής θα είναι:

$$P''_L = \exp(-x_2 * \ln 2 / HVL_2) * P'_L \quad (2.17)$$

Για τη συνολική έκθεση πίσω από τη θωράκιση ισχύει λοιπόν:

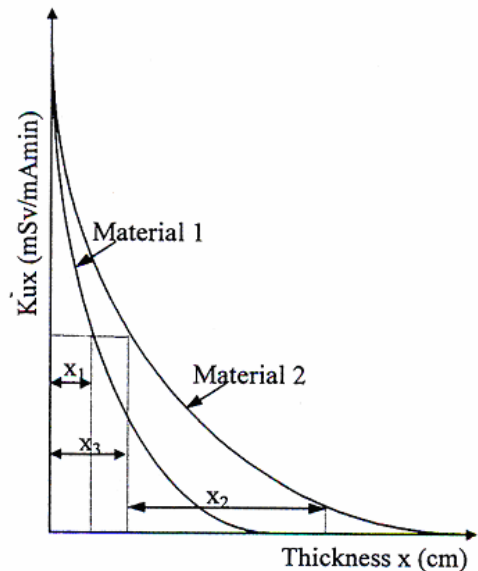
$$\begin{aligned} P_T &= P''_P + P''_T + P''_L \\ &= (K(x_1 + x_2) / K_0) * (P_P + P_S) + \\ &+ \exp[-(x_1 + x_2) * \ln 2 / HVL] * P_L \end{aligned} \quad (2.18)$$

όπου HVL είναι κοινό και για τις δυο πλάκες και εξαρτάται από το υλικό των πλακών και το φορτίο της λυχνίας. Ξέροντας το πάχος x_2 , το πάχος x_1 υπολογίζεται αν ως P_T θεωρηθεί το design shielding goal της θωράκισης.

Η παραπάνω τεχνική υπολογισμού επιπλέον θωράκισης, αφορά την περίπτωση που οι δύο πλάκες αποτελούνται από το ίδιο υλικό. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου όμως είναι το ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να υπολογιστεί επιπλέον θωράκιση από διαφορετικό υλικό.

Έστω ότι η υπάρχουσα πλάκα αποτελείται από υλικό 2 και πριν από αυτήν τοποθετηθεί η νέα υπολογιζόμενη πλάκα υλικού 1. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.5 που ακολουθεί, το πάχος x_1 της πλάκας 1 προκαλεί την ίδια εξασθένιση με το πάχος x_3 πλάκας από υλικό 2. Έτσι στους υπολογισμούς μπορούμε να θεωρήσουμε πως η ακτινοβολία δεν περνά μέσα από δυο πλάκες διαφορετικού υλικού και πάχους, αλλά από δυο πλάκες διαφορετικού μεν πάχους, x_1 και x_3 ,

αλλά αποτελούμενες από το ίδιο υλικό 2. Με την θεώρηση αυτή ο υπολογισμός ανάγεται στην απλούστερη περίπτωση υπολογισμού επιπλέον θωράκισης από το ίδιο υλικό.



Εικ. 2.5 Γραφικός υπολογισμός πάχους επιπλέον θωράκισης. Οι συντελεστές εξασθένησης της δέσμης δίνονται συναρτήσει του πάχους της θωράκισης και του υλικού της

Η δέσμη επομένως περνά από την πλάκα πάχους x_3 και στη συνέχεια από την πλάκα πάχους x_2 από το ίδιο υλικό 2. Η έκθεση πίσω από την πλάκα στην πρωτεύουσα, τη σκεδαζόμενη και την ακτινοβολία διαρροής είναι:

$$P''_{P/S} = [K(x_3 + x_2) / K(x_3)] \times [K(x_1) / K_O] P_{P/S} \quad (2.19)$$

και

$$P''_L = \exp(-x_2 * \ln 2 / HVL_2) \times \exp(x_1 * \ln 2 / HVL_1) * P_L \quad (2.20)$$

όπου τα $K(x_3)$ και $K(x_1)$ είναι ίσα και αναφέρονται στην εξασθένηση της πρωτεύουσας και της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στα υλικά 1 και 2.

Συμπερασματικά, όταν M λυχνίες λειτουργούν μέσα σε ένα χώρο και εκπέμπουν ακτινοβολία τύπου j η καθεμία, η έκθεση σε ένα σημείο πίσω από τη θωράκιση εκφράζεται ως:

$$P_T = \sum_{j=1}^M \{ [K(x_1) / K_{Oj}] T_{2j} (P_P + P_S) + [\exp(-x_1 \ln 2 / HVL_{1j}) \times \exp(-x_1 \ln 2 / HVL_{2j}) P_L] \} \quad (2.21)$$

όπου T_{2j} είναι η εξασθένηση της πρωτεύουσας ή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας τύπου j με το πέρασμά της από την δεύτερη πλάκα και έχει τιμή 1 όταν δεν υπάρχει ήδη υπάρχουσα θωράκιση. Στην περίπτωση πρόσθεσης πλάκας πάχους x_1 μπροστά από πλάκα x_2 του ίδιου υλικού, η εξασθένηση είναι $K(x_1 + x_2)/K(x_1)$ ενώ αν πρόκειται για άλλο υλικό η εξασθένηση γίνεται $K(x_3 + x_2)/K(x_3)$.

Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται πίνακες για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων, του McGuire και της αναλυτικής, για τον υπολογισμό τόσο της αρχικής (Πίνακας 2-11) όσο και της επιπλέον θωράκισης, από το ίδιο υλικό (Πίνακας 2-12) ή από διαφορετικό υλικό (Πίνακας 2-13).

Πίνακες Κεφαλαίου 2

Είδος ακτινοβολίας	w_R
Ακτίνες-X ή γ	1
Σωματίδια- β ,	1
Νετρόνια ($E < 10$ keV)	5
Νετρόνια ($E > 10$ keV)	10

Πίνακας 2.1 Τιμές του συντελεστή στάθμισης w_R

Ιστός, όργανο	w_T
Γεννητικοί αδένες	0.20
Μυελός των οστών	0.12
Πνεύμονας	0.12
Στομάχι	0.12
Κύστη	0.05
Μαστός	0.05
Ήπαρ	0.05
Οισοφάγος	0.05
Θυρεοειδής	0.05
Δέρμα	0.01
Επιφάνεια οστού	0.01
Λοιπά	0.05

Πίνακας 2-2 Τιμές του συντελεστή στάθμισης w_T

kVp	X (m)	ϵ
70	1	0.15
100	1	0.9
125	1	1.4

Πίνακας 2-3 Τιμές του συντελεστή μετατροπής ϵ

Αριθμός ασθενών ανά ημέρα	kVp	W για γενικές ακτινογραφίες	W για ακτινογραφίες θώρακα	W για ακτιν/πηση με ενισχυτή εικόνας	W για ακτιν/πηση με σειριογράφο
24	100	1000	150 (60)*	750	1500
24	125	400		300	600
24	150	200		150	300

* Στις ακτινογραφίες θώρακα ο αριθμός ασθενών ανά ημέρα είναι 60

Πίνακας 2-4 Τιμές του εβδομαδιαίου φόρτου της λυχνίας W

	U για primary barrier	U για secondary barrier
Δάπεδο	1 *	1
Τοίχοι	1/4	1
Οροφή	0	1

*Η λυχνία στρέφεται προς το δάπεδο

Πίνακας 2-5 Τιμές του παράγοντα χρήσης (use factor) U

Χώρος	T
Γραφεία, εργαστήρια, καταστήματα, σταθμοί νοσηλευτών, χώροι παιδιάς, καθιστικά κλπ.	1
Διάδρομοι, ανελκυστήρες με συνοδό κλπ.	1/4
Χώροι αναμονής, τουαλέτες, ανελκυστήρες χωρίς συνοδό, κλιμακοστάσια κλπ	1/16

Πίνακας 2-6 Τιμές του παράγοντα κατάληψης (occupancy factor) T

Υλικό	kVp	McGuire	Αναλυτική
Μόλυβδος	70	1.0	1.0
	100	2.5	2.5
	125	2.9	2.9
Σκυρόδεμα	70	90.0	90.0
	100	156.1	156.1
	125	215.1	215.1
Γυψοσανίδα	70	119.4	119.4
	100	219.3	219.3
	125	313.6	313.6
Ατσάλι	70	6.5	6.5
	100	17.5	17.5
	125	30.4	30.4
Πλεξιγκλάς	70	52.1	52.1
	100	86.9	86.9
	125	122.1	122.1

Πίνακας 2-11 Τιμές για την απαραίτητη θωράκιση (σε mm) από διάφορα υλικά όπως προκύπτουν από την αναλυτική και την μέθοδο του McGuire.

Υπάρχουσα θωράκιση (mm)	McGuire	Αναλυτική
Σκυρόδεμα		
0.0	156.1	156.1
78.1	85.5	78.1
156.1	29.1	0.0
212.1	0.0	0.0
Μόλυβδος		
0.0	2.5	2.5
1.2	1.2	1.2
2.5	0.3	0.0
3.4	0.0	0.0

Πίνακας 2-12 Πρόσθετη θωράκιση (σε mm) από το ίδιο υλικό με την υπάρχουσα όπως προκύπτει από την αναλυτική και την μέθοδο του McGuire.

Υπάρχουσα θωράκιση (mm)	McGuire	Αναλυτική
Επιπλέον μολυβδος (mm) σε σκυρόδεμα		
0.0	1.9	1.8
78.1	1.3	1.1
156.1	0.3	0.0
212.1	0.0	0.0
Επιπλέον σκυρόδεμα (mm) σε μολυβδο		
0.0	83.7	83.2
1.2	45.1	37.5
2.5	26.7	0.0
3.4	0.0	0.0

Πίνακας 2-13 Πρόσθετη θωράκιση (σε mm) από διαφορετικό υλικό από την υπάρχουσα όπως προκύπτει από την αναλυτική και την μέθοδο του McGuire.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΟΣΕΩΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ Monte-Carlo

3.1 Εισαγωγή στην τεχνική της προσομοίωσης με τη μέθοδο Monte Carlo

Η μελέτη της μετάδοσης της σωματιδιακής και της φωτονιακής ακτινοβολίας βασίστηκε αρχικά στη χρήση απλών αναλυτικών σχέσεων, όπως για παράδειγμα την απλή σχέση της εκθετικής εξασθένησης φωτονίων μέσα από την ύλη:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

Η χρήση απλών αναλυτικών σχέσεων έχει πεπερασμένες δυνατότητες και παρουσιάζει δυσκολίες για την επίλυση προβλημάτων με πεπερασμένες διαστάσεις και για προβλήματα που έχουν περίπλοκες γεωμετρίες. Στα τέλη της δεκαετίας του 1940, με την εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, άρχισε να αναπτύσσεται μια νέα μέθοδος υπολογισμού και επίλυσης προβλημάτων, η οποία βασίζεται στην προσομοίωση με τη μέθοδο **Monte Carlo**. Η ονομασία Monte Carlo δόθηκε από τους επιστήμονες που εργάζονταν στο πυρηνικό πρόγραμμα του Los Alamos, για να περιγράψει μια κατηγορία αριθμητικών μεθόδων βασισμένων στη χρήση των **τυχαίων αριθμών**. Το όνομα «Monte Carlo» προέκυψε από την πόλη του Μονακό και το γνωστό της καζίνο.

Η μέθοδος Monte-Carlo (M-C) βασίζεται στη δημιουργία και εξέλιξη μίας σειράς «**ιστοριών**» ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Για παράδειγμα, κατά την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων φωτονιακής ακτινοβολίας με την ύλη, μία «ιστορία» αντιστοιχεί στη δημιουργία και στην παρακολούθηση της «τύχης» ενός φωτονίου, από τη στιγμή της εκπομπής του από την πηγή, έως την οριστική εξαφάνισή του. Επειδή η δημιουργία και η εξέλιξη μιας ιστορίας ενός φωτονίου ή ενός σωματιδίου γενικότερα είναι τυχαίας φύσεως, η μέθοδος Monte Carlo είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη στη μελέτη τέτοιων φαινομένων. Στην προσομοίωση της μετάδοσης της ακτινοβολίας με τη μέθοδο Monte Carlo, η ιστορία ενός σωματιδίου αντιμετωπίζεται ως μια τυχαία ακολουθία από ελεύθερες διαδρομές του, με κάθε μία από αυτές να ολοκληρώνεται με μια αλληλεπίδραση του σωματιδίου αυτού. Κατά τη διάρκεια αυτής της αλληλεπίδρασης το σωματίδιο αλλάζει την κατεύθυνση μετακίνησής του, χάνει ένα μέρος της

ενέργειας του και σε ορισμένες περιπτώσεις διεγείρει την παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι το σωματίδιο να χάσει όλη του την ενέργεια και να απορροφηθεί, ή μέχρι αυτό να εξέλθει των ορίων του συστήματος που εξετάζεται χωρίς να υπάρχει δυνατότητα να επιστρέψει στο σύστημα (π.χ. λόγω οπισθοσκέδασης σε κάποιο υλικό).

Για τη δημιουργία μίας ιστορίας, σε κάθε φάση της, επιλέγεται με τυχαίο τρόπο, μέσω μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, μια τιμή για κάθε ένα μέγεθος-χαρακτηριστικό του φωτονίου (π.χ. αρχική διεύθυνση, θέση που θα πραγματοποιήσει την πρώτη αλληλεπίδραση, είδος της αλληλεπίδρασης κλπ). Στη συνέχεια, μετά από μια σειρά υπολογισμών, προκύπτει το τελικό ζητούμενο μέγεθος, το οποίο και καταγράφεται. Με το πέρας της ιστορίας καταγράφονται τα φυσικά μεγέθη που αφορούν τη διάδοσή του. Εννοείται, πως η διαδικασία της προσομοίωσης στηρίζεται πάνω σε διάφορα μοντέλα αλληλεπίδρασης του σωματιδίου με την ύλη, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους φυσικούς νόμους και μηχανισμούς που διέπουν το φαινόμενο. Αν η διαδικασία αυτή προσομοίωσης ενός φωτονίου επαναληφθεί πολλές φορές, αν δηλαδή δημιουργηθούν πολλές ιστορίες και κάθε φορά καταγράφονται τα αποτελέσματά τους, η μέση τιμή του αποτελέσματος που προκύπτει προσεγγίζει την πραγματική τιμή της ποσότητας που ενδιαφέρει. Υπό την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των ιστοριών είναι αρκετά μεγάλος, οι μέσες τιμές των φυσικών μεγεθών που καταγράφονται με την ολοκλήρωση μιας ιστορίας, προσεγγίζουν τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές με αποδεκτή ακρίβεια.

Τα προβλήματα τα οποία επιλύονται μέσω της προσομοίωσης (M-C) είναι πολλά και διαφορετικά, όπως προβλήματα υπολογισμού θωρακίσεων, υπολογισμού και βελτιστοποίησης της απόκρισης ανιχνευτικών συστημάτων ιοντιζουσών ακτινοβολιών, προβλήματα δοσιμετρίας (Computational Dosimetry), προβλήματα ακτινοθεραπείας με δέσμες, προβλήματα βραχυθεραπείας κλπ.

3.2 Ο κώδικας PENELOPE

Κατά καιρούς έχουν δημιουργηθεί μία σειρά από κώδικες Monte Carlo προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρονίων και φωτονίων με την ύλη. Οι πλέον γνωστοί από αυτούς είναι οι: ETRAN (Berger M.J., Seltzer S.M 1988,), ITS3 (Halbleid J.A. et al. 1992), EGS4 (Nelson W.R. et al. 1985). Οι παραπάνω κώδικες είναι διαθέσιμοι δωρεάν, μέσω της NEA-DB (Nuclear Energy Agency Data Base) του ΟΟΣΑ (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης) που εδρεύει στο Παρίσι. Ένας τέτοιος κώδικας είναι και ο κώδικας **PENELOPE**, ο οποίος

χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ. Ο κώδικας αναπτύχθηκε από τους F. Salvat, J.M. Fernandez-Varea και J. Sempau, του Πανεπιστημίου της Βαρκελώνης, και η πρώτη έκδοσή του κυκλοφόρησε 1996. Η έκδοση του κώδικα PENELOPE, η οποία και χρησιμοποιείται στην ΔΕ, κυκλοφόρησε το 2005 (PENELOPE 2005) και περιέχει αρκετές τροποποιήσεις και βελτιώσεις της αρχικής έκδοσης. Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της ΔΕ κυκλοφόρησε και νέα έκδοση (PENELOPE 2007).

Ο κώδικας PENELOPE πήρε το όνομά του από τα αρχικά των λέξεων **PE**Netration and **E**nergy **LO**ss of **P**ositrons and **E**lectrons. Στο όνομα δεν αναφέρεται η προσομοίωση των φωτονίων, καθώς αυτή δεν συμπεριλαμβανόταν στην αρχική έκδοση, αλλά προστέθηκε σαν δυνατότητα του κώδικα αργότερα. Ο κώδικας αυτός προσομοιώνει τη διάδοση των ηλεκτρονίων, των φωτονίων και των ποζιτρονίων μέσα στην ύλη, μέσα από σύνθετες κατασκευές αποτελούμενες από διάφορα υλικά. Ο αλγόριθμος βασίζεται στο μοντέλο του διασκορπισμού, το οποίο συνδυάζει αριθμητικές βάσεις δεδομένων, μαζί με αναλυτικά μοντέλα της ενεργού διατομής για διάφορους μηχανισμούς αλληλεπιδράσεων και μπορεί να εφαρμοστεί για μια ευρεία ενεργειακή περιοχή από 50 eV έως και 1GeV.

Ο κώδικας αποτελείται από ένα σύνολο υπορουτίνων οι οποίες αναλαμβάνουν να πραγματοποιήσουν την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας με την ύλη. Ο χρήστης καλείται να γράψει το δικό του κυρίως πρόγραμμα (**User Code**) με το οποίο περιγράφει τη γεωμετρία του προς εξέταση προβλήματος, ελέγχει την εξέλιξη της «ιστορίας» του κάθε σωματιδίου-φωτονίου κατά την προσομοίωση και καταχωρεί σε αρχεία τις ποσότητες που τον ενδιαφέρουν (π.χ. την ενέργεια καθενός φωτονίου που φτάνει σε μία περιοχή).

Για διευκόλυνση του χρήστη διατίθενται μαζί με τον κώδικα προσομοίωσης και ορισμένοι κώδικες χρήστη, κατάλληλοι για την επίλυση προβλημάτων για συγκεκριμένες γεωμετρίες. Πιο συγκεκριμένα στην έκδοση του κώδικα PENELOPE που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Δ.Ε. διατίθενται οι ακόλουθοι κώδικες:

- PENS LAB: για την προσομοίωση της διάδοσης ηλεκτρονίων/φωτονίων τα οποία διέρχονται από επίπεδη πλάκα συγκεκριμένου υλικού.
- PENCYL: για την προσομοίωση της διάδοσης ηλεκτρονίων/φωτονίων τα οποία διέρχονται από σύνθετες κυλινδρικές κατασκευές.

- **PENDOSSES:** για την προσομοίωση της διάδοσης ηλεκτρονίων/φωτονίων εκπεμπόμενων από σημειακή πηγή και διερχομένων από σύνθετες κατασκευές προκειμένου για τον υπολογισμό της αποτιθέμενης ενέργειας.
- **PENMAIN:** για την προσομοίωση της διάδοσης ηλεκτρονίων/φωτονίων διερχομένων από σύνθετες κατασκευές. Αποτελεί τη γενικότερη περίπτωση κώδικα χρήστη και χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές. Αυτός είναι και ο κώδικας χρήστη ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ και για το λόγο αυτό επιπλέον στοιχεία για αυτόν δίνονται ακολούθως.

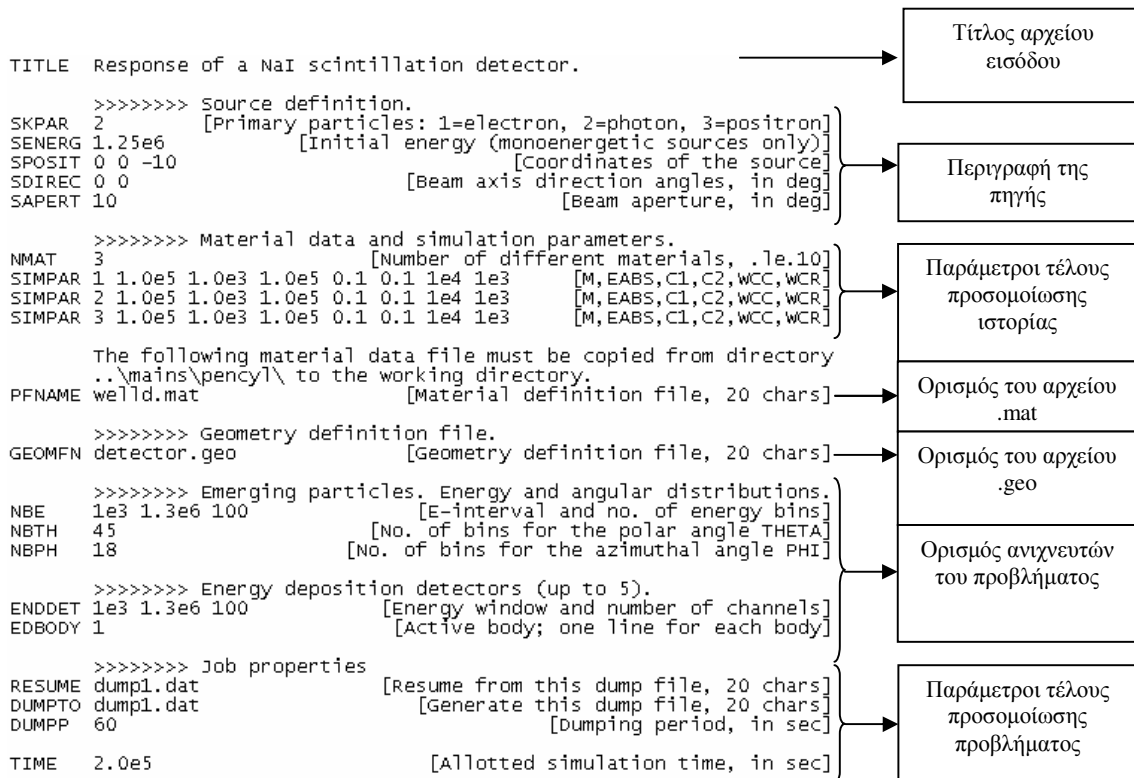
3.2.1 Ο κώδικας χρήστη **penmain**.

3.2.1.1 Τα αρχεία εισόδου του κώδικα **penmain**

Η πραγματοποίηση της προσομοίωσης συγκεκριμένης εφαρμογής μέσω του κώδικα χρήστη **penmain** απαιτεί αρχικά την περιγραφή του προς εξέταση προβλήματος. Η περιγραφή αυτή καθώς και όλα τα απαραίτητα στοιχεία προκειμένου για την υλοποίηση της προσομοίωσης παρέχονται από τον χρήστη μέσω κατάλληλα διαμορφωμένων αρχείων εισόδου. Χρησιμοποιούνται τρεις τύποι τέτοιων αρχείων

- **Το αρχείο τύπου .in:** πρόκειται για το αρχείο εισόδου των δεδομένων του προβλήματος. Μέσω αυτού περιγράφεται
 - *Η πηγή ακτινοβολίας* : είδος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, ενέργεια σωματιδίων/φωτονίων, γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πηγής
 - *Η γεωμετρία του προβλήματος* : ορίζεται το αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας του προβλήματος (.geo) το οποίο και περιγράφεται ακολούθως καθώς και το αρχείο υλικών του προβλήματος (.mat) το οποίο επίσης περιγράφεται ακολούθως.
 - *Οι παράμετροι της προσομοίωσης* : με τον όρο παράμετροι της προσομοίωσης γίνεται αναφορά τόσο στον ορισμό των ανιχνευτών (πλήθος/τύπος βλ. §3.2.1.2) που χρησιμοποιούνται όσο και σε σταθερές που ορίζουν είτε το τέλος της προσομοίωσης συγκεκριμένης ιστορίας είτε το τέλος της προσομοίωσης του προβλήματος.

Παράδειγμα τέτοιου αρχείου εμφανίζεται στο σχήμα (3.1) στο οποίο παρουσιάζονται επίσης τα διαφορετικά τμήματά του (π.χ. τμήμα περιγραφής της πηγής ακτινοβολίας, τμήμα περιγραφής της γεωμετρίας του προβλήματος, τμήματα περιγραφής των παραμέτρων της προσομοίωσης)



Σχήμα 3.1 Παρουσίαση της δομής τυπικού αρχείου εισόδου τύπου .in για τον κώδικα χρήση *penmain*

- **Το αρχείο .geo** : πρόκειται για το αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας του προβλήματος με το οποίο περιγράφονται με λεπτομέρειες όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος.
- **Το αρχείο .mat** : πρόκειται για το αρχείο ορισμού όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται στην περιγραφή του προβλήματος και περιέχει όλες τις απαραίτητες φυσικές σταθερές προκειμένου για την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας με αυτά. Το αρχείο .mat δημιουργείται με την εκτέλεση της εντολής:

> tables.exe

και την επιλογή κατάλληλου υλικού από διαθέσιμο πίνακα υλικών [Francesc Salvat et al., 2001].

3.2.1.2 Εικονικοί ανιχνευτές.

Παραπάνω στην §3.2.1 έγινε αναφορά στη χρήση κατάλληλων ανιχνευτών προκειμένου για την παρακολούθηση και καταγραφή της εξεταζόμενης ακτινοβολίας. Στην παράγραφο αυτή θα περιγραφούν οι δυνατότητες που παρέχει ο κώδικας PENELOPE ως προς την επιλογή και την χρήση των ανιχνευτών αυτών.

Ο κώδικας PENELOPE έχει από κατασκευής του ενσωματωμένους μία σειρά «εικονικούς ανιχνευτές». Στην πραγματικότητα, ένας εικονικός ανιχνευτής αντιστοιχεί σε ένα σώμα το οποίο ορίζεται, σε συγκεκριμένη θέση του χώρου, με συγκεκριμένες διαστάσεις και αποτελούμενος από συγκεκριμένο υλικό. Ανάλογα με το είδος του συγκεκριμένου ανιχνευτή, καταγράφονται από το πρόγραμμα σε ειδικούς καταχωρητές – αρχεία εξόδου (βλ. §3.2.1.3) , πληροφορίες όπως, η ενέργεια που αποτίθεται στον συγκεκριμένο ανιχνευτή λόγω μίας αλληλεπίδρασης, η ενέργεια που έχει ένα σωματίδιο που διέρχεται από τον ανιχνευτή χωρίς να αλληλεπιδράσει κλπ. Το πρόγραμμα PENELOPE έχει ενσωματωμένους τριών ειδών ανιχνευτές.

Πρόκειται για τους:

- Ανιχνευτές Αλληλεπίδρασης (Impact Detectors),
- Ανιχνευτές Αποτιθέμενης Ενέργειας (Energy Deposition Detectors)
- Ανιχνευτές Δόσης (Dose enclosure).

Η ενεργοποίηση ή όχι καθενός είδους ανιχνευτή γίνεται μέσα από το αρχείο δεδομένων του προγράμματος, κατά τη βούληση του χρήστη (βλ. σχήμα (3.1)). Οι ανιχνευτές αυτοί, ανάλογα με τον τύπο τους, μπορεί να αποτελούν μέρος ή όχι της κατασκευής μας. Στην παρούσα Δ.Ε. χρησιμοποιήθηκαν κατά περίπτωση και οι τρεις τύποι ανιχνευτών.

3.2.1.2.a Ανιχνευτής Αλληλεπίδρασης

Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης είναι ένας εικονικός ανιχνευτής που καταγράφει το ανά ενέργεια πλήθος σωματιδίων/φωτονίων που εισέρχονται σε αυτόν. Πρέπει να αποτελεί μέρος της εξεταζόμενης κατασκευής και άρα πρέπει να είναι ορισμένος μέσα στο αρχείο της γεωμετρίας (.geo).

Για να οριστεί πλήρως πρέπει να προστεθούν στο αρχείο εισόδου δεδομένων οι κατάλληλες γραμμές που θα αναφέρουν το ενεργειακό εύρος ανίχνευσης, το όνομα του αρχείου εξόδου στο οποίο θα αποθηκεύονται τα αποτελέσματα και το σώματος (body του αρχείου .geo) που

χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής αλληλεπίδρασης. Αυτό γίνεται με την προσθήκη των ακόλουθων γραμμών στην περιοχή του αρχείου εισόδου δεδομένων (αρχείο τύπου .in) η οποία στο σχήμα (3.1) χαρακτηρίζεται ως περιοχή ορισμού ανιχνευτών .

```
>>>>>> Impact detectors (up to 5 different detectors) .  
IMPDET 10e2 120e3 100 0 [En. window, no. of channels]  
IDSPC pm_spc_impdet_1.dat [Output spectrum file name]  
IDBODY 1 [Active body; one line for each active body]
```

Αρχικά γίνεται αντιληπτό ότι είναι δυνατός ο ορισμός μέχρι 5 ανιχνευτών αλληλεπίδρασης. Στην πρώτη γραμμή και μετά την εντολή IMPDET δίνεται το ενεργειακό φάσμα ανίχνευσης του ανιχνευτή και ο αριθμός των ενεργειακών καναλιών που αυτό θα χωριστεί. Στην δεύτερη γραμμή δίνεται το όνομα του αρχείου αποθήκευσης (αρχείο εξόδου) των αποτελεσμάτων. Το όνομα του αρχείου πρέπει να έχει τη μορφή **pm_spc_impdet_#.dat**, όπου # ο αριθμός του ανιχνευτή (1-5), για να είναι δυνατή η απεικόνιση του περιεχομένου του με το πρόγραμμα wgnuplot.

Τέλος, με την μεταβλητή IDBODY ορίζεται ο αριθμός του σώματος όπως αυτός ορίζεται στο αρχείο γεωμετρίας (αρχείο τύπου .geo) που θα αποτελέσει τον ανιχνευτή. Εξυπακούεται ότι το σώμα αυτό θα πρέπει να έχει προηγουμένως ορισθεί στο αρχείο τύπου .geo. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή καθώς ο αριθμός αυτός θα πρέπει να ταιριάζει με τον αντίστοιχο αριθμό του σώματος στο αρχείο γεωμετρίας .geo.

Με τον τρόπο αυτό προκύπτει το φάσμα της ενέργειας των σωματιδίων που εισήλθαν στον εξεταζόμενο ανιχνευτή. Στην περίπτωση του παραπάνω παραδείγματος η ενεργειακή περιοχή (100÷120000)eV έχει χωριστεί σε 100 ενεργειακά κανάλια (energy bins) ενώ ορίζεται και το αρχείο καταγραφής των αποτελεσμάτων να είναι το “pm_spc_impdet_1.dat”.

3.2.1.2.β Ανιχνευτής Αποτιθέμενης Ενέργειας

Ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας είναι ένας ανιχνευτής που καταγράφει την ενέργεια που αποθέτουν τα σωματίδια/φωτόνια που αλληλεπιδρούν με αυτόν, σε αυτόν. Για να οριστεί χρειάζεται να θεωρηθεί ως μέρος της κατασκευής και να περιγραφεί κατάλληλα στο αρχείο της γεωμετρίας (αρχείο τύπου .geo). Στην συνέχεια θα οριστεί από τον χρήστη το ή τα σώματα (bodies) της κατασκευής, που θεωρούνται ως ανιχνευτές μέσα στο αρχείο δεδομένων (αρχείο τύπου .in). Ο χρήστης ορίζει το όνομα του αρχείου που δημιουργεί το πρόγραμμα για την

αποθήκευση του φάσματος αποτιθέμενης ενέργειας, το ενεργειακό εύρος ανίχνευσης του ανιχνευτή καθώς και τα ενεργειακά κανάλια (energy bins) που θα χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί αυτό το φάσμα. Όταν ένα σωματίδιο εισέλθει μέσα στον ανιχνευτή τότε καταγράφεται η ενέργεια η οποία αποτίθεται μέσα σε αυτόν, ενώ σε περίπτωση απλής διέλευσης από τον ανιχνευτή χωρίς απόθεση ενέργειας το σωματίδιο/φωτόνιο δεν καταγράφεται.

Παρακάτω παρουσιάζεται το κομμάτι του αρχείου .in στο οποίο γίνεται ο ορισμός του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας.

```
>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5) .  
ENDDET 1.5e2 200e3 500 [E-window and num of channels]  
EDSPC pm_spc_enddet_1.dat  
EDBODY 2 [Active body; one line for each body]
```

Όπως και με την περίπτωση των ανιχνευτών αλληλεπίδρασης και για τους ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας δίδεται η δυνατότητα ορισμού έως πέντε ανιχνευτών. Στην πρώτη γραμμή και μετά την μεταβλητή ENDDET ορίζεται η ενεργειακή περιοχή (κάτω και άνω όριο) που θα ανιχνεύει ο ανιχνευτής και τα ενεργειακά κανάλια στα οποία αυτή θα χωριστεί. Έτσι, στη συγκεκριμένη περίπτωση ο ανιχνευτής θα ανιχνεύει φωτόνια ενέργειας 150 eV έως και 200 keV και το προκύπτον φάσμα θα χωριστεί σε 500 ενεργειακά διαστήματα.

Στην επόμενη γραμμή ορίζεται το όνομα του αρχείου στο οποίο θα αποθηκευτεί το φάσμα του ανιχνευτή. Το όνομα του αρχείου πρέπει να έχει τη μορφή **pm_spc_enddet_#.dat**, όπου # ο αριθμός του ανιχνευτή (1-5), για να είναι δυνατή η απεικόνιση του περιεχομένου του με το πρόγραμμα **wgnuplot**.

Τέλος, με την μεταβλητή EDBODY ορίζεται ο αριθμός του σώματος της κατασκευής που θα αποτελέσει τον ανιχνευτή. Το σώμα αυτό θα πρέπει να έχει προηγουμένως ορισθεί στο αρχείο γεωμετρίας τύπου .geo ενώ ο αριθμός αυτός θα πρέπει να ταιριάζει με τον αντίστοιχο αριθμό του σώματος στο αρχείο γεωμετρίας .geo.

Ο ανιχνευτής αυτός είναι πολύ χρήσιμος για την καταγραφή του ενεργειακού φάσματος των σωματιδίων (ή φωτονίων) που αποτίθεται σε ένα σώμα (τον ανιχνευτή). Χρησιμοποιείται πολύ συχνά, όταν π.χ. το σώμα αυτό είναι ένας πραγματικός ανιχνευτής ακτινοβολίας.

3.2.1.2.γ Ανιχνευτής Δόσης

Ο ανιχνευτής δόσης (dose enclosure DE) είναι ένας ανιχνευτής ο οποίος καταγράφει την κατανομή της δόσης σε ένα τμήμα της κατασκευής μας. Ως ανιχνευτής θεωρείται ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο πλέγμα που καθορίζεται από το χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου τύπου .in. Σε αντίθεση με τους ανιχνευτές αλληλεπίδρασης και αποτιθέμενης ενέργειας, δεν αποτελεί ξεχωριστό τμήμα της κατασκευής και άρα δεν χρειάζεται να περιγράφεται ξεχωριστά στο αρχείο γεωμετρίας. Με βάση τον ορισμό του γίνεται αντιληπτό ότι βρίσκει εφαρμογές σε προβλήματα δοσιμετρικών υπολογισμών ανάλογα με αυτά που χειρίζεται η παρούσα Δ.Ε.

Στο τμήμα του αρχείου εισόδου τύπου .in το οποίο στο σχήμα (3.1) χαρακτηρίζεται ως τμήμα ορισμού ανιχνευτών, ο χρήστης θα χρειαστεί να ορίσει τις επιφάνειες του ορθογωνίου που θα θεωρηθεί ως ανιχνευτής δόσης, καθώς και τις διαστάσεις του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί. Παρακάτω φαίνεται το τμήμα του αρχείου .in στο οποίο γίνεται ο ορισμός του ανιχνευτή δόσης.

```
>>>>>>> Dose distribution.  
GRIDX  -0.005 0.005  
GRIDY  -0.005 0.005  
GRIDZ   200 200.001  
GRIDBN 10 10 10
```

Στις 3 πρώτες γραμμές ορίζεται ο ανιχνευτής μεταξύ των επιφανειών $X=-0.005$, $X=0.005$, $Y=-0.005$, $Y=0.005$, $Z=200$ και $Z=200.001$ σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων XYZ. Οι διαστάσεις δίνονται σε cm. Τέλος, στην τελευταία γραμμή ορίζεται η πυκνότητα του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί με άλλα λόγια σε πόσα επίπεδα κατά X,Y και Z θα τεμαχισθεί ο ανιχνευτής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ορίζεται ανιχνευτής με πλέγμα 10x10x10, δηλαδή ο συνολικός όγκος του ανιχνευτή θα χωριστεί σε 1000 όγκους μικρότερης διάστασης.

3.2.1.3 Τα αρχεία εξόδου του κώδικα penmain

Όπως έχει ήδη φανεί από όσα παραπάνω έχουν γραφεί, σημαντικός είναι ο ρόλος των αρχείων εξόδου τα οποία λαμβάνονται κατά την προσομοίωση των εξεταζόμενων προβλημάτων. Στα αρχεία εξόδου αποθηκεύονται πληροφορίες που αφορούν τόσο στα στατιστικά στοιχεία της προσομοίωσης (π.χ. χρόνος προσομοίωσης, ιστορίες που προσομοιώθηκαν, πλήθος σωματιδίων/φωτονίων τα οποία πραγματοποίησαν συγκεκριμένο είδος αλληλεπίδρασης) καθώς και στα διάφορα ενεργειακά φάσματα που λαμβάνονται (π.χ. φάσμα αποτιθέμενης ενέργειας σε

συγκεκριμένο σώμα-υλικό, φάσμα ενέργειας σωματιδίων/φωτονίων τα οποία αλληλεπίδρασαν με συγκεκριμένο σώμα-υλικό, φάσμα εκπομπής πηγής κ.λ.π.).

Το είδος και η δομή των αρχείων τα οποία κάθε φορά λαμβάνονται ορίζονται από τον χρήστη στον κώδικα χρήστη (τον κώδικα penmain στην περίπτωση μας) και εξαρτώνται από το είδος των ανιχνευτών που κάθε φορά χρησιμοποιούνται. Αναλυτική περιγραφή όλων των δυνατοτήτων, ως προς τα αρχεία εξόδου, τις οποίες παρέχει ο κώδικας έχει πραγματοποιηθεί σε προηγούμενη Δ.Ε. [N. Αθανασίου, 2006].

Στην παρούσα Δ.Ε. περιγράφονται τα ανά ανιχνευτή αρχεία εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου για τη λήψη ενεργειακών φασμάτων και την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών.

3.2.1.3.α Το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή αλληλεπίδρασης

Ήδη από την §3.2.1.2.α έχει γίνει αναφορά στον τρόπο με τον οποίο ορίζεται ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης, στο αρχείο εισόδου τύπου .in, και το αρχείο εξόδου το οποίο τον συνοδεύει. Η δομή του αρχείου αυτού παρουσιάζεται στην παράγραφο αυτή.

Ακολούθως επισυνάπτεται τμήμα του αρχείου εξόδου **pm_spc_impdet_#.dat** αρχείο στο οποίο αποθηκεύεται το ενεργειακό φάσμα σωματιδίων/φωτονίων που αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή αλληλεπίδρασης #.

```
# Results from PENMAIN. Output from impact detector # 1
# 1st column: particle energy (eV).
# 2nd column: probability density (1/(eV*particle)).
# 3rd column: statistical uncertainty (3 sigma).

1.595000E+03 6.052276E-10 2.674752E-10
2.785000E+03 1.223064E-09 3.801536E-10
3.975000E+03 8.826236E-10 3.209702E-10
5.165000E+03 8.447969E-10 3.096249E-10
```

Σχήμα 3.2 Παρουσίαση της δομής τυπικού αρχείου εξόδου ανιχνευτή αλληλεπίδρασης

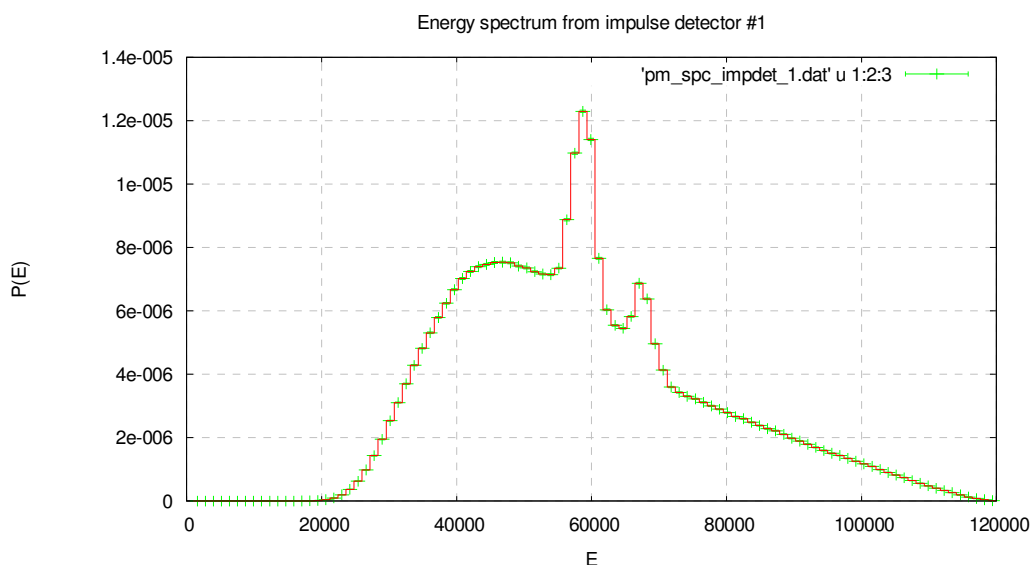
Στο παραπάνω τμήμα του αρχείου εξόδου εμφανίζονται 3 στήλες. Η πρώτη στήλη περιέχει την ενέργεια των σωματιδίων/φωτονίων που αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή, η δεύτερη την

πυκνότητα πιθανότητας αλληλεπίδρασης σωματιδίου/φωτονίου συγκεκριμένης ενέργειας με τον ανιχνευτή και τέλος η τρίτη στήλη την αβεβαιότητά της σε επίπεδο 3σ.

Η διαφορά των τιμών δύο διαδοχικών γραμμών της πρώτης στήλης παρέχει το εύρος του ενεργειακού καναλιού (energy bin). Το γινόμενο του εύρους αυτού (dE) με το πλήθος των συνολικών ιστοριών που προσομοιώθηκαν και τις τιμές της δεύτερης στήλης παρέχει το συνολικό αριθμό φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας τα οποία εισήλθαν στον ανιχνευτή.

Η γραφική απεικόνιση του παραπάνω αρχείου μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του προγράμματος wgnuplot (σχήμα 3.3). Λεπτομέρειες για τη χρήση του προγράμματος wgnuplot μπορούν να ανεβρεθούν στην ΔΕ [Αθανασίου 2006].

Πρόκειται για το ενεργειακό φάσμα ακτίνων – X οι οποίες προέρχονται από μηχανή ακτίνων – X και εισέρχονται στον ανιχνευτή.



Σχήμα 3.3 Γραφική απεικόνιση του αρχείου εξόδου του ανιχνευτή αλληλεπίδρασης. Στον άξονα X δίνεται η ενέργεια (eV) φωτονίων τα οποία αλληλεπίδρασαν με τον προς εξέταση ανιχνευτή και στον άξονα Y η πυκνότητα πιθανότητας ($1/eV \cdot \text{photon}$)

Σημείωση: Η εκτέλεση του προγράμματος απεικόνισης αποτελεσμάτων wgnuplot γίνεται με την εντολή :

`>wgnuplot file_name.gnu`

Με τον όρο file_name.gnu αναφερόμαστε στο αρχείο τύπου .gnu το οποίο περιέχει στοιχεία για την απεικόνιση όπως το εύρος τιμών και ο τύπος των αξόνων, το όνομα του αρχείου των

αποτελεσμάτων που θα απεικονιστεί, η ονομασία των αξόνων κ.α, και υπόδειγμα του οποίου παρέχεται μαζί με τον κώδικα PENELOPE.

3.2.1.3.β Το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας.

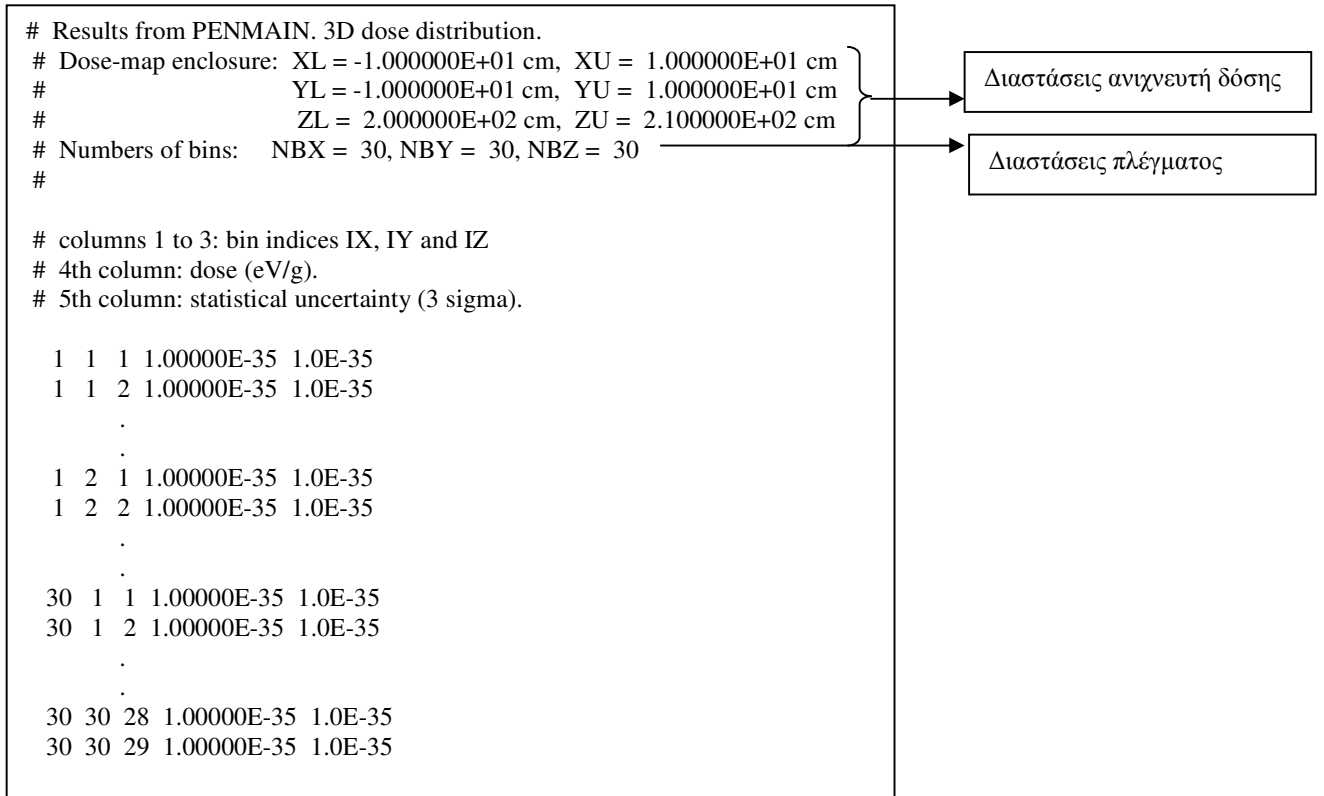
Στην §3.2.1.2.β έχει γίνει αναφορά στον τρόπο με τον οποίο ορίζεται ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας, στο αρχείο εισόδου τύπου .in, και το αρχείο εξόδου το οποίο τον συνοδεύει. Η δομή του αρχείου αυτού είναι ίδια με τη δομή του αρχείου εξόδου ανιχνευτή αλληλεπίδρασης στην πρώτη στήλη του όμως δίνεται η αποτιθέμενη από τα σωματίδια/φωτόνια στον ανιχνευτή ενέργεια.

3.2.1.3.γ Τα αρχεία εξόδου του ανιχνευτή δόσης (dose enclosure).

Στην §3.2.1.2.γ έχει γίνει αναφορά στον τρόπο με τον οποίο ορίζεται ο ανιχνευτής δόσης, στο αρχείο εισόδου τύπου .in. Ορισμός των αρχείων εξόδου που σχετίζονται με τον ανιχνευτή δόσης γίνεται από το πρόγραμμα χρήστη (το penmain για τα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε.).

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τα οποία λαμβάνονται με τον ανιχνευτή αυτό αποθηκεύονται σε δύο τύπους αρχείων. Ο πρώτος εξ' αυτών αποθηκεύει τρισδιάστατη κατανομή της δόσης, παρέχοντας την αποτιθέμενη δόση σε κάθε στοιχειώδη όγκο του ανιχνευτή, ενώ τα αρχεία εξόδου του δεύτερου τύπου παρέχουν τη δόση που αποτίθεται στους στοιχειώδεις όγκους ανά επίπεδο Z. Για το λόγο αυτό από κάθε προσομοίωση λαμβάνεται ένα αρχείο εξόδου του πρώτου τύπου, ενώ το πλήθος των αρχείων εξόδου του δεύτερου τύπου είναι ίσο με το πλήθος των Z επιπέδων στον οποίο έχει χωρισθεί ο ανιχνευτής. Για την περίπτωση του παραδείγματος της §3.2.1.2.γ αναμένεται η λήψη 10 αρχείων δεύτερου τύπου.

Η δομή του αρχείου πρώτου τύπου δίδεται με το παρακάτω τμήμα αρχείου εξόδου αυτού του τύπου.



Σχήμα 3.4 Παρουσίαση της δομής τυπικού αρχείου εξόδου πρώτου τύπου ανιχνευτή δόσης

Στο παραπάνω τμήμα του αρχείου εξόδου πρώτου τύπου, εκτός από τις διαστάσεις του ανιχνευτή και του πλέγματος με το οποίο διαιρείται σε μικρότερους όγκους δίνονται και οι τιμές της δόσης σε κάθε έναν από αυτούς. Πιο συγκεκριμένα, στις τρεις πρώτες στήλες του αρχείου ορίζεται ο στοιχειώδης όγκος από το συνδυασμό των επιπέδων X,Y και Z που τον δημιουργούν. Ακολούθως, στην τέταρτη στήλη δίδεται η αποτιθέμενη δόση σε κάθε στοιχειώδη όγκο συνοδευόμενη από την αβεβαιότητά της σε επίπεδο 3σ. Το όνομα του αρχείου αυτού, όπως ορίζεται στο penmain, είναι pm_3d_dose.dat.

Η δομή των αρχείων του δεύτερου τύπου είναι όμοια με αυτή του αρχείου πρώτου τύπου και ουσιαστικά αποτελούν τμήματα αυτού. Το όνομα τους, όπως και πάλι ορίζεται από τον κώδικα penmain, είναι pm_2d_dose_##.dat όπου ## ο αύξων αριθμός του Z επιπέδου το οποίο εξετάζεται κάθε φορά.

3.3 Έλεγχος της ακρίβειας των αποτελεσμάτων του Ανιχνευτή Δόσης.

Προκειμένου να είναι δυνατοί υπολογισμοί θωρακίσεων με τη μέθοδο προσομοίωσης M-C, είναι απαραίτητο να γίνονται δοσιμετρικοί υπολογισμοί σε διάφορες θέσεις συστημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας, όπως π.χ. υπολογισμοί θωρακίσεων από την ακτινοβολία που παράγουν απεικονιστικές μηχανές ακτίνων-X για ιατρική χρήση. Για το σκοπό αυτό, στα πλαίσια της ΔΕ αποφασίστηκε να γίνει διερεύνηση των δυνατοτήτων που παρέχονται από τον κώδικα PENELOPE. Ο κώδικας PENELOPE μας παρέχει δύο δυνατότητες για τέτοιου είδους δοσιμετρικούς υπολογισμούς:

- Έμμεσα, με χρήση του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας και εν συνεχεία υπολογισμό
- Άμεσα με χρήση του ανιχνευτή δόσης.

Προφανώς, για ορισμένες περιπτώσεις που η γεωμετρία είναι σχετικά εύκολη υπάρχει και η δυνατότητα υπολογισμών μέσω αναλυτικών σχέσεων, με χρήση μόνο των δεδομένων του προβλήματος [Δ. Λεωνίδου, 1984].

Καθώς η χρησιμοποίηση του ανιχνευτή δόσης παρέχει μεγάλη ευκολία για δοσιμετρικούς υπολογισμούς, στα πλαίσια της ΔΕ το αποφασίστηκε να ελεγχθεί με ενδελέχεια η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που δίνει σε πραγματικά προβλήματα, και να αποκωδικοποιηθεί πλήρως η λειτουργία του, ώστε να μπορεί να γίνει η βέλτιστη δυνατή χρήση του για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, αποφασίστηκε να ελεγχθεί η λειτουργία και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του ανιχνευτή δόσης, σε απλές περιπτώσεις υπολογισμού δόσης, όπου είναι εύκολο να γίνει και ο έμμεσος υπολογισμός με χρήση του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, αλλά και ο ακριβής υπολογισμός με χρήση αναλυτικών σχέσεων.

Οι έλεγχοι υπολογισμού της δόσης αποφασίστηκε να γίνουν για τις παρακάτω δύο περιπτώσεις:

- Παράλληλη δέσμη φωτονίων που προσπίπτει απευθείας σε ανθρώπινο ιστό.
- Δόση σε ανθρώπινο ιστό εξαιτίας σημειακής πηγής φωτονίων που βρίσκεται πίσω από θωράκιση

3.3.1 Υπολογισμός της δόσης εξαιτίας παράλληλης δέσμης φωτονίων

Το πρόβλημα που μελετάται στην παράγραφο αυτή είναι ο υπολογισμός της δόσης εξαιτίας παράλληλης δέσμης φωτονίων (pencil beam) ενέργειας 200 keV, η οποία προσπίπτει σε

ανθρώπινο ιστό σχήματος κυλίνδρου και διαστάσεων $R = 0.005\text{cm}$ και $h = 0.001\text{cm}$. Η απόσταση μεταξύ της πηγής και του ιστού είναι 200cm . Ο χώρος μεταξύ πηγής και ιστού είναι γεμάτος με αέρα σε ΚΣ. Η πηγή είναι τοποθετημένη στην αρχή του συστήματος των αξόνων στο σημείο $(0,0,0)$. Στην εικόνα 3.1 φαίνεται η γεωμετρία του προβλήματος, με μωβ χρώμα παρουσιάζεται ο αέρας που υπάρχει μεταξύ της πηγής και του ιστού. Το πορτοκαλί χρώμα αντιστοιχεί στον ανθρώπινο ιστό ενώ το μαύρο χρώμα αντιστοιχεί στο κενό. Η πηγή της ακτινοβολίας εκπέμπει τα φωτόνια με διεύθυνση κατακόρυφη και φορά προς τα άνω. Στον Πίνακα 3-1, στο τέλος του Κεφαλαίου, παρουσιάζεται το αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας `enddetector.geo`. Η απεικόνιση γίνεται με χρήση του προγράμματος απεικόνισης `gview2d` που προσφέρεται μαζί με τον κώδικα `PENELOPE`. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να ανεβρεθούν στη ΔΕ [Αθανασίου 2006].

Η δόση στον ιστό υπολογίστηκε:

- Με χρήση των αποτελεσμάτων των ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας και συνακόλουθους υπολογισμούς
- Απευθείας, μέσω των ανιχνευτών δόσης

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας χρήστη `penmain` και σύμφωνα με τα όσα έχουν ήδη αναφερθεί χρησιμοποιήθηκαν 2 ανιχνευτές. Ένας ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας και ένας ανιχνευτής δόσης. Ως ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας ορίστηκε ο ίδιος ο ανθρώπινος ιστός ($R = 0.005\text{cm}$ και $h = 0.001\text{cm}$). Για τον ανιχνευτή δόσης, καθώς ενδιαφερόμαστε για την αποτιθέμενη δόση σε συγκεκριμένο σημείο της γεωμετρίας μας, χρησιμοποιήθηκαν διαστάσεις πολύ μικρές έτσι ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς, χρησιμοποιώντας το μικρότερο δυνατό πλέγμα. Επισημαίνεται ότι ο ανιχνευτής δόσης, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου με αποτέλεσμα να μπαίνει στον υπολογισμό της δόσης ένα πρόσθετο σφάλμα αφού η γεωμετρία του σώματος που ακτινοβολείται δεν είναι ακριβώς η ίδια με την γεωμετρία του σώματος μέσα στο οποίο υπολογίζεται η δόση.

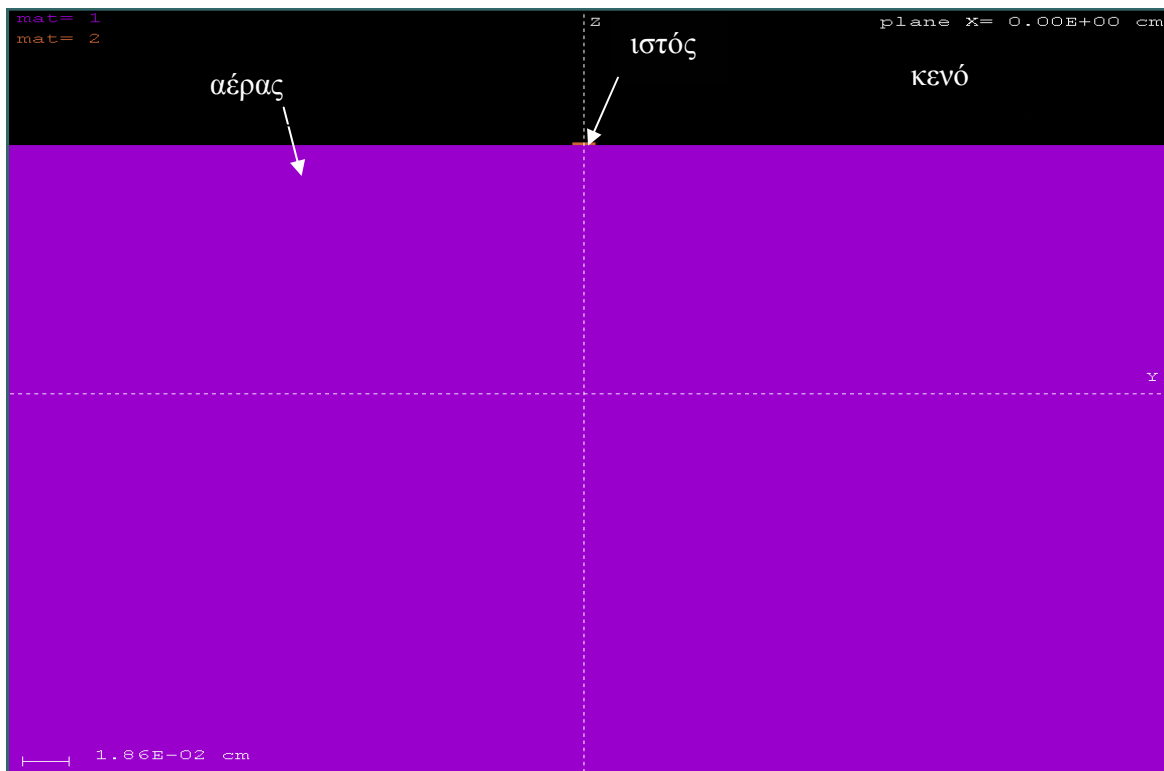
Για την περιγραφή του προβλήματος έχουν χρησιμοποιηθεί δύο υλικά, ο αέρας που αναφέρεται ως `material 1` και ο ανθρώπινος ιστός που αναφέρεται ως `material 2`. Τα αρχεία δεδομένων των υλικών, στα οποία υπάρχουν τα στοιχεία των υλικών είναι το `air.mat` και το `tissue.mat` και έχουν προκύψει σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην §3.2.1.1.

Το αρχείο υλικών που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα για την προσομοίωση είναι το `airtissue.mat` το οποίο περιέχει τα στοιχεία και των δύο υλικών. Το αρχείο αυτό προέκυψε από ενοποίηση των παραπάνω δύο αρχείων με χρήση της εντολής:

```
>copy air.mat+tissue.mat airtissue.mat
```

Το αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης με όνομα `depen.in` παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-2 στο τέλος του κεφαλαίου.

Επισημαίνεται ότι ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας και ο ανιχνευτής δόσης, όπως ορίστηκαν στο αρχείο δεδομένων και γεωμετρίας βρίσκονται στην ίδια θέση, αλλά δεν ταυτίζονται πλήρως ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους.



Εικ. 3.1 Γεωμετρία προβλήματος προσδιορισμού της δόσης σε ανθρώπινο ιστό κυλινδρικού σχήματος από ακτινοβολία μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων ενέργειας $E = 200\text{keV}$

Η προσομοίωση έγινε με εκτέλεση της εντολής:

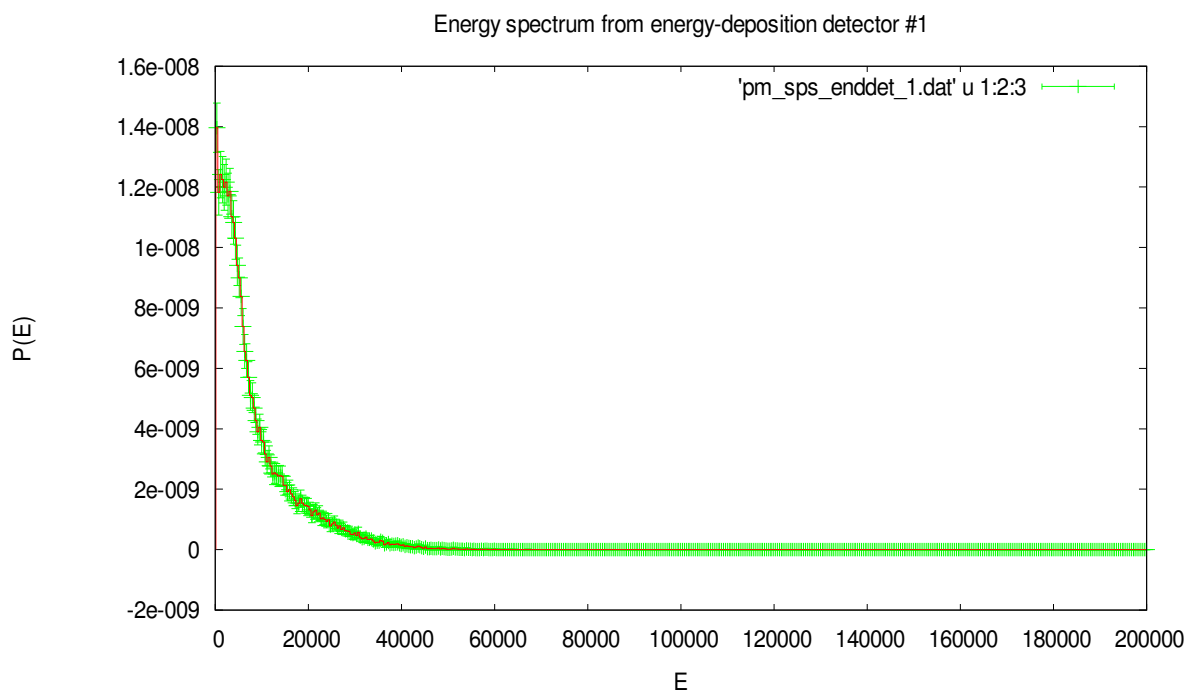
```
>penmainn.exe<depen.in
```

Η διάρκεια προσομοίωσης ήταν $2.287270\text{E}+04$ sec και προσομοιώθηκαν συνολικά $4.701964\text{E}+08$ ιστορίες (φωτόνια). Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παρήχθησαν μία

σειρά από αρχεία αποτελεσμάτων. Τα αρχεία τα οποία παρέχουν πληροφορίες για τον υπολογισμό της δόσης σύμφωνα, με όσα έχουν γραφεί στην §3.2.1.3 είναι τα:

- pm_sps_enddet_1.dat
- pm_2d_dose.dat

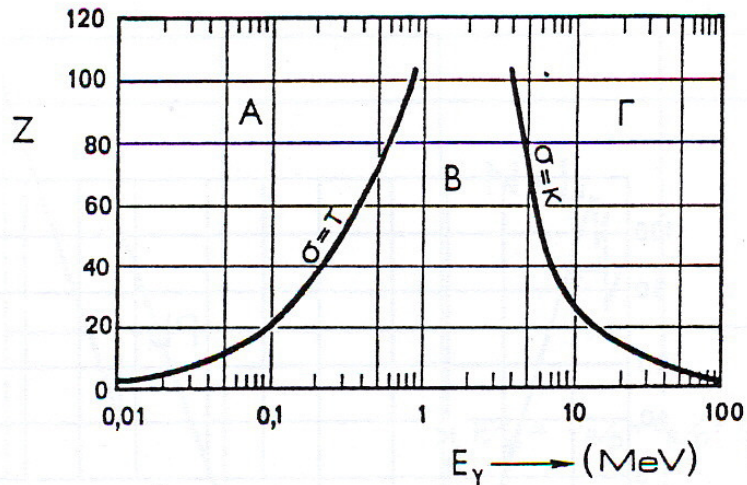
Μέσα στο αρχείο pm_sps_enddet_1.dat αποθηκεύεται το ενεργειακό φάσμα των φωτονίων που αποθέτουν ενέργεια στον ανιχνευτή ενέργειας. Στο διάγραμμα 3-1 παρατίθεται το φάσμα των φωτονίων. Το φάσμα απεικονίστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος απεικόνισης wgnuplot.



Διάγραμμα 3-1 Ενεργειακό φάσμα 500 καναλιών των απορροφούμενων φωτονίων στον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. Η ενέργεια στον άξονα X εκφράζεται σε eV και η πυκνότητα πιθανότητας στον άξονα Y σε 1/eV

Από το φάσμα παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των φωτονίων που έκανε κάποιου είδους αλληλεπίδραση με τον ανιχνευτή απέθεσε ενέργεια από 350 eV έως ~25keV. Η αρχική ενέργεια των φωτονίων είναι σχετικά υψηλή (200keV) και για τον ιστό, ο οποίος έχει πολύ χαμηλό ισοδύναμο Z, η μόνη αξιόλογη αλληλεπίδραση, αν και σπάνια είναι η σκέδαση Compton (σχήμα 3.5), που έχει ως συνέπεια μερική μόνον απόθεση της ενέργειας του αρχικού φωτονίου.

Επισημαίνεται ακόμα, ότι το υλικό αέρας που παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή έχει πολύ μικρή ικανότητα εξασθένησης των φωτονίων για την υπόψη ενέργεια.



Σχήμα 3.5 Κύριοι παράγοντες εξασθένησης της ενέργειας φωτονιακών ακτινοβολιών

Περιοχή Α: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Περιοχή Β: Σκέδαση Compton

Περιοχή Γ: Δίδυμη γένεση

Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι η απορροφούμενη δόση από οποιοδήποτε είδος ακτινοβολίας ορίζεται ως η ανά μονάδα μάζας απορροφητή αποτιθέμενη σε αυτόν ενέργεια. Είναι δηλαδή:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (3.1)$$

Από το αρχείο αποτελεσμάτων του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας (βλ. §3.2.1.3.β) υπολογίζεται αρχικά η συνολικά αποτιθέμενη ενέργεια στον ανιχνευτή-ιστό και κατόπιν η δόση σύμφωνα με τον ορισμό (σχέση 3.1). Ακολούθως περιγράφεται η διαδικασία αυτή σε βήματα:

ΒΗΜΑ 1^ο

Υπολογισμός του πλήθους των φωτονίων τα οποία αποθέτουν ενέργεια η οποία εμπίπτει σε μία ενεργειακή περιοχή. Αυτό γίνεται από τη σχέση:

$$photons = PDF * dE * total_photons \quad (3.2)$$

όπου:

- photons το πλήθος των φωτονίων που αποθέτουν ενέργεια εντός μιας ενεργειακής περιοχής (bin)
- PDF συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (1/(eV·particle)) της ενεργειακής περιοχής σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην §3.2.1.3 πρόκειται για τη δεύτερη στήλη του αρχείου εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης δόσης.
- DE εύρος της ενεργειακής περιοχής (eV) (βλ. §3.2.1.3).
- total photons το συνολικό πλήθος των φωτονίων που εκπέμφθηκαν από την πηγή (ιστορίες). Ο συνολικός αριθμός φωτονίων που προσομοιώθηκαν καταγράφεται σε συγκεκριμένα αρχεία εξόδου σύμφωνα με τα όσα προβλέπει ο κώδικας χρήστη και τα όσα αναφέρονται στην §3.2.1.3.

ΒΗΜΑ 2^ο

Υπολογισμός της συνολικής ενέργειας που αποτέθηκε από όλα τα φωτόνια στον ανιχνευτή από την παρακάτω σχέση, δηλαδή ως υπέρθεση των ενεργειών που κάθε φωτόνιο αποθέτει

$$E_{tot} = \sum_i E_i \cdot photons_i \quad (3.3)$$

όπου:

- E_{tot} η συνολικά αποτιθέμενη ενέργεια όλων των φωτονίων της προσομοίωσης.
- i ο αύξων αριθμός των ενεργειακών περιοχών όπως ορίστηκαν στην §3.2.1.3.α/β
- E_i η μέση ενέργεια της i ενεργειακής περιοχής (1^η στήλη αρχείου εξόδου ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας).
- $photons_i$ το πλήθος των φωτονίων τα οποία αποθέτουν στον ανιχνευτή ενέργεια η οποία βρίσκεται εντός των ορίων της i ενεργειακής περιοχής (σχέση (3.2)).

Στο επόμενο βήμα υπολογίζεται η μέση αποτιθέμενη ενέργεια στο σώμα (**average deposited energy, ADE**) ως το πηλίκο της διαίρεσης του παραπάνω αθροίσματος με τον συνολικό αριθμό των φωτονίων της πηγής.

ΒΗΜΑ 3^ο

Ορίζεται η ποσότητα μέση αποτιθέμενη ενέργεια σε σώμα/ανιχνευτή με βάση τη σχέση:

$$ADE = \frac{E_{tot}}{total_photons} \quad (3.4)$$

όπου:

ADE η μέση αποτιθέμενη ενέργεια στον ανιχνευτή

E_{tot} η συνολικά αποτιθέμενη ενέργεια όλων των φωτονίων της προσομοίωσης

total photons το συνολικό πλήθος των φωτονίων που εκπέμφθηκαν από την πηγή (ιστορίες). Ο συνολικός αριθμός φωτονίων που προσομοιώθηκαν καταγράφεται σε συγκεκριμένα αρχεία εξόδου σύμφωνα με τα όσα προβλέπει ο κώδικας χρήστη και τα όσα αναφέρονται στην §3.2.1.3.

Η χρήση της μέσης αποτιθέμενης ενέργειας και όχι της συνολικής αποτιθέμενης ενέργειας στο σώμα-ανιχνευτή στο επόμενο βήμα που περιλαμβάνει τον υπολογισμό της δόσης ως η αποτιθέμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας, προέκυψε μετά από μελέτη του κώδικα χρήστη renmain. Παρακάτω παρατίθεται το κομμάτι του κώδικα χρήστη renmain που αφορά τον υπολογισμό της αποτιθέμενης ενέργειας και της απορροφούμενης δόσης

C

C ***** Spectra from energy-deposition detectors.

C

```
IF(NDEDEF.GT.0) THEN
  DO ID=1,NDEDEF
    WRITE(BUF2,'(I5)') ID
    OPEN(9,FILE=SPCDEO(ID))
    WRITE(9,9320) ID
```

9320 FORMAT(

```
1 1X,# Results from PENMAIN. Output from energy-deposition',
1 ' detector #',I3,
1 /1X,# WARNING: May be strongly biased if interaction ',
1 'forcing is used!',
1 /1X,# 1st column: deposited energy (eV).',
1 /1X,# 2nd column: probability density (1/(eV*particle)).',
1 /1X,# 3rd column: statistical uncertainty (3 sigma).',/)
DO J=1,NDECH(ID)
  XX=EDEL(ID)+(J-0.5D0)*BDEE(ID)
  YERR=3.0D0*SQRT(ABS(DET2(ID,J)-DET(ID,J)**2*DF))
  YAV=DET(ID,J)*DF/BDEE(ID)
  YERR=YERR*DF/BDEE(ID)
  WRITE(9,'(1X,1P,3E14.6)')
1  XX,MAX(YAV,1.0D-35),MAX(YERR,1.0D-35)
  ENDDO
  CLOSE(9)
  ENDDO
ENDIF
```

Στο αρχείο αποτελεσμάτων του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας γράφεται η μεταβλητή **YAV** της οποίας οι τιμές προκύπτουν από τον τύπο $YAV=DET(ID,J)*DF/BDEE(ID)$, όπου η μεταβλητή **DF** ορίζεται ως $DF=1/TOTN$, με το **TOTN** να αποτελεί το συνολικό αριθμό σωματιδίων που εκπέμφθηκαν από την πηγή. Το αποτέλεσμα που παίρνουμε είναι λοιπόν η μέση αποτιθέμενη ενέργεια στο σώμα και αυτή είναι που χρησιμοποιείται μετά και για τον υπολογισμό της απορροφούμενης δόσης.

Σημείωση: Ένα από τα αρχεία εξόδου τα οποία προκύπτουν από την προσομοίωση με χρήση του κώδικα penmain είναι και το αρχείο penmain.dat. Στο αρχείο αυτό υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με το πλήθος των φωτονίων που προσομοιώθηκαν, τη διάρκεια της προσομοίωσης, την ταχύτητά της, το πλήθος των εκπεμπόμενων, οπισθοσκεδαζόμενων και απορροφούμενων από

την κατασκευή σωματιδίων κ.α. Επιπλέον, δίνεται η μέση αποτιθέμενη ενέργεια σε κάθε ορισμένο στο αρχείο εισόδου τύπου .geo σώμα. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται στο βήμα αυτό προκειμένου να συγκριθεί με την τιμή της μέσης αποτιθέμενης ενέργειας όπως υπολογίσθηκε από τη σχέση (3.4).

Η τιμή που προκύπτει από το αρχείο renmain.dat είναι **1.006985E+00 eV** και η τιμή που υπολογίστηκε με χρήση της σχέσης (3.4) είναι **1.00662E+00 eV**. Αξίζει να σημειωθεί πως η τιμή της μέσης αποτιθέμενης ενέργειας που υπολογίστηκε με την μέθοδο μέσω του αρχείου εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας είναι στατιστικά η ίδια με την αντίστοιχη τιμή που υπολογίζει το πρόγραμμα μέσω της προσομοίωσης, την οποία αποθηκεύει στο αρχείο αποτελεσμάτων renmain.dat. Η απόκλιση, η οποία θα πρέπει να αποδοθεί σε στρογγυλοποιήσεις κατά τη διάρκεια των υπολογισμών εκτιμήθηκε σε :

$$[(1.006985-1.00662)/ 1.006985]*100 = 0.036\%$$

ποσοστό που μας δίνει την δυνατότητα να θεωρήσουμε πως τα δύο αποτελέσματα ταυτίζονται. Τελικά, η μέση τιμή της ενέργειας που αποτίθεται στον ανιχνευτή θεωρείται ότι είναι:

$$\mathbf{ADE = 1.006985 eV.}$$

ΒΗΜΑ 4^ο

Μετά τον υπολογισμό της μέσης αποτιθέμενης ενέργειας στον απορροφητή (ανιχνευτή), επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της δόσης από τη σχέση (3.1). Ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας είναι κύλινδρος με διαστάσεις $R = 0.005 \text{ cm}$ και $h = 0.001 \text{ cm}$ άρα όγκο $V_1 = 7.85E-08 \text{ cm}^3$. Δεδομένου ότι ο ιστός έχει πυκνότητα 1 g/cm^3 , η μάζα του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας υπολογίζεται σε **7.85E-08 g**.

Το αποτέλεσμα που προέκυψε είναι :

$$\mathbf{D = 1.28232E+07 \pm 1.8E+05 eV/g}$$

ΒΗΜΑ 5^ο

Από το αρχείο του ανιχνευτή δόσης λαμβάνω την τιμή της δόσης σε αυτόν τον ανιχνευτή, διαβάζοντας το αρχείο εξόδου δεύτερου τύπου όπως αναφέρεται παραπάνω στην §3.2.1.3.γ και φαίνεται στο κομμάτι του αρχείου που ακολουθεί στο σχήμα (3.6)

```
# Results from PENMAIN. 3D dose distribution.  
# Plane # 1 Z= 2.00001E+02 cm  
# columns 1 to 3: I1, I2, I3  
# columns 4-6: x, y, z (cm).  
# 7th column: dose (eV/g).  
# 8th column: statistical uncertainty (3 sigma).  
  
1 1 1 5.00000E-10 5.00000E-10 2.00001E+02 1.00698E+07 1.8E+05
```

Σχήμα 3.6 Περιεχόμενο αρχείου εξόδου δεύτερου τύπου του ανιχνευτή δόσης

Όπως φαίνεται από το αρχείο αυτό:

$$D_{\text{dose enclosure}} = 1.00698E+07 \pm 1.8E+05 \text{ eV/g}$$

Από τη σύγκριση των δύο παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει ότι αυτά διαφέρουν στατιστικά σημαντικά (27%). Η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι προσομοιώνεται λεπτή δέσμη φωτονίων (pencil beam) οπότε όλες οι αλληλεπιδράσεις και η απόθεση ενέργειας γίνονται πρακτικά κατά μήκος της τροχιάς των φωτονίων της δέσμης και σε πολύ μικρή απόσταση από αυτήν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερώνονται εξαιτίας των σκεδάσεων Compton έχουν πολύ μικρή εμβέλεια. Το γεγονός ότι οι διαστάσεις (και κατά συνέπεια η μάζα) των δύο ανιχνευτών διαφέρουν σημαντικά και το ότι πραγματοποιείται αναγωγή της αποτιθέμενης ενέργειας στη μάζα του κάθε ανιχνευτή, έχει ως συνέπεια η διαφορά μεταφέρεται και στο τελικό αποτέλεσμα.

Προκειμένου να διερευνηθεί πλήρως το φαινόμενο της διαφοράς και αυτό και να προκύψουν συγκρίσιμα αποτελέσματα, θα έπρεπε:

- είτε να προσομοιωθεί πλατειά δέσμη φωτονίων (με πλάτος δέσμης > διαστάσεις ανιχνευτών),

- είτε να χρησιμοποιηθούν ανιχνευτές απόθεσης ενέργειας και δόσης ακριβώς των ίδιων διαστάσεων.

Στα πλαίσια της Εργασίας προτιμήθηκε η δεύτερη λύση και έγινε νέα προσομοίωση αλλάζοντας τις διαστάσεις και το σχήμα του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. Αυτή τη φορά χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας ορθογώνιου σχήματος και διαστάσεων ίδιων με αυτές του ανιχνευτή δόσης. Πρόκειται για ορθογώνια παραλληλεπίπεδο με μήκη πλευρών 0.01 x 0.01 x 0.001 cm. Τα αρχεία περιγραφής της γεωμετρίας του προβλήματος enddetector2.geo και εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης depen2.in παρουσιάζονται στους Πίνακες 3-3 και 3-4 στο τέλος του κεφαλαίου.

Η προσομοίωση έγινε με εκτέλεση της εντολής:

>penmainn.exe<depen2.in

Η διάρκεια προσομοίωσης ήταν 9.301547E+03 sec και προσομοιώθηκαν συνολικά 3.230875E+08 ιστορίες.

Ακολουθώντας πάλι τα προαναφερθέντα βήματα για τον υπολογισμό πρώτα της μέσης αποτιθέμενης ενέργειας και στη συνέχεια της απορροφούμενης δόσης από το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας προκύπτουν οι εξής τιμές πρώτα για τη μέση αποτιθέμενη ενέργεια και στη συνέχεια για την απορροφούμενη από τον ιστό δόση.

$$\mathbf{ADE = 1.01024\ eV \pm 2.2E-02\ eV\ \text{και}\ D = 1.01024E+07\ eV/g \pm 2.2E-02\ eV/g}$$

Από το αρχείο εξόδου δεύτερου τύπου του ανιχνευτή δόσης προκύπτει για τη δόση στον ιστό η τιμή:

$$\mathbf{D_{Dose\ enclosure} = 1.01011E+07 \pm 2.2E+05\ eV/g}$$

Οι τιμές αυτές διαφέρουν μεταξύ τους κατά ένα ποσοστό

$$\mathbf{[(1.01024E+07 - 1.01011E+07)*100/ 1.01024E+07] = 0.01\ \%}$$

Η απόκλιση αυτή προκύπτει ως στατιστικά ασήμαντη και επομένως μπορεί να θεωρηθεί πως οι δύο τιμές στατιστικά ταυτίζονται και μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο ανιχνευτής δόσης δίνει κατ'αρχήν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Έχοντας λοιπόν δοκιμάσει δύο λύσεις για το σχήμα και τις διαστάσεις του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το πρόγραμμα βρίσκει την ενέργεια που αποθέτει κάθε φωτόνιο στο σώμα και αφού αθροίσει αυτές τις ενέργειες χρησιμοποιεί τον όγκο του σώματος που έχει οριστεί ως ανιχνευτής δόσης για να υπολογίσει τη μάζα του και την δόση στη μονάδα της μάζας.

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τον πιο απλό ορισμό της απορροφούμενης δόσης, προκειμένου να την υπολογίσει και ο υπολογισμός αυτός μπορεί εύκολα να επαληθευτεί με απλούς υπολογισμούς και από τον ίδιο το χρήστη.

3.3.1.1 Διερεύνηση παραμέτρων που επηρεάζουν τον υπολογισμό της δόσης

Για τον υπολογισμό της απορροφούμενης δόσης σε αυτήν την ΔΕ, έχουν χρησιμοποιηθεί δύο μέθοδοι μέχρι αυτό το σημείο, οι οποίες βασίζονται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Ο πρώτος χρησιμοποιεί τον κώδικα προσομοίωσης αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας και ύλης μέσω μιας επιλογής μέσα στο αρχείο εισόδου δεδομένων που υπολογίζει κατευθείαν τη δόση σε μία θέση (Dose Enclosure), και ο δεύτερος χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας και το θεμελιώδη ορισμό της απορροφούμενης δόσης (βλ. σχέση (3.1)) Όπως διαπιστώθηκε παραπάνω μετά την σύγκριση αποτελεσμάτων, τα αποτελέσματα που δίνουν οι παραπάνω μεθοδολογίες σε πρώτη προσέγγιση ταυτίζονται.

Και οι δύο τρόποι για να χρησιμοποιηθούν χρειάζεται να οριστεί από τον χρήστη ένας εικονικός ανιχνευτής. Στην πρώτη περίπτωση ορίζεται ένας ανιχνευτής απορροφούμενης δόσης (DE), ενώ στην δεύτερη ορίζεται ένας ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας. Οι δύο αυτοί ανιχνευτές, ανεξάρτητα με το αν αποτελούν ή όχι μέρος της κατασκευής μας, πρέπει να οριστούν και στο αρχείο εισόδου δεδομένων .in .

Για τον μεν ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας πρέπει να οριστεί το εύρος ενεργειών που αυτός θα ανιχνεύει καθώς και τα κανάλια στα οποία θα χωριστεί αυτή η ενεργειακή περιοχή. Για τον δε ανιχνευτή δόσης, ορίζεται εκτός από τις διαστάσεις του και ο αριθμός των πλεγματικών γραμμών στις οποίες θα χωριστούν αυτές οι διαστάσεις, και επομένως οι στοιχειώδεις όγκοι μέσα στους οποίους θα γίνει ο υπολογισμός. Παρατηρείται δηλαδή ότι και για τους δύο ανιχνευτές υπάρχουν διάφορες επιλογές (βαθμοί ελευθερίας) που μπορεί να κάνει ο χρήστης, οι

οποίες είναι δυνατόν να παίξουν καθοριστικό ρόλο τόσο στην ακρίβεια της προσομοίωσης, όσο ακόμα και στον ίδιο τον υπολογισμό της δόσης. Συγκεκριμένα, οι βαθμοί ελευθερίας είναι:

- ο αριθμός των ενεργειακών παραθύρων (bins) που θα χωριστεί η ενεργειακή περιοχή των σωματιδίων που ανιχνεύει ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας
- ο αριθμός των στοιχειωδών όγκων υπολογισμού της δόσης του ανιχνευτή δόσης.

Στη συνέχεια, επιχειρείται μία διερεύνηση της επίδρασης αυτών των παραγόντων στην ακρίβεια του αποτελέσματος, με στόχο τη διατύπωση ορισμένων γενικών συμπερασμάτων, τα οποία εκτιμάται ότι θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για τους μελλοντικούς χρήστες του κώδικα. Μάλιστα, λόγω του αντικειμένου της ΔΕ και του γεγονότος ότι το ενδιαφέρον εστιάζεται στον υπολογισμό δόσης σε ένα συγκεκριμένο σημείο και όχι στην την κατανομή της, θα ελεγχθεί η επίδραση μόνο του αριθμού των ενεργειακών καναλιών του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας (bins), και όχι του αριθμού των στοιχειωδών όγκων του ανιχνευτή δόσης, ο οποίος στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ θα είναι πάντα ίσος με ένα.

Ο αριθμός των bins στα οποία χωρίζεται η ενεργειακή περιοχή την οποία ανιχνεύει ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας, επιδρά πάνω στο καταγραφόμενο ενεργειακό φάσμα των φωτονίων. Υπό διερεύνηση είναι το αν υπάρχει σημαντική επίδραση και στην ακρίβεια του υπολογισμού της δόσης, με χρήση του συγκεκριμένου ανιχνευτή. Θα μπορούσε με την χρησιμοποίηση μικρότερου αριθμού καναλιών με μεγαλύτερο ενεργειακό πλάτος, φωτόνια με ενέργειες όχι τόσο κοντά στο άνω όριο της ενεργειακής αυτής περιοχής να ανιχνεύονται σαν φωτόνια με ενέργειες κοντά στο όριο αυτό. Αποτέλεσμα θα ήταν να ανιχνεύεται αποτιθέμενη ενέργεια στο σώμα μεγαλύτερη από αυτή που στην πραγματικότητα αυτά τα φωτόνια αποθέτουν.

Για να διερευνηθεί η επίδραση που έχει το πλήθος των bins, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας η οποία περιγράφηκε στην §3.4.1 και πραγματοποιήθηκε νέα προσομοίωση με μόνη τροποποίηση τον αριθμό των ενεργειακών καναλιών στα οποία έχει χωρισθεί η ενεργειακή περιοχή ανίχνευσης του εξεταζόμενου ανιχνευτή.

Στη νέα προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ακριβώς το ίδιο αρχείο υλικών, το `airtissue.mat`, η γεωμετρία προσδιορίζεται από το αρχείο `endetector3.geo` το οποίο περιγράφει την ίδια γεωμετρία με το αρχείο `endetector2.geo` της παραγράφου 3.4.1, ο ανιχνευτής δόσης είναι των

ίδιων διαστάσεων και επομένως έχει την ίδια μάζα με πριν, ενώ ακριβώς ίδια είναι η αρχική ενέργεια των φωτονίων και η μορφή της δέσμης την οποία εκπέμπει η πηγή. Η μονή διαφορά της προσομοίωσης αυτής είναι ότι το ενεργειακό φάσμα χωρίζεται αυτή την φορά σε λιγότερα κανάλια (80) αντί για 500.

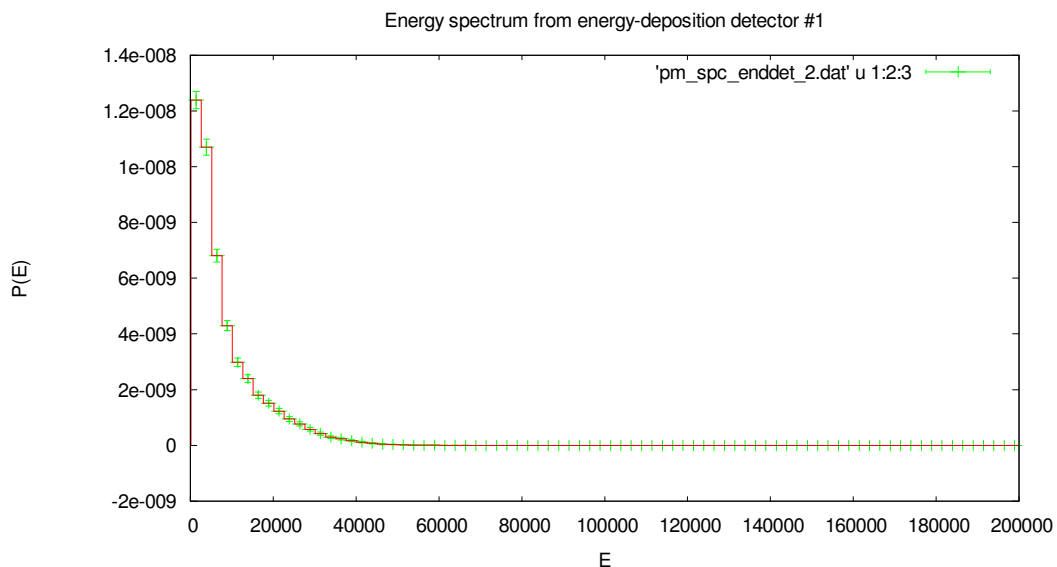
Στο τέλος του Κεφαλαίου, στους Πίνακες 3-5 και 3-6 παρουσιάζονται τα αρχεία γεωμετρίας endetector3.geo και εισόδου δεδομένων depen3.in της προσομοίωσης.

Η προσομοίωση έγινε με εκτέλεση της εντολής:

`>penmainn.exe<depen3.in`

Η διάρκεια προσομοίωσης ήταν $2.182847E+04$ sec και προσομοιώθηκαν συνολικά $4.712089E+08$ ιστορίες.

Τα αποτελέσματα του ανιχνευτή αποθηκεύονται στο αρχείο δεδομένων pm_spc_enddet_2.dat και παρουσιάζονται στο διάγραμμα 3-2.



Διάγραμμα 3-2 Ενεργειακή κατανομή απορροφούμενων φωτονίων με 80 ενεργειακά κανάλια. Η ενέργεια στον άξονα X εκφράζεται σε eV και η πυκνότητα πιθανότητας στον άξονα Y σε $1/eV$

Για να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο προσομοιώσεων, το πρόγραμμα έτρεξε για το ίδιο σχεδόν πλήθος ιστοριών, με την πηγή να εκπέμπει δηλαδή σχεδόν τον ίδιο αριθμό φωτονίων και στις δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη προσομοιώθηκαν $4.701964E+08$ φωτόνια και στην δεύτερη $4.712089E+08$ φωτόνια. Και στις δύο περιπτώσεις

προνοήθηκε, ώστε ο υπολογισμός της δόσης από τον ανιχνευτή δόσης να γίνεται σε έναν και μόνο στοιχειώδη όγκο έτσι ώστε να διευκολύνεται ακόμα περισσότερο η σύγκριση. Έτσι, οι όποιες σημαντικές διαφορές ενδεχομένως προκύψουν στα αποτελέσματα, θα πρέπει να αποδοθούν στο πλήθος των ενεργειακών καναλιών του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας.

bins	Υπολογισμός δόσης μέσω των αποτελεσμάτων του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας		Υπολογισμός δόσης από τον Ανιχνευτή δόσης
	ADE (eV)	ADE/(μάζα ανιχνευτή) (eV/gr)	Δόση (eV/gr)
80	1.014 ± 0.006	$1.0141\text{E}+07 \pm 6\text{E}+04$	$1.0071\text{E}+07 \pm 6\text{E}+04$
500	1.0102 ± 0.007	$1.0101\text{E}+07 \pm 7.3\text{E}+04$	$1.0101\text{E}+07 \pm 7.3\text{E}+04$

Πίνακας 3-7 Συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού δόσης με τη μέθοδο της αποτιθέμενης ενέργειας με τη χρησιμοποίηση 80 και 500 ενεργειακών καναλιών.

Στον Πίνακα 3-7 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων. Στην πρώτη στήλη υπάρχει ο αριθμός των ενεργειακών καναλιών που χρησιμοποιούνται για τον ανιχνευτή σε κάθε περίπτωση. Στην δεύτερη δίνεται η μέση αποτιθέμενη ενέργεια στον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας (σώμα που θεωρούμε ως απορροφητή). Στην τρίτη στήλη δίνεται η μέση αποτιθέμενη ενέργεια στον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας διαιρεμένη με τη μάζα του και στην τελευταία στήλη είναι το αποτέλεσμα του ανιχνευτή δόση. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές συνοδεύονται από τα σχετικά σφάλματά τους σε επίπεδο 1σ, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα χρήστη renmain και είναι κατάλληλα στρογγυλοποιημένες.

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω Πίνακα 3-7, υπάρχει μικρή απόκλιση στον υπολογισμό της μέσης αποτιθέμενης ενέργειας ανά μονάδα μάζας όπως αυτή υπολογίζεται μέσω του αρχείου αποτελεσμάτων του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. Η απόκλιση αυτή μεταξύ των δύο τιμών είναι της τάξεως του 0.4 % και δε μπορεί να θεωρηθεί στατιστικά σημαντική. Οπότε, μπορούμε να συμπεράνουμε πως ο αριθμός των ενεργειακών καναλιών στα οποία χωρίζεται η ενεργειακή περιοχή του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας, δε φαίνεται να επηρεάζει τον υπολογισμό της αποτιθέμενης δόσης.

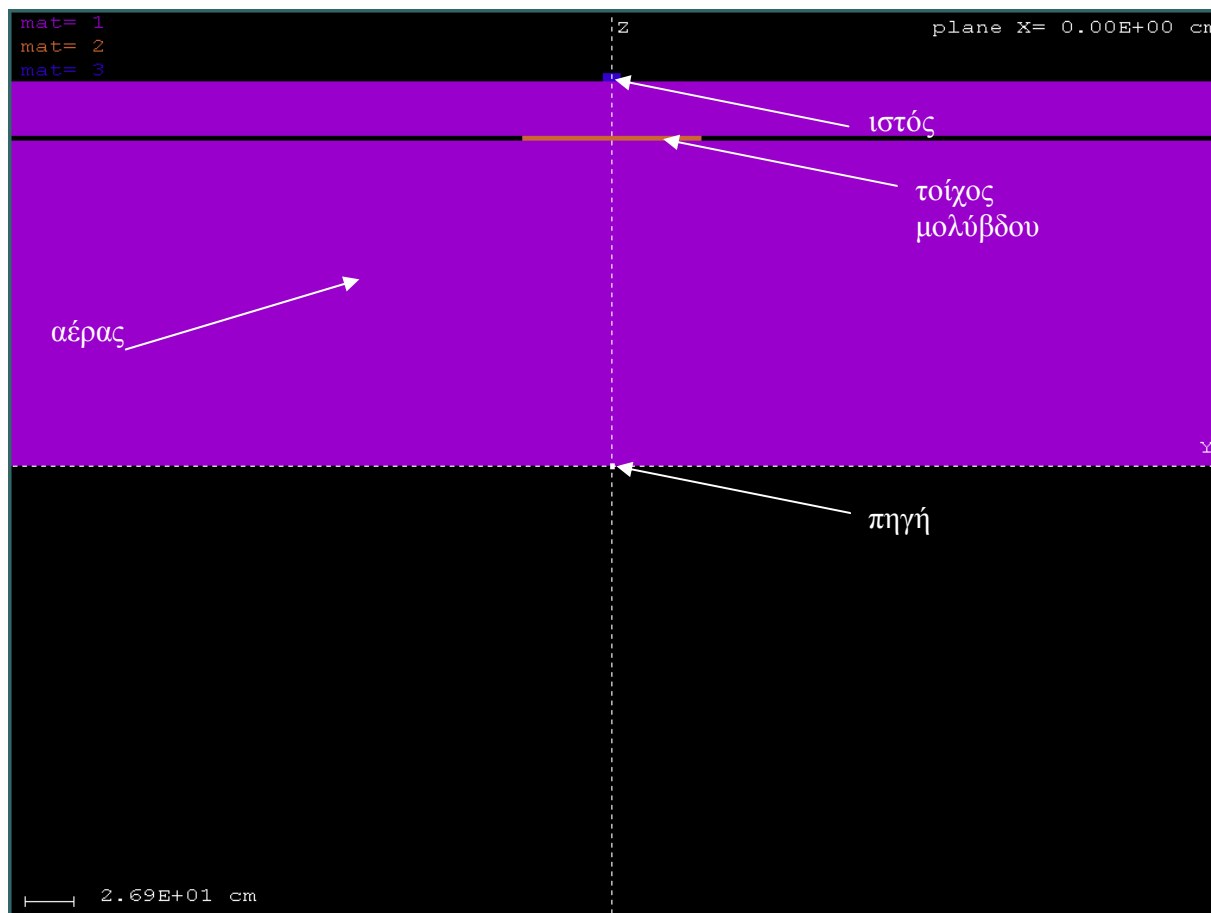
3.3.2 Υπολογισμός της δόσης σημειακής πηγής πίσω από απλή θωράκιση μολύβδου.

Στο πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της απορροφούμενης δόσης με τη χρήση προσομοίωσης επιχειρήθηκε να αποκωδικοποιηθεί η λειτουργία ενός από τα εργαλεία που προσφέρονται από τον κώδικα PENELOPE, του ανιχνευτή απορροφούμενης δόσης.

Η πρώτη προσπάθεια προς αυτή την κατεύθυνση έδειξε πως ο ανιχνευτής δόσης χρησιμοποιεί τον θεμελιώδη τύπο ορισμού της απορροφούμενης δόσης για τον υπολογισμό (σχέση (3.1)). Υπολογίζει δηλαδή τη δόση αυτή ως τη μέση αποτιθέμενη, στο σώμα που εξετάζουμε, ενέργεια ανά μονάδα μάζας του σώματος.

Στο επόμενο βήμα το οποίο και περιγράφεται στην παράγραφο αυτή, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή του υπολογισμού της δόσης μέσω του ανιχνευτή δόσης σε μια πολύ απλή αλλά ρεαλιστική περίπτωση, την θωράκιση σημειακής μονοενεργειακής πηγής φωτονίων που εκπέμπει υπό συγκεκριμένη στερεά γωνία, από μια πλάκα μολύβδου. Τα φωτόνια που εκπέμπει η πηγή είναι ενέργειας $E = 500 \text{ keV}$, ενώ η ημιγωνία εκπομπής είναι 90° . Το σώμα στο οποίο ενδιαφερόμαστε να υπολογίσουμε τη δόση λόγω της ακτινοβόλησης από την πηγή είναι ανθρώπινος ιστός, με σχήμα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο και βρίσκεται από την άλλη πλευρά της πλάκας.

Όσον αφορά τη γεωμετρία του προβλήματός, η πηγή θεωρείται ότι είναι τοποθετημένη στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων και η πλάκα σε απόσταση $z = 180 \text{ cm}$ από αυτήν. Οι διαστάσεις της πλάκας είναι $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 2.43 \text{ cm}$ και ο χώρος μεταξύ πλάκας και της πηγής αποτελείται από αέρα. Πίσω από τον τοίχο, σε απόσταση 30 cm από αυτόν και (212.43 cm) από την πηγή βρίσκεται το ομοίωμα ανθρώπινου ιστού, ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο διαστάσεων $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}$, ενώ ο χώρος μεταξύ του τοίχου και του ιστού είναι γεμάτος αέρα. Η γεωμετρία του προβλήματος παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2. Η πηγή βρίσκεται στο κέντρο του συστήματος συντεταγμένων στην τομή των αξόνων Z και Y στην εικόνα. Με το μωβ χρώμα παρουσιάζεται ο αέρας που υπάρχει ανάμεσα στην πηγή και τον τοίχο καθώς και ανάμεσα στον τοίχο και τον ιστό. Με το πορτοκαλί παρουσιάζεται ο τοίχος από μολύβι και με το μπλε ο ανθρώπινος ιστός. Τέλος με το μαύρο χρώμα παρουσιάζεται το κενό. Το αρχείο καθορισμού της γεωμετρίας είναι το `wall.geo` και μαζί με το αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης `wall.in`, παρουσιάζονται στο τέλος του κεφαλαίου. (Πίνακες 3-8, 3-9)



Εικ. 3.2 Γεωμετρία προβλήματος προσδιορισμού της δόσης σε ανθρώπινο ιστό κυλινδρικού σχήματος από ακτινοβολία μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων υπό ημιγωνία δέσμης 90° , ενέργειας $E = 500\text{keV}$

Το πάχος d της πλάκας (2.43cm) δεν έχει επιλεγεί τυχαία, αλλά κατά τέτοιο τρόπο που το γινόμενο του πάχους της πλάκας d και της τιμής του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης (μ) να είναι ένας ακέραιος αριθμός. Αυτό κρίθηκε επιθυμητό, καθώς, για το μέγεθος «παράγοντας επαύξησης της Έκθεσης» (**Buildup Factor B_γ**), το οποίο είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό της δόσης στο υπόψη πρόβλημα με χρήση αναλυτικών σχέσεων, στην βιβλιογραφία διατίθενται δεδομένα για ακέραιες τιμές του γινομένου $\mu \cdot d$. Επιλέχθηκε λοιπόν αυθαίρετα μία τιμή του $\mu \cdot d = 4$, η οποία αντιστοιχεί σε μία πλάκα μέσου πάχους για την ενέργεια των φωτονίων του προβλήματος (500keV). Από τη βιβλιογραφία [Λεωνίδου, 1984] η τιμή του B_γ για τη γεωμετρία σημειακής πηγής πίσω από πλάκα για $\mu \cdot d = 4$ έχει την τιμή 1.69 ($B_\gamma=1.69$). Επιπλέον, επίσης από τη βιβλιογραφία, για μόλυβδο και ενέργεια φωτονίων $E = 500\text{ keV}$ η τιμή

του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης φωτονίων είναι $\mu = 1.644 \text{ cm}^{-1}$. Συνεπώς, η τιμή του πάχους της πλάκας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$d = \frac{4}{1.644} = 2.43 \text{ cm} \quad (3.5)$$

Επισημαίνεται ότι ο παράγοντας επαύξησης που προαναφέρθηκε είναι ο παράγοντας επαύξησης της Έκθεσης. Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε., στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί ως παράγοντας επαύξησης της δόσης, κάτι που δεν απέχει από την πραγματικότητα για την ενέργεια φωτονίων του προβλήματος.

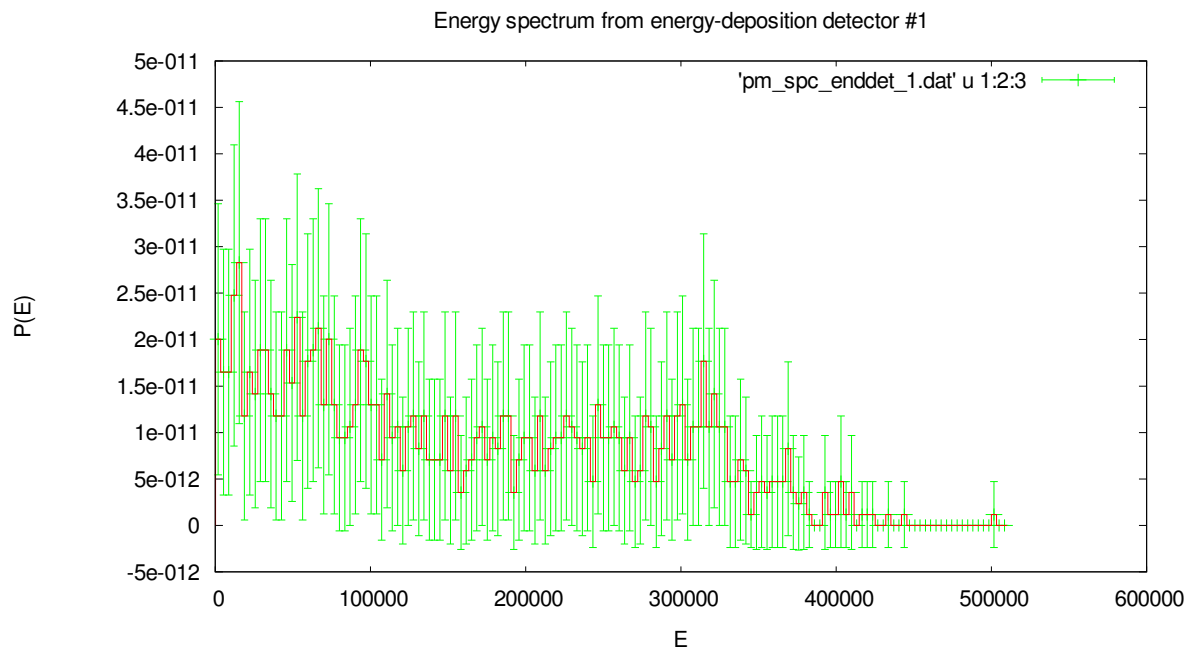
Το **αρχείο εισόδου** (δεδομένων) του προβλήματος είναι το wallin.in. Το αρχείο ξεκινά με τον ορισμό των σωματιδίων που θα προσομοιωθούν, είναι φωτόνια ενέργειας 500 keV και εκπέμπονται σε δέσμη με ημιγωνία εκπομπής ίση με 90° . Ουσιαστικά δηλαδή η σημειακή πηγή εκπέμπει φωτόνια μόνο προς τον ημιχώρο που βρίσκεται η πλάκα και όχι σε όλο το χώρο. Αυτό έγινε για οικονομία χρόνου, αφού με αυτό τον τρόπο, στο ίδιο περίπου χρονικό διάστημα, το πρόγραμμα προσομοιώνει τα διπλάσια φωτόνια. Αν η πηγή ήταν σημειακή και ισότροπη, στο χρονικό αυτό διάστημα, προς τη μεριά του τοίχου θα εξέπεμπε ακριβώς τα μισά φωτόνια και για να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια θα απαιτείτο περίπου ο διπλάσιος χρόνος προσομοίωσης. Με το τέχνασμα αυτό λοιπόν επιταχύνεται η διαδικασία προσομοίωσης. Άλλωστε, για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, ένα φωτόνιο που εκπέμπεται με διεύθυνση τέτοια ώστε να μην είναι δυνατόν να αλληλεπιδράσει με την πλάκα, δεν είναι δυνατόν να συνεισφέρει σε δόση σε οποιοδήποτε σημείο μετά την πλάκα. Ο άξονας z είναι ο άξονας συμμετρίας της δέσμης. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα χρησιμοποιούνται δύο από τους εικονικούς ανιχνευτές που προσφέρονται, ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας και ο ανιχνευτής απορροφούμενης δόσης. Ως ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας ορίζεται το σώμα που στο αρχείο ορισμού της γεωμετρίας τύπου .geo, ορίζεται ως σώμα 3 και είναι ο ανθρώπινος ιστός που βρίσκεται πίσω από τον τοίχο. Θα ανιχνεύει ενέργειες σωματιδίων από 150eV έως 510 keV με το φάσμα αυτό να χωρίζεται σε 150 ενεργειακά κανάλια (energy bins). Ο ανιχνευτής απορροφούμενης δόσης δεν αποτελεί μέρος της κατασκευής, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην §3.2.1.2γ, και επομένως δεν μπορεί να ορισθεί ως τέτοιος απλά ένα σώμα. Ορίζεται λοιπόν ως ανιχνευτή δόσης το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο αποτελείται από ανθρώπινο ιστό και έχει διαστάσεις 10 x 10 x 5 cm όπως αναφέρθηκε. Η βάση του βρίσκεται σε ύψος $z = 212.43 \text{ cm}$ και οι κορυφές του στερεού

βρίσκονται στα σημεία (-5., 0., 212.43), (5., 0., 212.43), (0., -5., 212.43), (0., 5., 212.43), (-5., 0., 217.43), (5., 0., 217.43), (0., -5., 217.43), (0., 5., 217.43). Ο ανιχνευτής αυτός δόσης, όπως ορίσθηκε, συμπίπτει πλήρως με τον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. Δεν επελέγη η χρήση γραμμών πλέγματος, οπότε θα υπολογισθεί συνολικά η δόση μέσα στον ανιχνευτή και όχι η κατανομή δόσης. Το αρχείο υλικών του προβλήματος ονομάζεται wall.mat και οι παράμετροι που ακολουθούν ορίζουν σαν υλικό 1 τον αέρα, υλικό 2 το μόλυβδο και υλικό 3 τον ανθρώπινο ιστό.

Η προσομοίωση έγινε με εκτέλεση της εντολής:

>penmain.exe<wallin.in

Η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν $1.903595E+05$ sec και προσομοιώθηκαν συνολικά $2.494215E+08$ ιστορίες. Στο τέλος του κεφαλαίου, στα διαγράμματα 3-3 – 3-6 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια που εξήλθαν ή οπισθοσκεδάστηκαν από την κατασκευή. Όλες οι απεικονίσεις έγιναν με χρήση του προγράμματος wgnuplot. Στο διάγραμμα 3-3 παρουσιάζεται η κατανομή των ενεργειών των ηλεκτρονίων που εξέρχονται από τη γεωμετρία που εξετάζεται. Τα ηλεκτρόνια αυτά διεγείρονται και εκπέμπονται κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με το μόλυβδο της πλάκας. Στο διάγραμμα 3-4 παρουσιάζεται η κατανομή των ηλεκτρονίων που οπισθοσκεδάζονται. Στο διάγραμμα 3-5 παρουσιάζεται το ενεργειακό φάσμα των φωτονίων που εξέρχονται από την πλάκα. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι μεγάλο ποσοστό των φωτονίων περνούν από την πλάκα παρθενικά ενώ πολύ μικρότερο ποσοστό φωτονίων χάνουν μεγάλο μέρος της ενέργειάς τους κατά τις αλληλεπιδράσεις με το μόλυβδο. Στο διάγραμμα 3-6 παρουσιάζεται η κατανομή των φωτονίων που οπισθοσκεδάζονται κατά την αλληλεπίδρασή τους με την πλάκα. Τέλος, στο διάγραμμα 3-7 έχουμε την ενεργειακή κατανομή των φωτονίων που αποθέτουν ενέργεια μέσα στον ανιχνευτή αποτιθέμενη ενέργειας που έχει οριστεί. Παρατηρείται πως σημαντικό ποσοστό φωτονίων αποθέτουν ενέργεια στην περιοχή 10 – 100 keV. Το ενεργειακό φάσμα της αποτιθέμενης ενέργειας στον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3-7 είναι αυτό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό της απορροφούμενης δόσης.



Διάγραμμα 3-7 Φάσμα ενεργειών που αποτίθεται στον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. Η ενέργεια στον άξονα X εκφράζεται σε eV και η πυκνότητα πιθανότητας στον άξονα Y σε 1/eV

Ο υπολογισμός της δόσης για το πρόβλημα αυτό έγινε:

- με τη χρήση του εικονικού ανιχνευτή απορροφούμενης δόσης,
- με τη μέθοδο του υπολογισμού της αποτιθέμενης ενέργειας και εν συνεχεία υπολογισμού της απορροφούμενης δόσης,
- αναλυτικά, με τη χρήση θεωρητικών σχέσεων από τη βιβλιογραφία.

Ο ανιχνευτής δόσης χρησιμοποιήθηκε με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται παραπάνω στο αρχείο εισόδου δεδομένων wallin.in, ενώ ο υπολογισμός με τη μέθοδο της αποτιθέμενης ενέργειας έγινε χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.4.1, ακολουθώντας τα 5 διακριτά βήματα. Η μάζα του σώματος που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό ήταν 500gr και τα αποτελέσματα όπως αναμένεται άλλωστε ταυτίζονται. Ο ανιχνευτής δόσης μέσω του αρχείου αποτελεσμάτων του δίνει μια δόση της τάξης των $1.05307E-03$ eV/g. Η μέθοδος χρησιμοποίησης του αρχείου αποτελεσμάτων του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας μια δόση της τάξης των $1.0404E-03$ eV/g. Η απόκλιση των δύο τιμών είναι της τάξης του:

$$[(1.05047E-03-1.0404E-03)/ 1.05047E-03]*100 = 0.95 \%$$

Και αποδεικνύεται ότι δεν είναι στατιστικά σημαντική. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα του θεωρητικού υπολογισμού της δόσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν σχέσεις από την βιβλιογραφία [Λεωνίδου, 1984]. Η δόση σε μονάδες eV/g δίνεται από τη σχέση:

$$D = D_{\text{παρθενικά}} * B_{\chi} = \frac{Q}{(4\pi r^2) / 2} e^{-(\mu_{\text{air}} d_{\text{air}} + \mu_{\text{Pb}} d_{\text{Pb}})} E_{\gamma} \left(\frac{\mu_{\alpha}}{\rho}\right)_{\text{tissue}} * B_{\chi} \quad (3.6)$$

Στην παραπάνω σχέση :

- Q είναι ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπει η πηγή και στην περίπτωση μας οι ιστορίες που προσομοιώθηκαν,
- r είναι η απόσταση της πηγής από το σημείο υπολογισμού της δόσης σε εκατοστά,
- μ_{air} ο γραμμικός συντελεστής εξασθένισης του αέρα για την ενέργεια των 500 keV σε cm^{-1} ,
- μ_{Pb} ο γραμμικός συντελεστής εξασθένισης του μολύβδου για τα 500 keV αφού η ακτινοβολία διανύει μια απόσταση μέσα στον αέρα και στο μολύβδο πριν φτάσει στο σημείο που υπολογίζεται η δόση και εξασθενεί,
- E_{γ} η ενέργεια των φωτονίων της πηγής σε eV
- μ_{α}/ρ ο μαζικός συντελεστής απορρόφησης του ιστού σε cm^2/g .
- B_{χ} ο παράγοντας επαύξησης δόσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, επειδή η πηγή εκπέμπει υπό ημιγωνία δέσμης 90° , το εμβαδόν που χρησιμοποιείται στην σχέση δεν είναι αυτό της σφαίρας όπως στην περίπτωση σημειακής και ισότροπης πηγής αλλά το μισό αυτού. Επίσης επισημαίνεται ότι η δόση υπολογίζεται στο κέντρο του ορθογωνικού σχήματος ιστού, άρα σε απόσταση $r = 214.93 \text{ cm}$ από την πηγή

Οι τιμές των παραπάνω σταθερών υπολογίστηκαν με βάση τη γεωμετρία του προβλήματος και τους πίνακες ιδιοτήτων των υλικών που παρουσιάζονται στο αρχείο υλικών pm_material.dat. Προκύπτουν λοιπόν οι παρακάτω αριθμητικές τιμές οι οποίες αντικαθίστανται στην σχέση υπολογισμού της απορροφούμενης δόσης.

- $Q = 1.5228E+08$ φωτόνια
- $E_{\gamma} = 500 \text{ keV} = 500000 \text{ eV}$

- $d_{\text{air}} = 180 \text{ cm} + 30 \text{ cm} = 210 \text{ cm}$
- $d_{\text{Pb}} = 2.43 \text{ cm}$
- $r = 214.93 \text{ cm}$
- $(\mu/\rho)_{\text{air}} = 8.70968\text{E-}02 \text{ cm}^2/\text{g} \rightarrow \mu_{\text{air}} = 1.0493\text{E-}04 \text{ cm}^{-1}$
- $(\mu/\rho)_{\text{Pb}} = 1.60132\text{E-}01 \text{ cm}^2/\text{g} \rightarrow \mu_{\text{air}} = 1.8175 \text{ cm}^{-1}$
- $(\mu_{\alpha}/\rho)_{\text{tissue}} = 0.032 \text{ cm}^2/\text{g}$
- $B_{\chi} = 1.69$

Μετά την αντικατάσταση των παραπάνω αριθμητικών τιμών των μεταβλητών στην σχέση (3.6) προέκυψε η συνολική δόση από παρθενικά και μη φωτόνια, στον ιστό. Τα αποτελέσματα και των τριών μεθόδων υπολογισμού της δόσης με τα σχετικά σφάλματά τους σε επίπεδο 1σ καθώς και οι μεταξύ τους αποκλίσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3-10.

Ανιχνευτής δόσης (1) (eV/g)	Ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας (2) (eV/g)	Βιβλιογραφία (3) (eV/g)	Απόκλιση % (1) – (2)	Απόκλιση % (1) – (3)	Απόκλιση % (2) – (3)
11E-04 ± 2E-04	10E-04 ± 2E-04	1.6667E+05	0.954748026	99.99999938	100

Πίνακας 3-10 Συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού δόσης και με τις τρεις μεθόδους και επί τοις εκατό αποκλίσεις τους.

Όπως παρατηρείται, υπάρχει μεγάλη απόκλιση της τιμής της δόσης που υπολογίζει ο ανιχνευτής δόσης και η μέθοδος χρήσης του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας της με την τιμή που υπολογίζεται βιβλιογραφικά με βάση τη σχέση (3.6). Προκύπτει λοιπόν, καταρχήν, το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν μας δίνουν, ως αποτέλεσμα, αυτό ακριβώς που πιστεύαμε έως αυτό το σημείο ότι δίνουν, δηλαδή την απορροφούμενη δόση σε ένα σημείο λόγω ακτινοβολίας. Μετά τη διαπίστωση των μεγάλων αυτών αποκλίσεων ακολούθησε επανεξέταση του πηγαίου κώδικα penmain. Το τμήμα του κώδικα το οποίο αναφέρεται στον υπολογισμό της δόσης είναι το παρακάτω:

```

OPEN(9,FILE='pm_3d_dose.dat')
WRITE(9,9420)
9420 FORMAT(1X,'# Results from PENMAIN. 3D dose distribution.')

```

```

WRITE(9,9421) DXL(1),DXU(1)
9421 FORMAT(1X,'# Dose-map enclosure: XL = ',1P,E13.6,
1 ' cm, XU = ',E13.6,' cm')
WRITE(9,9422) DXL(2),DXU(2)
9422 FORMAT(1X,'#',23X,'YL = ',1P,E13.6,' cm, YU = ',E13.6,' cm')
WRITE(9,9423) DXL(3),DXU(3)
9423 FORMAT(1X,'#',23X,'ZL = ',1P,E13.6,' cm, ZU = ',E13.6,' cm')
WRITE(9,9424) NDB(1),NDB(2),NDB(3)
9424 FORMAT(1X,'# Numbers of bins: NBX =',I4,', NBY =',I4,
1 ', NBZ =',I4,'/1X,'#')
WRITE(9,9425)
9425 FORMAT(/1X,'# columns 1 to 3: bin indices IX, IY and IZ',
1 /1X,'# 4th column: dose (eV/g).',
1 /1X,'# 5th column: statistical uncertainty (3 sigma).!./)
DO I1=1,NDB(1)
DO I2=1,NDB(2)
DO I3=1,NDB(3)
YAV=DOSE(I1,I2,I3)
YAV2=DOSE2(I1,I2,I3)
YERR=3.0D0*SQRT(ABS(YAV2-YAV**2*DF))
YAV=YAV*DF/VOXEL
YERR=YERR*DF/VOXEL
WRITE(9,9426) I1,I2,I3,MAX(YAV,1.0D-35),MAX(YERR,1.0D-35)
ENDDO
ENDDO
ENDDO
9426 FORMAT(1X,3I4,1P,E13.5,E9.1)
CLOSE(9)

```

Αυτό που διαπιστώθηκε από τη μελέτη του κώδικα είναι ότι ο υπολογισμός της απορροφούμενης δόσης, γίνεται ανά εκπεμπόμενο από την πηγή φωτόνιο. Στο αρχείο pm_3d_dose.dat γράφεται, όπως φαίνεται και παραπάνω, η μεταβλητή **YAV**, η οποία δηλώνεται

εκεί ως απορροφούμενη δόση. Πρόκειται, όμως για την απορροφούμενη δόση ανά φωτόνιο. Συνεπώς, προκειμένου να υπολογισθεί για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα αποτελέσματα των θεωρητικών υπολογισμών, θα πρέπει τα τελευταία να διαιρεθούν με το πλήθος των φωτονίων (ιστοριών). Τα συγκριτικά αποτελέσματα, υπό το πρίσμα των νέων αποτελεσμάτων του κώδικα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-11.

Ανιχνευτής δόσης (1) (eV/g)	Μέθοδος με χρήση του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας (2) (eV/g)	Βιβλιογραφικά (3) (eV/g)	Απόκλιση % (1) – (2)	Απόκλιση % (1) – (3)	Απόκλιση % (2) – (3)
0.00105047± 1.5E-04	0.00104044± 1.5E-04	0.001094521	0.954748026	4.941012999	4.0247

Πίνακας 3-11 Διορθωμένα συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού δόσης ανά φωτόνιο και με τις τρεις μεθόδους και (%) αποκλίσεις τους.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3-11 προκύπτει πολύ καλή σύμπτωση των αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων με την απόκλιση να μειώνεται από το 100 % στο 4-5 %. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι, στα πλαίσια παλαιότερων ΔΕ [Διαμαντούρος Σ., 2004], [Αθανασίου Ν., 2007], όπου είχαν γίνει υπολογισμοί του συντελεστή επαύξησης B_x με την μέθοδο της προσομοίωσης M-C, είχε διαπιστωθεί παρόμοια απόκλιση των αποτελεσμάτων.

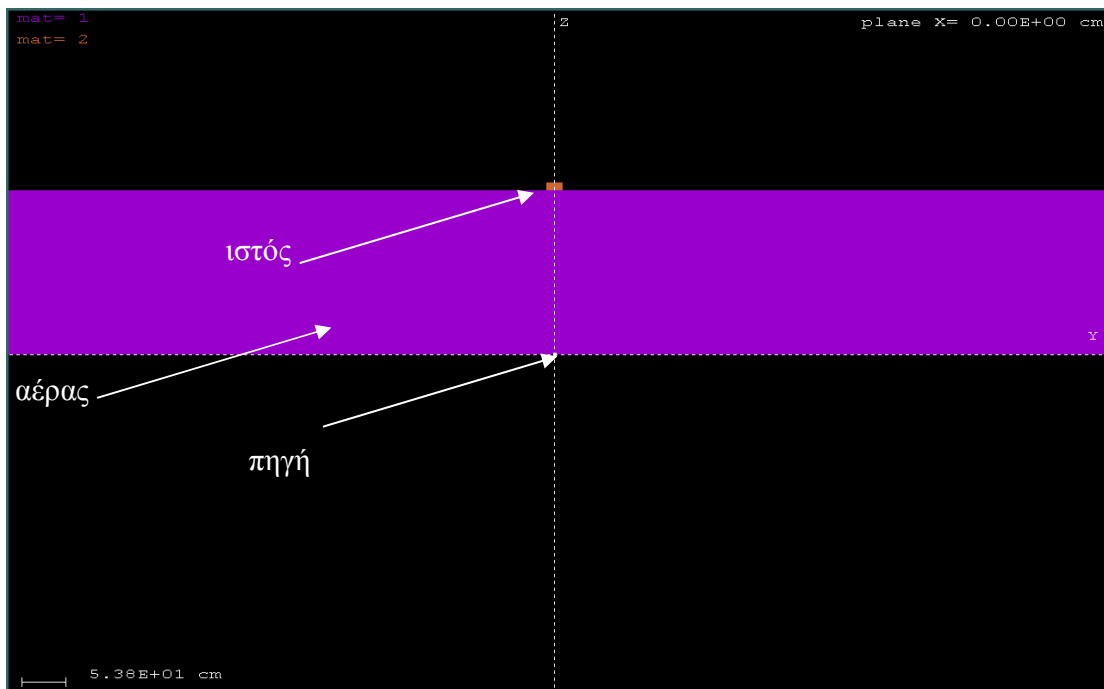
Κατόπιν τούτου θεωρείται ότι έχει πλήρως αποκωδικοποιηθεί η διαδικασία υπολογισμού της δόσης, με χρήση του κώδικα penmain, και τα αποτελέσματα που δίνει μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα και ικανοποιητικής ακρίβειας, αφού ουσιαστικά ταυτίζονται τόσο με αυτά που δίνουν σχέσεις της βιβλιογραφίας (σχέση 3.6) όσο και με αυτά που προκύπτουν μέσω της προσομοίωσης, αν χρησιμοποιηθεί ο θεμελιώδης ορισμός της απορροφούμενης δόσης, ως η ενέργεια που αποτίθεται σε ένα σώμα από την ακτινοβολία ανά μονάδα μάζας του σώματος.

3.4 Υπολογισμός κατανομής δόσης

Μία μεγάλη ευκολία που δίνει ο κώδικας PENELOPE είναι η δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίσει εύκολα την κατανομή της δόσης μέσα σε ένα σώμα. Αυτό γίνεται χωρίς να χρειαστεί κάτι περισσότερο από την εισαγωγή στο αρχείο εισόδου δεδομένων του προβλήματος του αριθμού των πλεγματικών γραμμών στις οποίες θα χωριστεί το σώμα. Στην πραγματικότητα, ο

όγκος του σώματος χωρίζεται σε μικρότερους στοιχειώδεις όγκους, αφού και οι τρεις διαστάσεις του χωρίζονται με πλεγματικές γραμμές.

Για να γίνει κατανοητή η χρήση του ανιχνευτή απορροφούμενης δόσης για τον υπολογισμό της κατανομής της δόσης παρατίθεται ένα παράδειγμα μιας απλοϊκής περίπτωσης υπολογισμού κατανομής δόσης, όπου το σώμα που θα δεχτεί την ακτινοβολία είναι ανθρώπινος ιστός κυλινδρικού σχήματος, με διαστάσεις: ακτίνα $R = 25\text{cm}$ και ύψος $h = 25\text{ cm}$. Ο ιστός ακτινοβολείται από ισότροπη και σημειακή πηγή που εκπέμπει μονοενεργειακά φωτόνια ενέργειας 200 keV . Η γεωμετρία του προβλήματος φαίνεται στην εικόνα 3.3 στο οποίο η πηγή βρίσκεται στο σημείο τομής των αξόνων Y και Z , ο αέρας παριστάνεται με το μώβ χρώμα και ο ιστός με το πορτοκαλί. Ανάμεσα στο σώμα και την πηγή υπάρχει αέρας ενώ το ανιχνευτής δόσης ο οποίος είναι ορισμένος στο αρχείο εισόδου δεδομένων, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.1.2γ, περικλείει τον ιστό και οι διαστάσεις του έχουν χωριστεί σε 100 πλεγματικές γραμμές στον άξονα x , 100 γραμμές στον άξονα y και 100 γραμμές στον άξονα z . Ο όγκος του σώματος χωρίζεται λοιπόν σε $99 \times 99 \times 99$ υποόγκους, μέσα στους οποίους υπολογίζεται η δόση. Στην συνέχεια, αν το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της συνολικής δόσης που απορροφήθηκε από το σώμα, αρκεί απλά να αθροισθούν οι επιμέρους δόσεις.



Εικ. 3.3 Γεωμετρία προβλήματος προσδιορισμού της κατανομής της δόσης σε ανθρώπινο ιστό κυλινδρικού σχήματος

Ο ορισμός του ανιχνευτή δόσης γίνεται όπως και στην περίπτωση σημειακού υπολογισμού της δόσης (παράγραφος §3.4.1). Ορίζονται οι κορυφές του ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου στους τρεις άξονες και στη συνέχεια επιλέγεται ένα πλέγμα διαστάσεων στη συγκεκριμένη περίπτωση 100 x 100 x 100. Με αυτό τον τρόπο γίνεται από το χρήστη η επιλογή υπολογισμού κατανομής της δόσης σε ένα σώμα.

Στο τέλος του κεφαλαίου, στους Πίνακες 3-12 και 3-13 παρατίθενται τα αρχεία περιγραφής της γεωμετρίας του προβλήματος, `enddetector4.geo`, και το αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης `depen4.in`.

Η προσομοίωση έγινε με εκτέλεση της εντολής:

```
>penmain.exe<depen4.in
```

Η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν $2.999536E+04$ sec και προσομοιώθηκαν συνολικά $4.780000E+04$ ιστορίες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 3.2.1.3γ τα αποτελέσματα γράφονται σε αρχεία με το όνομα `pm_2d_dose_#.dat`, με το # να αντιστοιχεί στον αριθμό των πλεγματικών γραμμών που χωρίζεται ο άξονας z. Στο υπόψη παράδειγμά επομένως, αναμένεται να δημιουργηθούν 100 τέτοια αρχεία. Τα αποτελέσματα γράφονται επίσης σε ένα συγκεντρωτικό αρχείο με το όνομα `pm_3d_dose.dat` μέσα στο οποίο υπάρχει η τιμή της δόσης σε όλους του κόμβους που προκύπτουν από τις τομές των πλεγματικών γραμμών μέσα στο σώμα. Με το πρόγραμμα απεικόνισης `wgnuplot` είναι δυνατή η απεικόνιση της κατανομής αυτής, τόσο σε δύο όσο και σε τρεις διαστάσεις. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται αυτή η κατανομή στα πρώτα πέντε επίπεδα του z-άξονα σε δύο διαστάσεις και στα επόμενα πέντε σε τρεις διαστάσεις.

Στα διαγράμματα 3-8 – 3-9 που παραθέτονται στο τέλος του Κεφαλαίου, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε 2 και 3 διαστάσεις, με τη χρήση του προγράμματος απεικόνισης `wgnuplot`. Η απεικόνιση τόσο σε 2 όσο και σε 3 διαστάσεις γίνεται για ένα επίπεδο Z, ενώ στο χρήστη δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης όλων των επιπέδων Z, και των 100 στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Πίνακας 3-2 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης depen.in

```
TITLE Energy deposition detector+dose enclosure.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Pr.particles: 1=electron,2=photon,3=positron]
SENERG 200e3 [Initial energy]
SPOSIT 0.0 0.0 0.0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0.0 0.0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 0.0 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 2 [Number of different materials, .le.10]
SIMPARG 1 0.2e4 0.2e3 0.2e4 0.1 0.1 0.2e4 0.2e3
SIMPARG 2 0.2e4 0.2e3 0.2e4 0.1 0.1 0.2e4 0.2e3

PFNAME airtissue.mat [Material definition file]
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN enddetector.geo [Geometry definition file]

>>>>>>> Emerging particles.
NBE 100 210e3 50 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH 90 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 3 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1.5e2 200e3 500 [Energy window and num. of bins]
EDSPC pm_sps_enddet_1.dat
EDBODY 2 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -0.005 0.005
GRIDY -0.005 0.005
GRIDZ 200 200.001
GRIDBN 1 1 1

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]
TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]
```

Πίνακας 3-3 Αρχείο γεωμετρίας endetector2.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
ENERGY DEPOSITION DETECTOR + DOSE ENCLOSURE
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) Cylinder R=0.0050
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 0.5000000000000000E-02, 0)
Y-SCALE=( 0.5000000000000000E-02, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) Plane Z=200
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 2.0000000000000000E+02, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) Plane Z=200.001
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 2.0000100000000000E+02, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) Plane Z=0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) Plane X=0.005
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AX=( 1.0000000000000000E-00, 0)
    AO=(-0.0050000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) Plane X=-0.005
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AX=( 1.0000000000000000E-00, 0)
    AO=( 0.0050000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) Plane Y=-0.005
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AY=( 1.0000000000000000E-00, 0)
    AO=( 0.0050000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) Plane Y=0.005
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AY=( 1.0000000000000000E-00, 0)
    AO=(-0.0050000000000000E-00, 0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 1) space
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
```


Πίνακας 3-4 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης depen2.in

```
TITLE Energy deposition detector+dose enclosure.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Pr.particles: 1=electron,2=photon,3=positron]
SENERG 200e3 [Initial energy]
SPOSIT 0.0 0.0 0.0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0.0 0.0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 0.0 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 2 [Number of different materials, .le.10]
SIMPARG 1 0.2e4 0.2e3 0.2e4 0.1 0.1 0.2e4 0.2e3
SIMPARG 2 0.2e4 0.2e3 0.2e4 0.1 0.1 0.2e4 0.2e3

PFNAME airtissue.mat [Material definition file]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN endetector2.geo [Geometry definition file]

>>>>>>> Emerging particles
NBE 100 210e3 50 [E-interval and no. of en. bins]
NBTH 90 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 3 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1.5e2 200e3 500 [En. window and num. of channels]
EDSPC pm_sps_enddet_1.dat
EDBODY 2 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -0.005 0.005
GRIDY -0.005 0.005
GRIDZ 200 200.001
GRIDBN 1 1 1

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]

TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]
```

Πίνακας 3-5 Αρχείο γεωμετρίας endetector3.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
ENERGY DEPOSITION DETECTOR + DOSE ENCLOSURE
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) Cylinder R=0.0050
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 0.5000000000000000E-02, 0)
Y-SCALE=( 0.5000000000000000E-02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) Plane Z=200
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 2.0000000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) Plane Z=200.001
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 2.0000100000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) Plane Z=0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) Plane X=0.005
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AX=( 1.0000000000000000E-00, 0)
AO=(-0.0050000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) Plane X=-0.005
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AX=( 1.0000000000000000E-00, 0)
AO=( 0.0050000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) Plane Y=-0.005
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AY=( 1.0000000000000000E-00, 0)
AO=( 0.0050000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) Plane Y=0.005
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AY=( 1.0000000000000000E-00, 0)
AO=(-0.0050000000000000E-00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 1) space
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
```

(...συνέχεια Πίνακα 3-5)

```
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY    (    2)  detector
MATERIAL(    2)
SURFACE (    5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (    6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (    7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (    8), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE (    2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE (    3), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END      00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Πίνακας 3-6 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης depen3.in

```
TITLE Energy deposition detector + dose enclosure.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Pr.particles: 1=electron,2=photon,3=positron]
SENERG 200e3 [Initial energy]
SPOSIT 0.0 0.0 0.0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0.0 0.0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 0.0 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 2 [Number of different materials, .le.10]
SIMPARG 1 0.2e4 0.2e3 0.2e4 0.1 0.1 0.2e4 0.2e3
SIMPARG 2 0.2e4 0.2e3 0.2e4 0.1 0.1 0.2e4 0.2e3

PFNAME airtissue.mat [Material definition file]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN endetector3.geo [Geometry definition file]

>>>>>>> Emerging particles.
NBE 100 210e3 50 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH 90 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 3 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1.5e2 200e3 80 [Energy window and num. of bins]
EDSPC pm_spc_enddet_2.dat
EDBODY 2 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -0.005 0.005
GRIDY -0.005 0.005
GRIDZ 200 200.001
GRIDBN 1 1 1

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]

TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]
```


Πίνακας 3-8 Αρχείο γεωμετρίας wall.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
LEAD WALL + DOSE ENCLOSURE
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) Cylinder R=5cm
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 0.5000000000000000E+01, 0)
Y-SCALE=( 0.5000000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) Plane Z=182.43cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 1.8243000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) Plane Z=212.43cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 2.1243000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) Plane Z=0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) Plane Z=180
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 1.8000000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) Plane Y=50
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.0000000000000000E+00, 0)
      AO=(-5.0000000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) Plane Y=-50
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.0000000000000000E+00, 0)
      AO=(+5.0000000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) Plane X=50
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.0000000000000000E+00, 0)
      AO=(-5.0000000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) Plane X=-50
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.0000000000000000E+00, 0)
      AO=(+5.0000000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```


(...συνέχεια Πίνακα 3-8)

```
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 4) air
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Πίνακας 3-9 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης wallin.in

```
TITLE  Lead wall + dose enclosure.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2 [Pr.particles:1=electron,2=photon, 3=positron]
SENERG 500e3 [Initial energy (monoenergetic sources)]
SPOSIT 0,0,0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0,0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 90 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT  3 [Number of different materials, .le.10]
SIMPAR 1,0.5e4,0.5e3,0.5e4,0.1,0.1,0.5e4,0.5e3
SIMPAR 2,0.5e4,0.5e3,0.5e4,0.1,0.1,0.5e4,0.5e3
SIMPAR 3,0.5e4,0.5e3,0.5e4,0.1,0.1,0.5e4,0.5e3

PFNAME wall.mat [Material definition file]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN wall.geo [Geometry definition file]

>>>>>>> Emerging particles.
NBE  100,510e3,50 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH  90 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH  3 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1.5e2,510e3,150 [E-window and num. of channels]
EDSPC  pm_spc_enddet_1.dat
EDBODY 3 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX  -5,5
GRIDY  -5,5
GRIDZ  212.43,217.43
GRIDBN 1,1,1

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file]
DUMPP  60 [Dumping period, in sec]

TIME  2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]
```

Πίνακας 3-12 Αρχείο γεωμετρίας enddetector4.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
ENERGY DEPOSITION DECTOR + DOSE ENCLOSURE+DOSE DISTRIBUTION
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) Cylinder R=25cm
INDICES=( 1, 1, 0, 0,-1)
X-SCALE=( 2.500000000000000E+01, 0)
Y-SCALE=( 2.500000000000000E+01, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) Plane Z=200cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 2.000000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) Plane Z=225cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SCALE=( 2.250000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) Plane Z=0
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 1) space
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 2) detector
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Πίνακας 3-13 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης depen4.in

```
TITLE  dose enclosure + dose distribution.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR  2  [Pr.particles:1=electron,2=photon,3=positron]
SENERG 200e3 [Initial energy]
SPOSIT 0.0 0.0 0.0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0.0 0.0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 1.5 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT  2 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAN 1 0.2e4 0.2e3 0.2e4 0.1 0.1 0.2e4 0.2e3
SIMPAN 2 0.2e4 0.2e3 0.2e4 0.1 0.1 0.2e4 0.2e3

PFNAME airtissue.mat [Material definition file]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN endetector4geo [Geometry definition file]

>>>>>>> Emerging particles.
NBE  100 210e3 50 [E-interval and no. of energy bins]
NBTH  90 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH  3 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

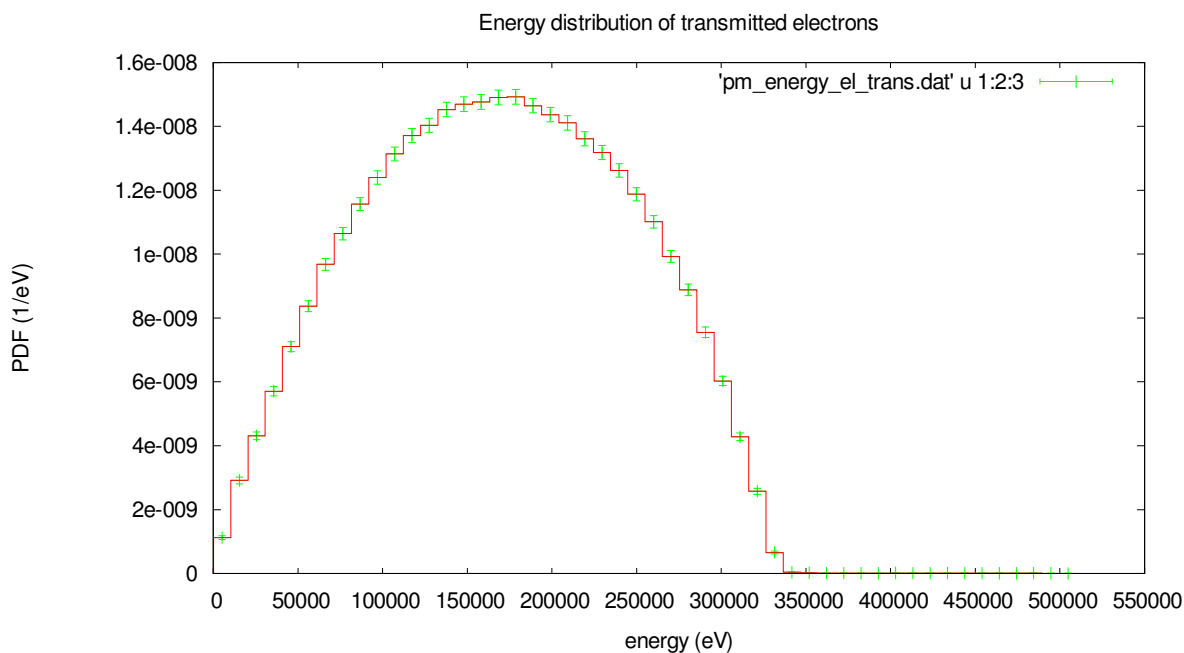
>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1.5e2 200e3 100 [E-window and num. of channels]
EDSPC  pm_sps_enddet_1.dat
EDBODY 2 [Active body; one line for each body]

>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX  -25 25
GRIDY  -25 25
GRIDZ  200 225
GRIDBN 100 100 100

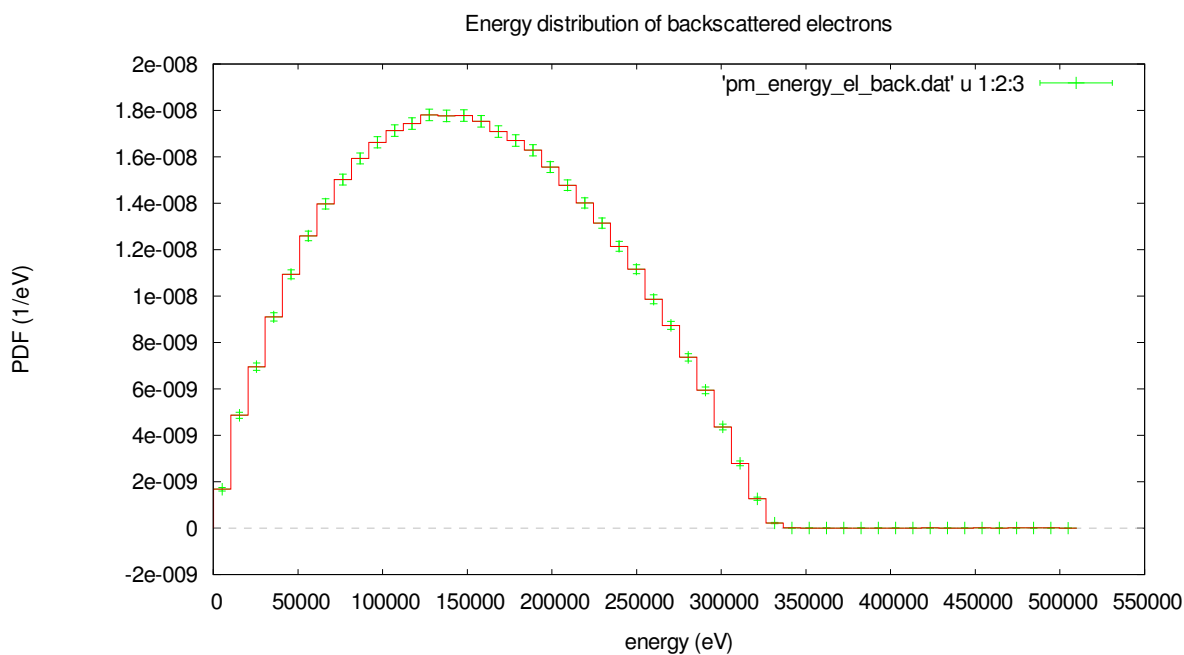
>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  60 [Dumping period, in sec]

TIME  2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]
```

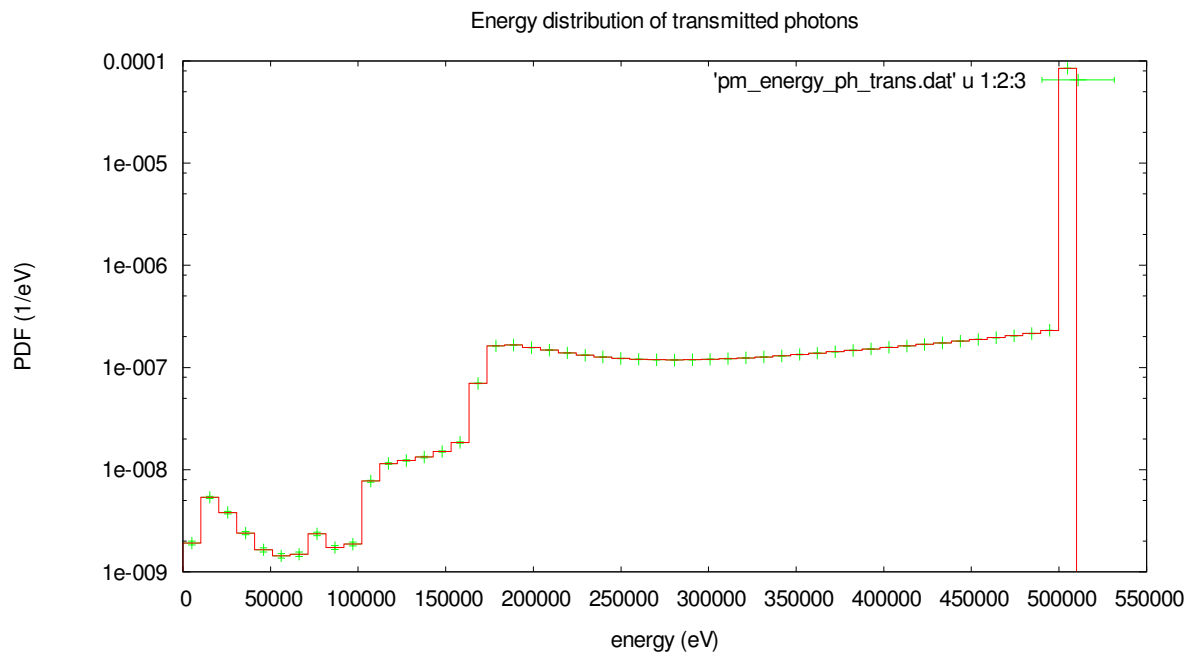
Διαγράμματα Κεφαλαίου 3



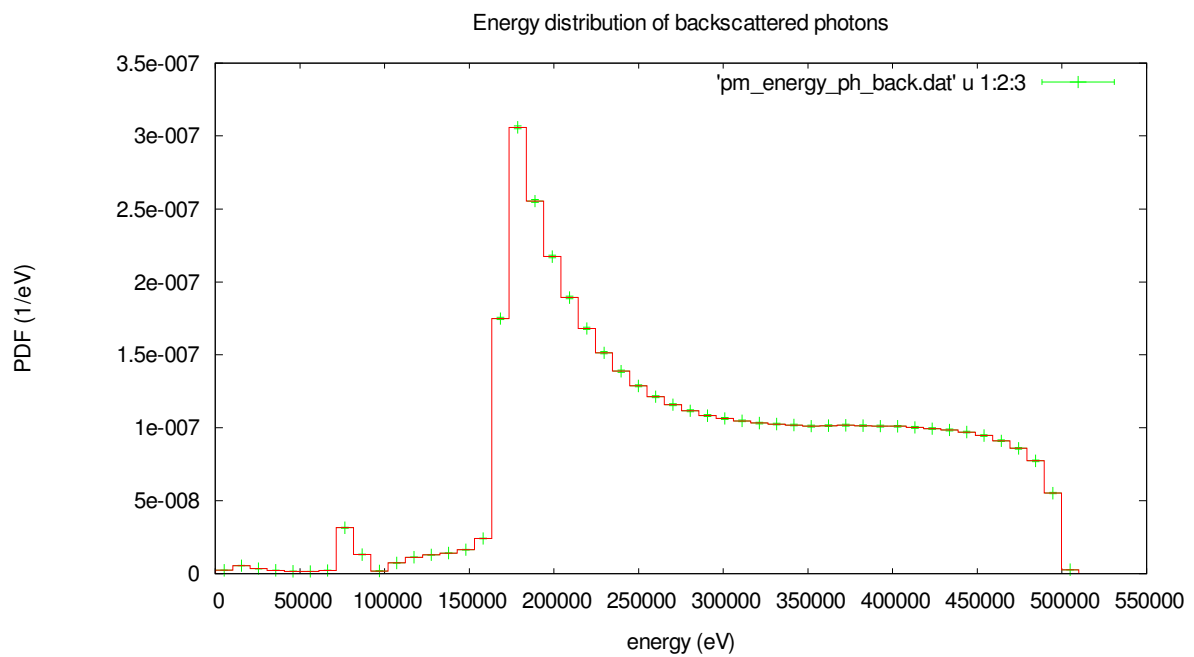
Διάγραμμα 3-3 Ενεργειακή κατανομή των ηλεκτρονίων που εξέρχονται από την πλάκα.



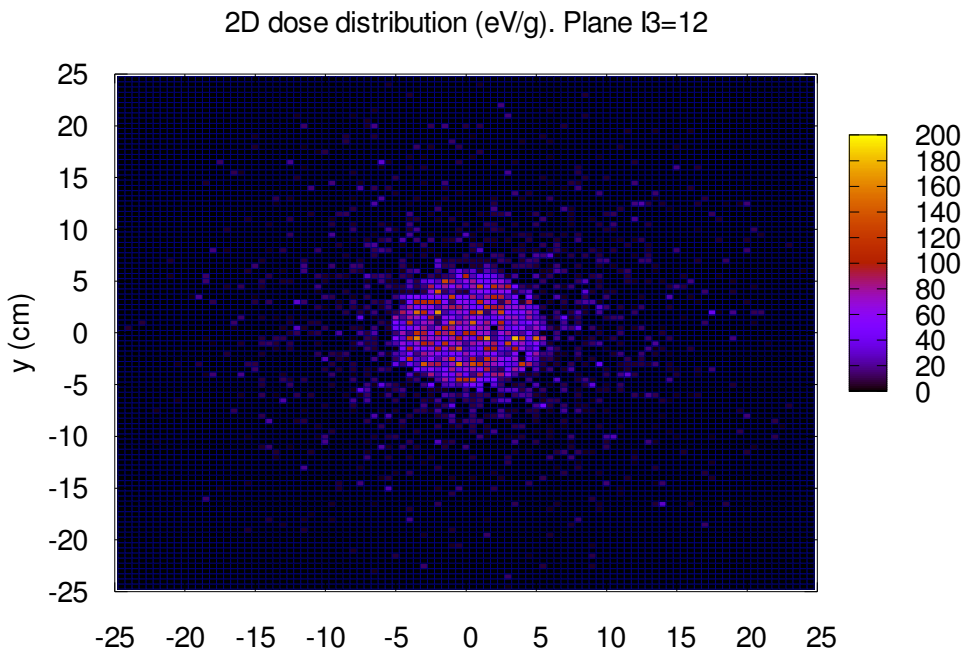
Διάγραμμα 3-4 Ενεργειακή κατανομή οπισθοσκεδαζόμενων από την πλάκα ηλεκτρονίων.



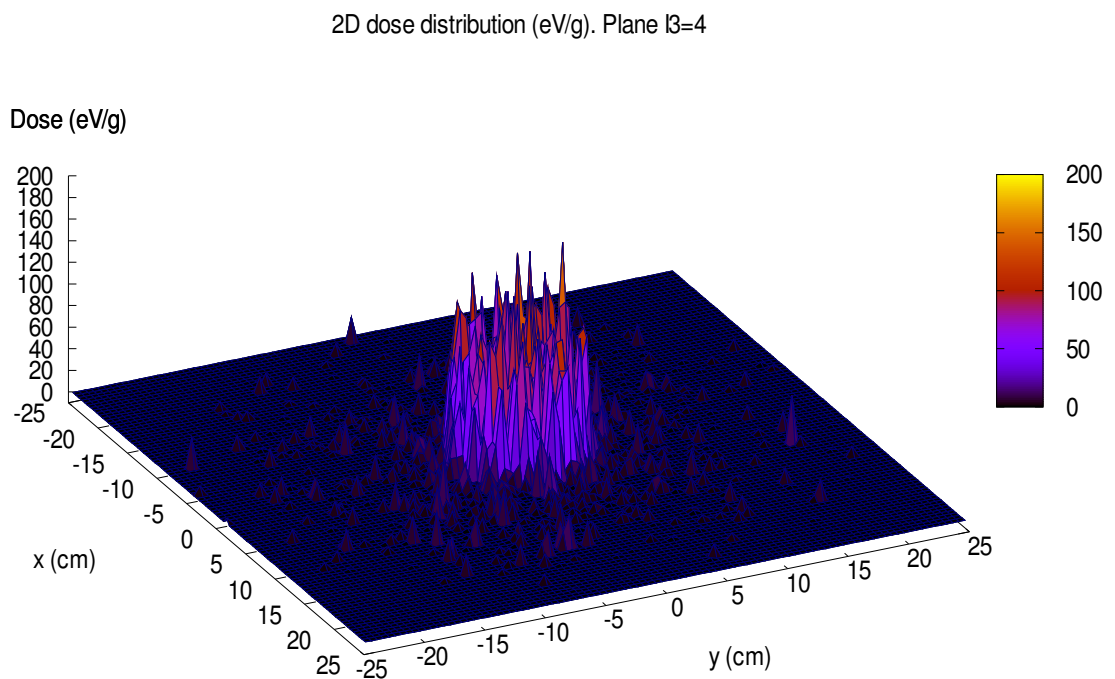
Διάγραμμα 3-5 Ενεργειακή κατανομή φωτονίων που εξέρχονται από την πλάκα



Διάγραμμα 3-6 Ενεργειακή κατανομή οπισθοσκεδαζόμενων φωτονίων



Διάγραμμα 3-8 Διάγραμμα κατανομής δόσης σε 2 διαστάσεις στο επίπεδο I=12



Διάγραμμα 3-9 Διάγραμμα κατανομής δόσης σε 2 διαστάσεις στο επίπεδο I=4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗΣ ΔΟΣΗΣ

4.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η προσπάθεια που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ για την αντιμετώπιση μιας ρεαλιστικής περίπτωσης υπολογισμού θωράκισης δωματίου μέσα στο οποίο λειτουργεί μια μηχανή ακτίνων-Χ. Επισημαίνεται ότι ο στόχος της ΔΕ δεν είναι ο καθεαυτού υπολογισμός της θωράκισης αλλά η κατάστρωση μιας μεθοδολογίας, ικανής να αποτελέσει οδηγό σε μελλοντικές εφαρμογές. Το δωμάτιο που μελετήθηκε έχει τυπικές διαστάσεις και η μηχανή εκπέμπει και αυτή ένα τυπικό φάσμα ακτίνων-Χ. Το φάσμα της λυχνίας προέκυψε με τη βοήθεια ελεύθερου λογισμικού που βρέθηκε στο διαδίκτυο και ανήκει στην εταιρία Siemens.

Κριτήριο για τον υπολογισμό μίας θωράκισης είναι ο περιορισμός της δόσης στους ιστούς του ανθρώπου. Στα πλαίσια της ΔΕ, η δόση στον ιστό προκύπτει από την απορρόφηση από αυτόν των ακτινοβολιών οι οποίες προέρχονται άμεσα ή έμμεσα από τη μηχανή των ακτίνων-Χ. Συγκεκριμένα, πρόκειται για την ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη μηχανή ως πρωτεύουσα δέσμη, την ακτινοβολία που προκύπτει από την πρωτεύουσα ή οποία σκεδάζεται πάνω στους τοίχους ή σε οποιονδήποτε άλλο σκεδαστή υπάρχει μέσα στο δωμάτιο, και την ακτινοβολία διαρροής, η οποία είναι οποιαδήποτε άλλη ακτινοβολία της μηχανής που δεν ανήκει στην πρωτεύουσα δέσμη. Αρχικά εξετάζεται η δόση που προκύπτει ως αποτέλεσμα της πρωτεύουσας δέσμης και της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, που είναι και οι σημαντικότερες συνιστώσες. Για την ακτινοβολία διαρροής χρειάστηκε να αναπτυχθεί ιδιαίτερη μεθοδολογία.

Ο υπολογισμός της δόσης λόγω της πρωτεύουσας και της σκεδαζόμενης γίνεται για δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη υπάρχει μέσα στο δωμάτιο ένας σκεδαστής της πρωτεύουσας δέσμης, ο οποίος για απλότητα επιλέγεται να αποτελείται από νερό και να έχει τις διαστάσεις παραπλήσιες ενός μέσου ανθρώπου. Πρόκειται για τον άνθρωπο που υπόκειται στην ακτινολογική εξέταση. Στην δεύτερη περίπτωση, μέσα στο δωμάτιο δεν υπάρχει σκεδαστής (ασθενής). Η μηχανή λειτουργεί κανονικά υπό τις ίδιες συνθήκες, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, και η σκεδαζόμενη ακτινοβολία προκύπτει από τη σκέδαση της πρωτεύουσας

δέσμη πάνω στους τοίχους του δωματίου. Και στις δύο περιπτώσεις, πέραν του υπολογισμού της δόσης που γίνεται, χρησιμοποιείται και ο ανιχνευτής αλληλεπιδράσεων (impact detector) (βλ §3.2.1.2.α), για να έχουμε μια εκτίμηση της μεταβολής του φάσματος της ακτινοβολίας της πηγής, καθώς αυτό αλληλεπιδρά με τα διάφορα αντικείμενα, τοίχους ή σκεδαστές, μέσα στο δωμάτιο.

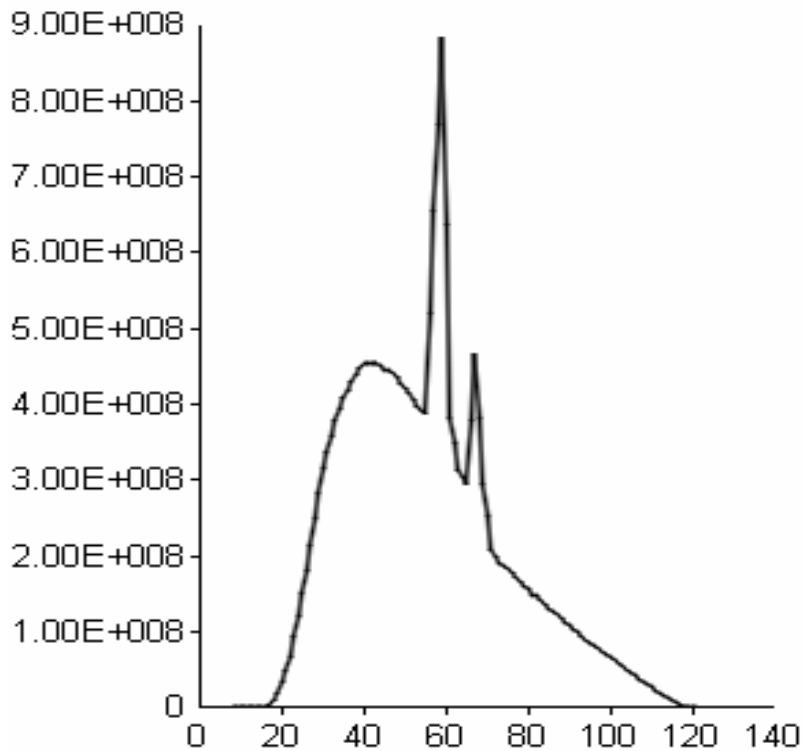
Όσον αφορά τη διαρρέουσα ακτινοβολία, αυτή εξετάζεται ξεχωριστά λόγω της ιδιαιτερότητας την οποία παρουσιάζει. Η τεχνική αυτή αναπτύσσεται λεπτομερώς και στηρίζεται πάνω στην χρήση της έννοιας του ισοδύναμου πάχους σιδήρου. Το πάχος αυτό του σιδήρου προκαλεί την ίδια εξασθένηση στην ακτινοβολία με την εξασθένηση που προκαλεί ένα συγκεκριμένο πάχος μολύβδου. Η διαφορά όμως όταν χρησιμοποιείται σίδηρος ή μόλυβδος είναι στο φάσμα της ακτινοβολίας που διέρχεται μέσα από το κάθε είδους υλικό.

4.2 Περιγραφή του προβλήματος

Αρχικά περιγράφεται η γεωμετρία του δωματίου. Το δωμάτιο έχει διαστάσεις 500 x 320 x 300 cm με τοίχους από σκυρόδεμα πάχους 10 cm. Αποτελείται από 4 τοίχους, το δάπεδο θεωρείται ότι είναι κατασκευασμένο από σκυρόδεμα πάχους 50 cm και οροφή επίσης από σκυρόδεμα πάχους 10 cm. Το πάχος 50cm του δαπέδου προσομοιώνει και την ύπαρξη εδάφους κάτω από αυτό. Η μηχανή των ακτίνων-X είναι τοποθετημένη στο κέντρο ακριβώς του δωματίου, για διευκόλυνση των υπολογισμών, και αποτελείται από λυχνία με άνοδο Βολφραμίου (W) που λειτουργεί στα 120 kVp, με παράθυρο αλουμινίου πάχους 2 mm.

Το φάσμα της μηχανής προέκυψε με χρήση λογισμικού προσομοίωσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα από κάποιον που έχει πρόσβαση στο site της Siemens [<http://www.healthcare.siemens.com/med/rv/spektrum/default.asp>]. Το λογισμικό είναι απλό στη χρήση και στο περιβάλλον εργασίας ο χρήστης ορίζει το υλικό της ανόδου, τα kVp που θα χρησιμοποιηθούν, μια παράμετρο που έχει να κάνει με το είδος της λυχνίας, τριφασική ή μονοφασική, και το επιθυμητό Air Kerma στην έξοδο αυτής. Υπάρχει ακόμα η επιλογή για τη χρησιμοποίηση ή όχι φίλτρου (ή φίλτρων) και ο ορισμός του πάχους του. Για την παρούσα Εργασία επελέγη το φάσμα μίας τριφασικής λυχνίας, ανόδου Βολφραμίου, που λειτουργεί στα 120 kVp, με παράθυρο αλουμινίου πάχους 2 mm, που προκαλεί Air Kerma 1 Gy στην έξοδό της.

Το φάσμα που προκύπτει έχει τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα 4.1, ενώ δίνεται και σε μορφή ASCII.



Εικ. 4.1 Φάσμα λυχνίας Βολφραμίου, 120 kVp, με παράθυρο Αλουμινίου 2 mm

Στην ASCII μορφή του το αρχείο δίνει τον αριθμό των φωτονίων που αντιστοιχούν σε κάθε ενέργεια, προκειμένου το φάσμα στο σύνολό του να προκαλεί τη δόση του 1 Gy σε απόσταση 1 m από τη μηχανή. Στην σχήμα (4.1) παρατίθεται τμήμα του αρχείου ASCII του φάσματος. Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί στις ενέργειες του φάσματος σε keV και η δεύτερη στον αριθμό των φωτονίων που έχουν αυτήν την ενέργεια.

8	0
9	0.000254582
10	0.276434
11	20.0645
12	561.329
	.
50	4.21959e+008
51	4.14121e+008
52	4.0626e+008
53	3.98048e+008
54	3.92786e+008
	.
	.
119	736959
120	142517

Σχήμα 4.1 Δομή του αρχείου τύπου ASCII που δίνει το φάσμα της μηχανής των ακτίνων-X

Το σώμα στο οποίο θα υπολογιστεί η δόση είναι ανθρώπινος ιστός κυλινδρικού σχήματος και διαστάσεων $R = 20 \text{ cm}$ και $h = 20 \text{ cm}$. Ο ιστός θα τοποθετηθεί σε απόσταση 1 m πίσω από τον τοίχο που ελέγχεται κάθε φορά (primary barrier ή secondary barrier) αφού αυτή είναι η απόσταση στην οποία πρέπει η δόση να πληροί τους Διεθνείς Κανονισμούς [NCRP REPORT No 147]. Η δόση αυτή θα υπολογιστεί για δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη, η σκεδαζόμενη ακτινοβολία θα προκύψει από τη σκέδαση της πρωτεύουσας δέσμης των ακτίνων-X που εκπέμπει η λυχνία σε ένα ομοίωμα ανθρώπου (phantom), ενώ στη δεύτερη θα προέρχεται από ακτινοβολία πρωτογενή και σκεδαζόμενη πάνω στους τοίχους του δωματίου.

Μετά από τον καθορισμό της γεωμετρίας του δωματίου - πηγής - θέσης υπολογισμού της δόσης, και αφού είναι πλέον δεδομένο το φάσμα της λυχνίας των ακτίνων-X, το επόμενο βήμα είναι η κατασκευή των αρχείων δεδομένων του προβλήματος. Συγκεκριμένα, χρειάζεται η κατασκευή των παρακάτω αρχείων δεδομένων:

- αρχείο γεωμετρίας του προβλήματος, τύπου .geo, στο οποίο περιγράφεται πλήρως η γεωμετρία του δωματίου - πηγής - θέσης υπολογισμού της δόσης,
- αρχείο εισόδου δεδομένων του προβλήματος, τύπου .in, στο οποίο περιγράφονται οι υπόλοιπες παράμετροι της προσομοίωσης,

- αρχείο δεδομένων των υλικών του προβλήματος, τύπου .mat, στο οποίο δίδονται όλα τα απαραίτητα για την προσομοίωση φυσικά δεδομένα των πάσης φύσεως υλικών που εμπλέκονται στο πρόβλημα.

Επισημαίνεται ότι αυτό θα πρέπει να γίνει ξεχωριστά για κάθε μία περίπτωση ακτινοβολήσης, με ή χωρίς σκεδαστή (phantom).

4.3 Δωμάτιο με σκεδαστή της πρωτεύουσας δέσμης

Στην πρώτη περίπτωση, μέσα στο δωμάτιο θα υπάρχει ένα απλοϊκό ομοίωμα ανθρώπου, που θα παίζει το ρόλο του σκεδαστή της ακτινοβολίας της πρωτεύουσας δέσμης. Η δόση που θα υπολογιστεί σε διάφορα σημεία εντός ή εκτός του χώρου θα προέρχεται από φωτόνια που φτάνουν στα σημεία αυτά παρθενικά αλλά και από φωτόνια που φτάνουν μετά από μια σειρά ελαστικών και ανελαστικών σκεδάσεων. Θα πρόκειται δηλαδή ακριβώς για τη συνολική δόση από την πρωτεύουσα και τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία που δέχεται ένας ιστός ενός ανθρώπου που βρίσκεται σε ένα διπλανό δωμάτιο, 1m από τον τοίχο, κατά την πραγματοποίηση μιας ακτινογραφίας. Θα χρησιμοποιηθούν συνολικά 5 ανιχνευτές αλληλεπίδρασης (βλ. §3.2.1.2.α).

4.3.1 Αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας

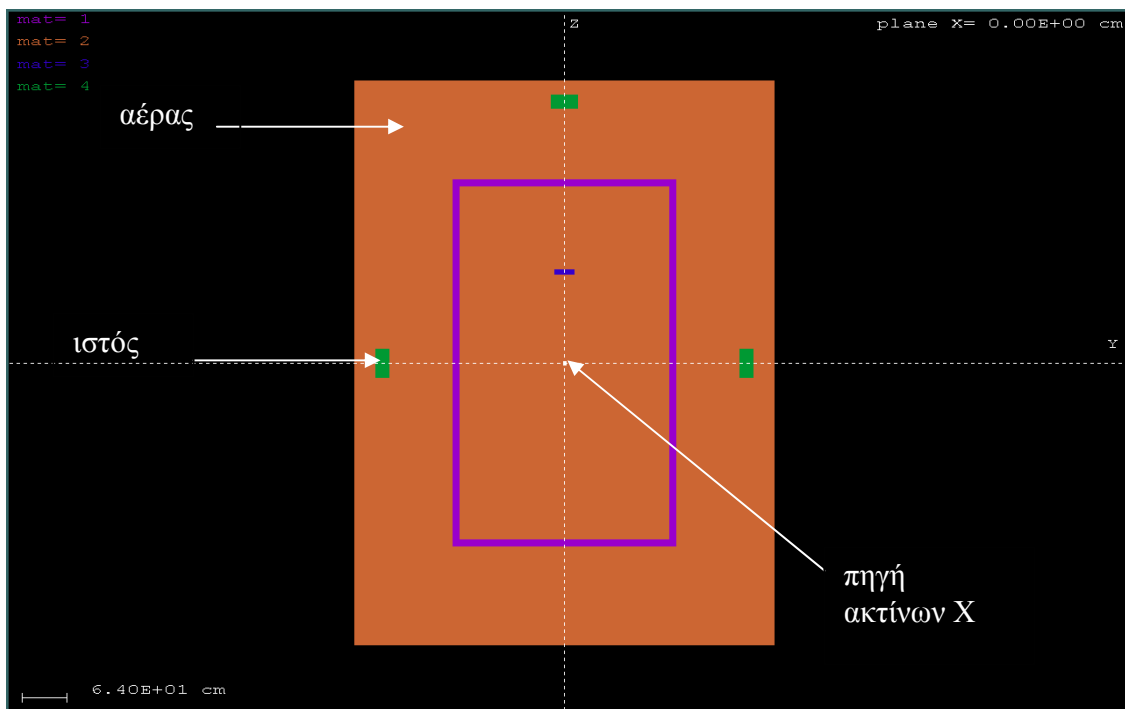
Το αρχείο εισόδου της γεωμετρίας του προβλήματος ονομάζεται **room.geo** και περιγράφει την γεωμετρία του δωματίου που εξετάζεται, το phantom, καθώς και τον ιστό στον οποίο πρόκειται να εκτιμηθεί η απορροφούμενη δόση, έξω από το δωμάτιο. Το αρχείο εισόδου της γεωμετρίας παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 4-1, στο τέλος του Κεφαλαίου.

Στην αρχή του αρχείου ορίζονται οι επιφάνειες από τις οποίες θα αποτελούνται τα σώματα που θα ορίζουν το δωμάτιο, το phantom και τον ανθρώπινο ιστό. Στη συνέχεια, ορίζονται τα σώματα, οι τοίχοι, το δάπεδο και η οροφή, το ανθρώπινο ομοίωμα και ο κυλινδρικού σχήματος ανθρώπινος ιστός. Τέλος, ορίζονται modules για να ``γεμίσει`` ο χώρος μεταξύ των παραπάνω σωμάτων με αέρα και να γίνει ακόμα πιο ρεαλιστική η προσομοίωση. Ανάλυση της δομής του αρχείου περιγραφής της γεωμετρίας, των εντολών ορισμού επιφανειών, σωμάτων και modules δίνεται σε άλλη Δ.Ε. [Αθανασίου, 2006].

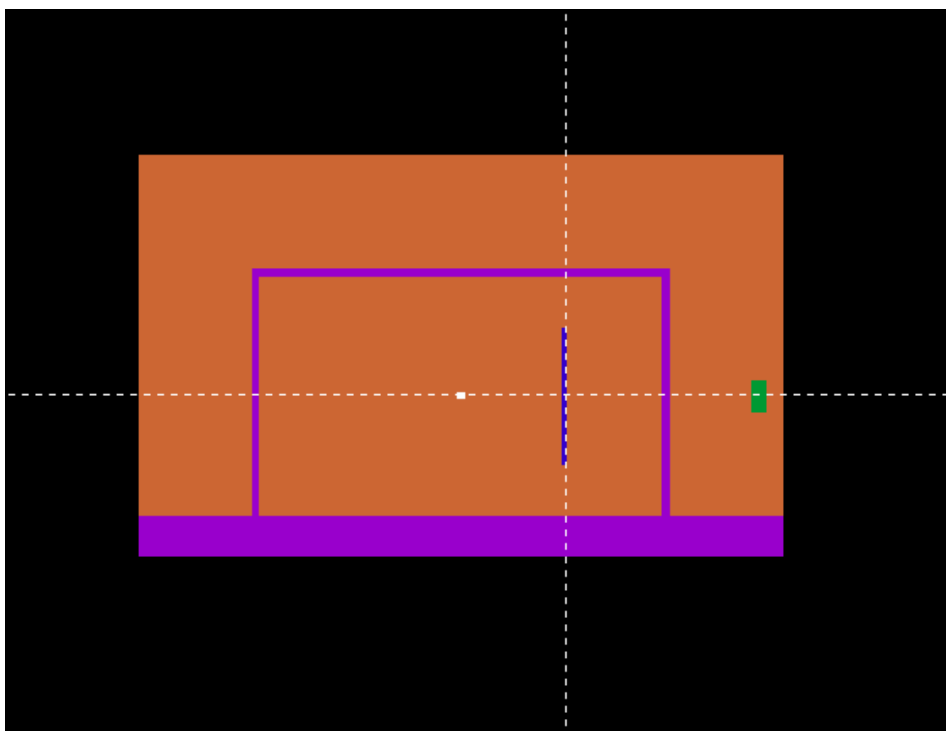
Ο σκεδαστής της πρωτεύουσας δέσμης είναι ένα απλοϊκό ομοίωμα ανθρωπίνου σώματος (phantom) φτιαγμένο από νερό. Οι διαστάσεις του είναι 172 x 6.75 x 30 cm και επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ανταποκρίνονται όσο είναι δυνατό στις διαστάσεις ενός τυπικού ανθρώπου.

Όπως φαίνεται και μέσα στο αρχείο εισόδου, για τους τοίχους έχει χρησιμοποιηθεί το σκυρόδεμα που αναφέρεται ως material 1, για το phantom έχει χρησιμοποιηθεί το νερό που αναφέρεται ως material 3, για το σώμα που ακτινοβολείται, έχει χρησιμοποιηθεί ο ανθρωπίνος ιστός, ως material 4, τέλος ως material 2 έχει χρησιμοποιηθεί ο ατμοσφαιρικός αέρας σε ΚΣ. Η γεωμετρία του δωματίου παρουσιάζεται στις εικόνες 4.2, 4.3 και 4.4 που ακολουθούν, σε διάφορες όψεις.

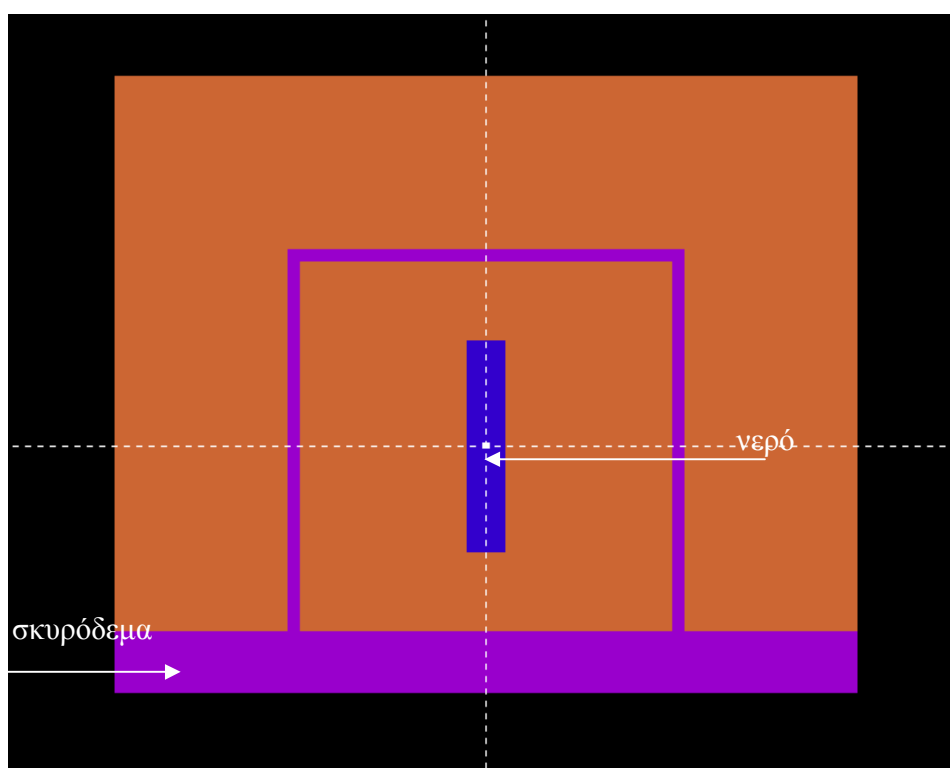
Η λυχνία των ακτίνων-X βρίσκεται στο κέντρο του δωματίου στην αρχή των αξόνων και η πρωτεύουσα δέσμη εκπέμπεται κατά τον θετικό ημιάξονα OZ, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Ο τοίχος που δέχεται την πρωτεύουσα ακτινοβολία θεωρείται ως primary barrier ενώ οι υπόλοιποι τοίχοι και η οροφή θεωρούνται ως secondary barriers (βλ §2.4).



Εικ. 4.2 Κάτοψη του ακτινολογικού δωματίου



Εικ. 4.3 Πλάγια όψη 1 του ακτινολογικού δωματίου



Εικ. 4.4 Πλάγια όψη 2 του ακτινολογικού δωματίου

4.3.2 Αρχείο εισόδου δεδομένων

Το αρχείο εισόδου δεδομένων του προβλήματος ονομάζεται roomin.in και παρουσιάζεται αναλυτικά στο Πίνακα 4-2 στο τέλος του Κεφαλαίου. Το αρχείο αυτό έχει διαφορές από τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν μέχρι τώρα στην παρούσα Δ.Ε.. Οι προσομοιώσεις που γίνονταν μέχρι αυτό το σημείο περιελάμβαναν ακτινοβολήση σωμάτων από μονοενεργειακά φωτόνια.

Στην περίπτωση χρήσης μηχανής ακτίνων-Χ η ενέργεια των φωτονίων που εκπέμπονται δεν είναι μια και μοναδική αλλά φάσμα ενεργειών, το φάσμα της λυχνίας (βλ. §2.2). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η λυχνία έχει άνοδο Βολφραμίου, λειτουργεί στα 120 kVp ενώ η δέσμη περνά μέσα από ένα παράθυρο Αλουμινίου πάχους 2 mm. Η δέσμη των ακτίνων είναι συμμετρική ως προς τον άξονα z και εκπέμπεται υπό ημιγωνία εκπομπής 7° , τυπική γωνία δέσμης για τις περισσότερες λυχνίες του εμπορίου. Η πηγή ακτινοβολίας βρίσκεται στο κέντρο του δωματίου στο σημείο (0,0,0). Το φάσμα της λυχνίας έχει, όπως προαναφέρθηκε, προκύψει από κατάλληλη προσομοίωση (βλ. §4.2).

Η διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις προσομοιώσεων είναι ότι για πρώτη φορά η πηγή ακτινοβολεί φάσμα ενεργειών και όχι φωτόνια μιας και συγκεκριμένης ενέργειας. Αυτό επιφέρει αλλαγές στη δομή του αρχείου εισόδου των δεδομένων τύπου .in, και πιο συγκεκριμένα στο κομμάτι περιγραφής της πηγής (βλ. §3.2.1.1). Αρχικά απουσιάζει η γραμμή που αναφέρεται στην αρχική ενέργεια των σωματιδίων και έχει τη μορφή:

SENERG SE0 [Initial energy (monoenergetic source only)]

Η γραμμή αυτή αφορά περιπτώσεις μονοενεργειακών πηγών σωματιδίων (ή φωτονίων) και ορίζει την αρχική τους ενέργεια. Στην περίπτωσή ενεργειακού φάσματος έχει αντικατασταθεί από ένα πλήθος γραμμών της μορφής:

SPECTR Ei Pi [E bin: lower-end and total probability]

Κάθε γραμμή που ξεκινάει με τους χαρακτήρες <<SPECTR>> αναφέρεται στην ελάχιστη τιμή της ενέργειας των σωματιδίων (E_i) της συγκεκριμένης στήλης του ιστογράμματος του φάσματος και την αντίστοιχη πιθανότητα (P_i) τα σωματίδια να έχουν ενέργεια στο ενεργειακό διάστημα μεταξύ $E_i - E_{i+1}$. Ο μέγιστος αριθμός στηλών του φάσματος είναι 200 και επομένως ο μέγιστος αριθμός γραμμών **SPECTR** είναι επίσης 200. Οι γραμμές μπορούν να είναι σε αυθαίρετη σειρά ενώ στην γραμμή που αντιστοιχεί στο ανώτερο όριο του φάσματος και περιέχει την υψηλότερη ενέργεια, η πιθανότητα πρέπει να τίθεται με αρνητικό πρόσημο. Στο αρχείο δεδομένων της υπόψη προσομοίωσης εισήχθησαν τα δεδομένα από το ASCII αρχείο φάσματος που παρήχθη

στην §4.2. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του αρχείου τύπου .in παραμένουν τα ίδια και αλλάζουν μόνο οι αριθμητικές τιμές που προσαρμόζονται στα δεδομένα της περίπτωσης που εξετάζεται.

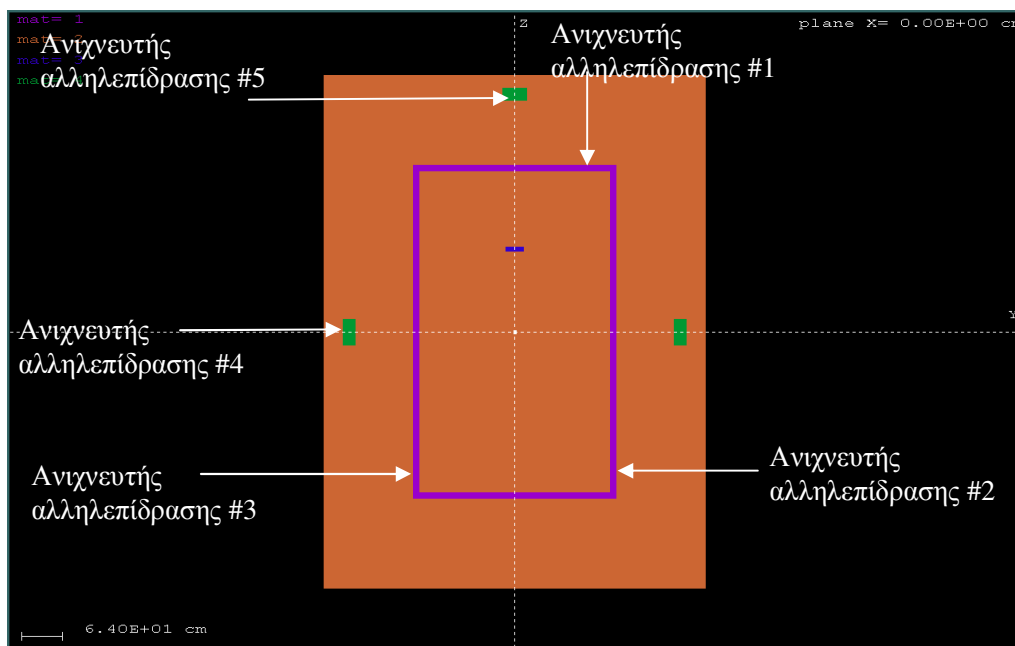
Στο αρχείο δεδομένων διαβάζονται ακόμα τα ονόματα των:

- αρχείων δεδομένων γεωμετρίας **room.geo** και
- αρχείο υλικών **pri_sca.mat**. Ο τρόπος κατασκευής του υπόψη αρχείου για τα τέσσερα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν (αέρας, τσιμέντο, νερό, ιστός) περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.1.

Στο αρχείο εισόδου μίας προσομοίωσης, ορίζονται και χρησιμοποιούνται και οι παρακάτω ανιχνευτές:

Ένας ανιχνευτής δόσης, σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου, με διαστάσεις 40 x 40 x 20 cm, που περικλείει τον ανθρώπινο ιστό, στο σημείο που είναι αυτός τοποθετημένος (1 m πίσω από τον εκάστοτε τοίχο).

Πέντε ανιχνευτές αλληλεπίδρασης. Πρέπει να δίνεται προσοχή, ώστε οι ανιχνευτές αυτοί να έχουν οριστεί προηγουμένως στο αρχείο γεωμετρίας ως σώματα (βλ. §3.2.1.2.α). Ανιχνευτές αλληλεπίδρασης αποτελούν ο τοίχος πάνω στον οποίο κατευθύνεται η πρωτεύουσα δέσμη, οι δύο πλαϊνοί τοίχοι, ο ιστός πίσω από τον τοίχο που κατευθύνεται η πρωτεύουσα δέσμη και ο ιστός πίσω από τον ένα πλαϊνό τοίχο. Η διάταξη των ανιχνευτών αλληλεπίδρασης οι οποίοι χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα φαίνεται στην εικόνα 4.5.



Εικ. 4.5 Διάταξη ανιχνευτών αλληλεπίδρασης

Μετά τον πλήρη ορισμό των δεδομένων του προβλήματος ακολουθεί η προσομοίωση της λειτουργίας της λυχνίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα αριθμητικά δεδομένα που προέκυψαν για τη δόση παρουσιάζονται παρακάτω, στην παράγραφο 4.6, όπου και γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που έλαβαν μέρος σε αυτό το Κεφάλαιο της παρούσας Δ.Ε..

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται αφορούν στην ακτινοβολήση του ιστού από την πρωτεύουσα δέσμη που εκπέμπεται από τη λυχνία καθώς και από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία. Επισημαίνεται ότι, καθώς είναι δυνατός ο ορισμός μόνον ενός ανιχνευτή δόσης ανά προσομοίωση, προκειμένου να εκτιμηθεί η δόση 1m πίσω από κάθε τοίχο της κατασκευής, θα πρέπει να γίνουν περισσότερες προσομοιώσεις (μία για κάθε τοίχο). Κάθε τέτοια προσομοίωση πρέπει να εκτελεστεί με τα ίδια δεδομένα εισόδου και γεωμετρίας. Η μοναδική τροποποίηση που χρειάζεται για να επιτευχθεί αυτό είναι ο επανακαθορισμός της θέσης, των συντεταγμένων δηλαδή, των κορυφών του παραλληλεπίπεδου του ανιχνευτή δόσης. Στην παρούσα Δ.Ε. η προσομοίωση εκτελείται μια φορά μόνον, με χρήση του ιστού πίσω από το primary barrier ως ανιχνευτή δόσης.

4.4 Δωμάτιο χωρίς σκεδαστή της πρωτεύουσας δέσμης

Η δεύτερη περίπτωση που εξετάζεται είναι λιγότερο ρεαλιστική ωστόσο εξίσου χρήσιμη για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Προβλέπει τη λειτουργία της μηχανής των ακτίνων X όπως και στην πρώτη περίπτωση, με τις ίδιες συνθήκες, ρυθμίσεις και φάσμα εκπομπής, με τη διαφορά ότι τώρα η πρωτεύουσα δέσμη δεν θα προσπίπτει πάνω σε σκεδαστή οποιουδήποτε είδους αλλά απευθείας πάνω στον τοίχο του δωματίου που θεωρείται ως primary barrier. Η δόση θα υπολογίζεται ξανά σε ιστό σε απόσταση 1 m έξω από το δωμάτιο με τα ίδια χαρακτηριστικά, υλικό, σχήμα και μέγεθος.

4.4.1 Αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας

Το αρχείο εισόδου της γεωμετρίας της προσομοίωσης, τύπου .geo, δεν διαφέρει πολύ από αυτό της προηγούμενης περίπτωσης (βλ. § 4.3.1). Σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται room2.geo και παρουσιάζεται αναλυτικά στο τέλος του κεφαλαίου στον Πίνακα 4-3. Η γεωμετρία τόσο του

δωματίου όσο και του ιστού που ακτινοβολείται είναι η ίδια με την περίπτωση της παραγράφου 4.3 και η αλλαγή έγκειται στο ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπάρχει ο σκεδαστής της ακτινοβολίας μέσα στο δωμάτιο. Όπως και πριν οι τοίχοι αποτελούνται από τσιμέντο πάχους 10 cm, με διαστάσεις 500 x 320 x 300 cm ενώ ο ιστός είναι τοποθετημένος 1 m από τον τοίχο, είναι κυλινδρικού σχήματος και έχει διαστάσεις $R = 20$ cm και $h = 20$ cm. Η μηχανή βρίσκεται στο κέντρο του δωματίου και εκπέμπει προς τον θετικό ημιάξονα Oz. Όπως και πριν, ο τοίχος πάνω στον οποίο κατευθύνεται η πρωτεύουσα δέσμη θεωρείται ως primary barrier, ενώ οι υπόλοιποι τοίχοι και η οροφή ως secondary barriers.

4.4.2 Αρχείο εισόδου δεδομένων

Το αρχείο εισόδου δεδομένων, τύπου .in, ονομάζεται roomin2.in και παρουσιάζεται αναλυτικά στο τέλος του Κεφαλαίου, στον Πίνακα 4-4. Ξεκινάει με την εισαγωγή του φάσματος και της γεωμετρίας της πηγής, ίδια με την προηγούμενη προσομοίωση δωματίου με σκεδαστή της ακτινοβολίας (βλ. §4.3). Η μηχανή των ακτίνων X εκπέμπει κατά τον άξονα z και υπό ημιγωνία 7° . Ακολουθεί ο ορισμός των υλικών που αποτελούν τα σώματα μέσω του αρχείου room.mat. Αυτή τη φορά υπάρχουν τρία υλικά και όχι τέσσερα αφού στη γεωμετρία δεν υπάρχει ο σκεδαστής. Ορίζεται το αρχείο γεωμετρίας, room2.geo. Στο αρχείο αυτό δεδομένων ορίζονται και οι παρακάτω ανιχνευτές:

- Δύο ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας. Σημειώνεται πως οι ανιχνευτές αυτοί χρησιμοποιήθηκαν απλώς και μόνον για να υπάρχει μια εποπτεία της λύσης του προβλήματος. Η χρήση τους δίνει τη δυνατότητα ελέγχου των αποτελεσμάτων. Οι ανιχνευτές αυτοί είναι ο τοίχος πάνω στον οποίο πέφτει η πρωτεύουσα δέσμη, primary barrier, και ο ίδιος ο ιστός που ακτινοβολείται.
- Ένας ανιχνευτής απορροφούμενης δόσης από τον οποίο υπολογίζεται η τιμή της δόσης στον ιστό. Ορίζεται ως ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που περιβάλλει τον ιστό ενώ δεν χρησιμοποιείται πλέγμα για τον υπολογισμό.

Το αρχείο τελειώνει με τον ορισμό των παραμέτρων τέλους της προσομοίωσης (βλ §3.2.1.1).

Μετά τον ορισμό των δεδομένων του προβλήματος, αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας τύπου .geo και αρχείο εισόδου δεδομένων τύπου .in, ακολουθεί η προσομοίωση της λειτουργίας της

λυχνίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα αριθμητικά δεδομένα που προέκυψαν για τη δόση παρουσιάζονται παρακάτω στην παράγραφο 4.6.

4.5 Προσομοίωση της διαρρέουσας ακτινοβολίας

Με τον όρο διαρρέουσα ακτινοβολία αναφερόμαστε σε οποιαδήποτε ακτινοβολία εκπέμπεται από την τη μηχανή των ακτίνων-Χ, η οποία δεν ανήκει στην πρωτεύουσα δέσμη. Πρόκειται για την ακτινοβολία η οποία παράγεται στην άνοδο της μηχανής και η οποία δεν εξέρχεται από το παράθυρο της μηχανής αλλά από το μεταλλικό περίβλημά της. Η διαρρέουσα ακτινοβολία είναι και η σημαντικότερη συνιστώσα της ακτινοβολίας στο πίσω μέρος της μηχανής. Όσον αφορά στον τρόπο εκτίμησής της, υπάρχουν διάφορες απόψεις, όχι κατ' ανάγκη αντικρουόμενες.

1. Όσον αφορά τους θεωρητικούς υπολογισμούς των θωρακίσεων, η διαρρέουσα ακτινοβολία συνήθως θεωρείται ίση με ένα κλάσμα της ακτινοβολίας της πρωτεύουσας δέσμης [NCRP Report No. 49, 1976]. Δηλαδή όταν η πρωτεύουσα ακτινοβολία έχει ως αποτέλεσμα μία συγκεκριμένη τιμή για το ρυθμό Έκθεσης σε μία απόσταση, θεωρείται ότι ο ρυθμός έκθεσης της ακτινοβολίας διαρροής είναι το 0.1% του ρυθμού αυτού Έκθεσης.
2. Μια άλλη προσέγγιση για την εκτίμησή της είναι να θεωρηθεί ότι η ακτινοβολία διαρροής προκαλεί ρυθμό έκθεσης που είναι ίσος με τον ρυθμό έκθεσης που προκαλεί η ακτινοβολία της πρωτεύουσας δέσμης, όταν διέλθει μέσα από συγκεκριμένο πάχος μολύβδου [Παναγιωτάκης Ι., 2007].

Στην περίπτωση της ΔΕ, δεν ενδιαφέρει απλώς ο ρυθμός έκθεσης σε μία θέση πίσω από τη μηχανή, αλλά ενδιαφέρει να μελετηθεί και η επίδραση των τοίχων του δωματίου στην ακτινοβολία διαρροής, δηλαδή πως φιλτράρεται εν συνεχεία αυτή η ακτινοβολία διαρροής. Για να μελετηθεί η επίδραση του τοίχου πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα όσο γίνεται πιο ρεαλιστικό φάσμα ακτινοβολίας διαρροής. Το φάσμα αυτό εννοείται ότι θα είναι διαφορετικό αν η μηχανή περιβάλλεται από κάλυμμα μολύβδου ή διαφορετικού υλικού. Στα πλαίσια της ΔΕ επελέγη το υλικό του καλύμματος της μηχανής να είναι σίδηρος. Με τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται στη συνέχεια, θα μπορούσε να γίνει εκτίμηση του φάσματος της ακτινοβολίας διαρροής και για κάλυμμα από συνδυασμό υλικών. Θεωρήθηκε λοιπόν, πως η διαρρέουσα ακτινοβολία της

μηχανής είναι αυτή που προκαλεί την ίδια έκθεση με αυτήν που προκαλείται από την πρωτεύουσα ακτινοβολία όταν αυτή διέλθει μέσα από μολύβι πάχους 2-3 mm. Ωστόσο, το φάσμα της ακτινοβολίας που προκύπτει από αυτή τη θεώρηση, μέσω κατάλληλης προσομοίωσης, δεν αποτελεί το πραγματικό φάσμα διαρρέουσας ακτινοβολίας μίας μηχανής η οποία περιβάλλεται από άλλο υλικό, διαφορετικό από μολύβδο.

Προκειμένου να δημιουργηθεί, μέσω προσομοίωσης, το κατάλληλο φάσμα της διαρρέουσας ακτινοβολίας για το υλικό του καλύμματος της μηχανής, χρειάστηκε να αναπτυχθεί στα πλαίσια της ΔΕ συγκεκριμένη μεθοδολογία, η οποία συνίσταται στα παρακάτω βήματα:

1. Προσομοίωση του φάσματος της πρωτεύουσας ακτινοβολίας της μηχανής, μετά τη διέλευσή του από θωράκιση Pb πάχους 2.5mm.
2. Εκτίμηση της δόσης ή οποία προκαλείται εξαιτίας το φάσματος, σε απόσταση 1m πίσω από τη μηχανή.
3. Προσομοίωση του φάσματος της πρωτεύουσας ακτινοβολίας της μηχανής, μετά από θωράκιση σιδήρου ορισμένου πάχους, που επιλέγεται καταρχήν κατ'εκτίμηση, και υπολογισμός της δόσης εξαιτίας του φάσματος αυτού.
4. Επανάληψη της προσομοίωσης του προηγούμενου βήματος, με νέο πάχος θωράκισης σιδήρου, μέχρι η δόση σε απόσταση 1m πίσω από τη μηχανή, να γίνει ίση με αυτή που υπολογίστηκε στο βήμα 2.

Με την παραπάνω διαδικασία θα προκύψει το κατάλληλο φάσμα, μετά την απορρόφηση της ακτινοβολίας στο κάλυμμα του σιδήρου, το οποίο θα προκαλεί σε 1m απόσταση από τη μηχανή, τόση δόση, όση αναμένεται ότι είναι η δόση λόγω της διαρρέουσας ακτινοβολίας. Το πάχος αυτό θα είναι το *ισοδύναμο πάχος σιδήρου των 2.5mm μολύβδου*.

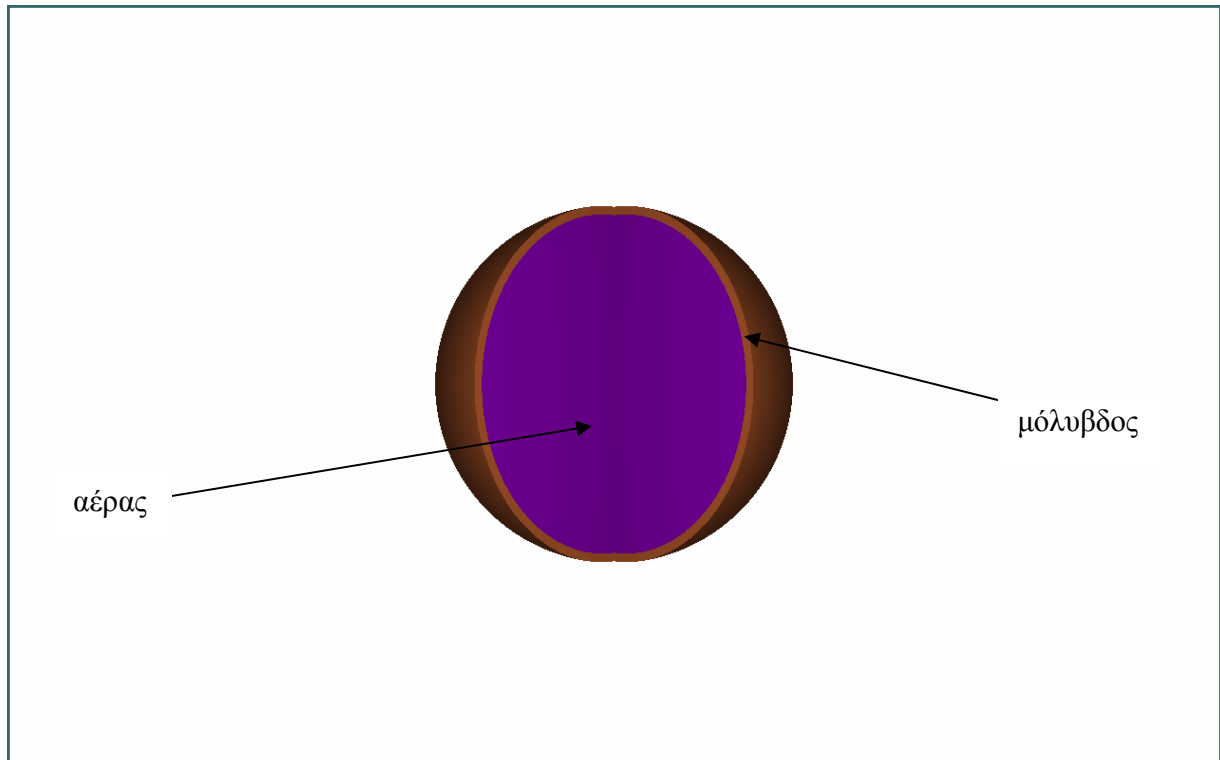
4.5.1 Προσομοίωση της διαρρέουσας ακτινοβολίας, μετά από θωράκιση μολύβδου

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται σε αυτό το κομμάτι της παρούσας Δ.Ε. έχει ως στόχο της να δημιουργηθεί μέσω προσομοίωσης το φάσμα της διαρρέουσας ακτινοβολίας της μηχανής των ακτίνων-X. Για να επιτευχθεί αυτό ακολουθούνται τα τέσσερα βήματα που περιγράφονται στην

§4.5. Στα δύο πρώτα, γίνεται η προσομοίωση του φάσματος της πρωτεύουσας πίσω από μια θωράκιση μολύβδου πάχους 2.5mm και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το φάσμα αυτό που προέκυψε από την παραπάνω προσομοίωση, στον υπολογισμό της δόσης εξαιτίας του φάσματος αυτού σε ιστό που βρίσκεται σε απόσταση 1m πίσω από τη μηχανή.

4.5.1.1 Προσομοίωση του φάσματος της πρωτεύουσας ακτινοβολίας της μηχανής πίσω από θωράκιση Pb 2.5mm.

Στην παρούσα προσομοίωση, για την παραγωγή του φάσματος της διαρρέουσας ακτινοβολίας, το φάσμα της πρωτεύουσας δέσμης της μηχανής θεωρείται ότι διέρχεται μέσα από θωράκιση μολύβδου πάχους 2.5 mm. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης γίνεται η παραδοχή ότι η λυχνία είναι σημειακή πηγή φωτονίων, η οποία περιβάλλεται από σφαιρική θωράκιση. Συγκεκριμένα, γίνεται η παραδοχή ότι η λυχνία βρίσκεται στο κέντρο της μολύβδινης σφαιρικής θωράκισης, εσωτερικής ακτίνας 5 cm και πάχους 2.5mm. Η γεωμετρία που περιγράφεται, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.6. Ο χώρος μεταξύ λυχνίας και μολύβδινης θωράκισης είναι γεμάτος με αέρα. Το αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας ονομάζεται leak.geo και παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 4-5 στο τέλος του Κεφαλαίου.



Εικ. 4.6 Γεωμετρία μολύβδινης σφαιρικής θωράκισης

Στο αρχείο δεδομένων εισόδου με όνομα *leakin.in*, το οποίο παρατίθεται στον Πίνακα 4-6 στο τέλος του Κεφαλαίου, χρησιμοποιήθηκε το πρωτεύων φάσμα της πηγής. Το αρχείο υλικών έχει όνομα *airlead.mat* και αποτελείται από δύο υλικά, τον αέρα και το μόλυβδο. Το αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας είναι το αρχείο *leak.geo*. Η προσομοίωση έγινε με τη χρήση της εντολής:

```
>penmain.exe<leakin.in
```

Η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν $3.075900\text{E}+04$ sec και προσομοιώθηκαν συνολικά $4.598636\text{E}+06$ ιστορίες. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παρήχθησαν μια σειρά αρχείων αποτελεσμάτων, από τα οποία, αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το αρχείο **pm_energy_ph_trans.dat**. Το αρχείο αυτό παράγεται σε κάθε προσομοίωση που χρησιμοποιεί τον κώδικα χρήστη *penmain*, ανεξάρτητα από τη γεωμετρία και το είδος της ακτινοβολίας που εξετάζεται [Αθανασίου Ν., 2006]. Στο αρχείο αυτό, τα φωτόνια που εξέρχονται από τη σφαίρα καταγράφονται σε 100 ενεργειακά διαστήματα (*energy bins*) στην

ενεργειακή περιοχή 10eV - 120keV. Ένα τμήμα του αρχείου pm_energy_ph_trans.dat παρουσιάζεται στο σχήμα (4.2).

```
# Results from PENMAIN.  
# Energy distribution of transmitted photons.  
# 1st column: E (eV).  
# 2nd and 3rd columns: probability density and STU (1/(eV*particle)).  
  
7.045001E+02 1.000000E-35 1.000000E-35  
1.913500E+03 1.000000E-35 1.000000E-35  
3.122500E+03 1.000000E-35 1.000000E-35  
4.331500E+03 1.000000E-35 1.000000E-35  
5.540501E+03 1.000000E-35 1.000000E-35  
6.749501E+03 1.000000E-35 1.000000E-35  
7.958501E+03 1.000000E-35 1.000000E-35  
9.167501E+03 3.597283E-10 7.630988E-10  
1.037650E+04 1.798642E-10 5.395924E-10  
1.158550E+04 1.000000E-35 1.000000E-35  
1.279450E+04 1.798642E-10 5.395924E-10  
1.400350E+04 1.000000E-35 1.000000E-35
```

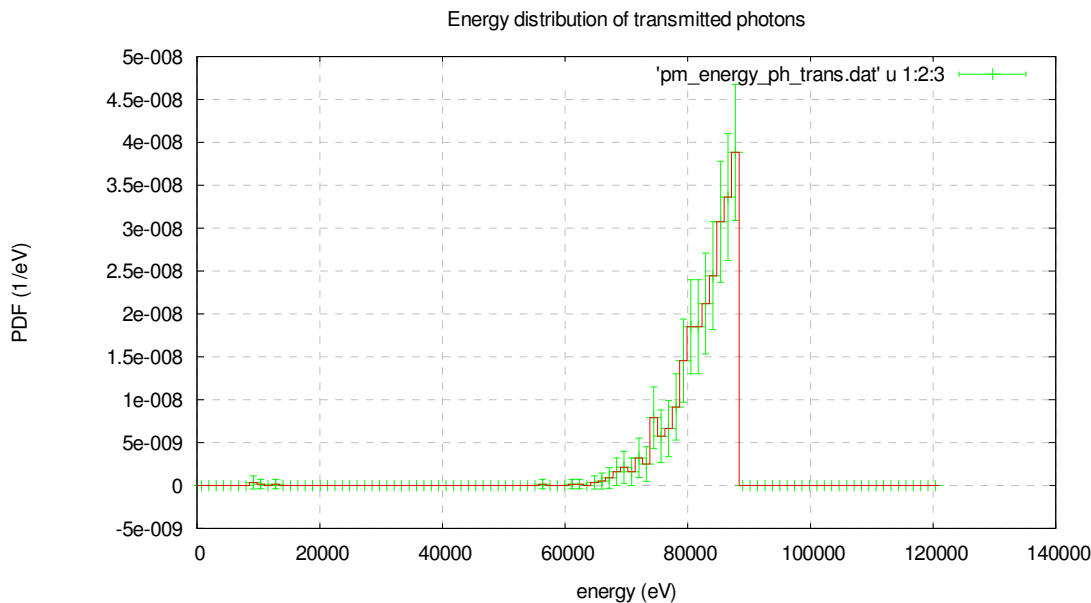
Σχήμα 4.2 Αρχείο εξόδου *pm_energy_ph_trans.dat* του κώδικα χρήστη *penmain*

Στην πρώτη στήλη του αρχείου δίδεται η ενέργεια των φωτονίων που εξέρχονται της σφαίρας (eV), στην δεύτερη η πυκνότητα πιθανότητας (1/(eV*particle)) και στην τρίτη το σφάλμα της πυκνότητας πιθανότητας σε επίπεδο 3σ (1/(eV*particle)).

Με τη βοήθεια του προγράμματος απεικόνισης αποτελεσμάτων wgnuplot, παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4-1 που ακολουθεί το φάσμα της διαρρέουσας ακτινοβολίας όπως προκύπτει μετά τη διέλευση της πρωτεύουσας δέσμης μέσα από 2.5mm μολύβδου. Η απεικόνιση έγινε με τη χρήση της εντολής:

```
>wgnuplot penmain.gnu
```

Η ενέργεια απεικονίζεται στον άξονα των X και είναι εκφρασμένη σε eV, ενώ η πυκνότητα πιθανότητας απεικονίζεται στον άξονα των Y και είναι εκφρασμένη σε 1/eV.



Διάγραμμα 4-1 Ενεργειακό φάσμα διαρρέουσας ακτινοβολίας που προκύπτει από τη διέλευση της πρωτεύουσας ακτινοβολίας μέσα από 2.5 mm μολύβδου

Το φάσμα που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4-1 αποτελεί το φάσμα της ακτινοβολίας διαρροής, σύμφωνα με την προσέγγιση που έγινε, και είναι αυτό που εισάγεται στο αρχείο εισόδου δεδομένων τύπου .in της προσομοίωσης του επόμενου βήματος, προκειμένου να υπολογισθεί η δόση σε ιστό 1m πίσω από τη μηχανή, εξαιτίας του.

Στο φάσμα αυτό παρατηρείται σημαντική διαφορά από το φάσμα της πρωτεύουσας δέσμης. Παρατηρείται πως ενώ στις χαμηλές ενέργειες, έως τα 85 keV, το φάσμα έχει μια αναμενόμενη μορφή, λόγω της έντονης απορρόφησης των φωτονίων χαμηλής ενέργειας από τον μολύβδο, στις ενέργειες πάνω από ~85 keV τα φωτόνια κόβονται ολοκληρωτικά. Αυτό συμβαίνει διότι πάνω από την ενέργεια αυτή η πιθανότητα να γίνει φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με ιονισμό και της στιβάδας-K του Pb, η οποία αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη ενέργεια, είναι ιδιαίτερα υψηλή, με αποτέλεσμα τα φωτόνια αυτά να απορροφούνται ολοκληρωτικά. Προκύπτει λοιπόν αβίαστα το συμπέρασμα ότι:

Το παραπάνω φάσμα μπορεί να είναι σωστό ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης, και να μπορεί να υπολογισθεί για τον προσδιορισμό της δόσης λόγω της ακτινοβολίας διαρροής, δεν είναι όμως το πραγματικό φάσμα διαρροής που εκπέμπεται από μία μηχανή ακτίνων-X η οποία περιβάλλεται από υλικό διαφορετικό του μολύβδου. Πρόκειται πράγματι για το φάσμα της διαρρέουσας ακτινοβολίας όπως ορίστηκε στην παράγραφο 4.5 και θα ήταν ένα

φάσμα πολύ κοντά στην πραγματικότητα στην περίπτωση που η θωράκιση της μηχανής ήταν μόνον από Pb.

Στο πρόβλημά που εξετάζεται όμως, ενδιαφέρει και η επίδραση και των τοίχων του δωματίου στην ακτινοβολία διαρροής, κάτι που εξαρτάται από τη μορφή του φάσματος της ακτινοβολίας. Πρέπει λοιπόν να χρησιμοποιηθεί ένα φάσμα ακτινοβολίας διαρροής **όπου το φιλτράρισμα της ακτινοβολίας στη μηχανή δεν θα γίνεται από μόλυβδο αλλά από άλλο υλικό που στα πλαίσια της ΔΕ επιλέχθηκε να είναι ο σίδηρος**. Για να γίνει αυτό υπολογίζεται πρώτα η δόση που προκαλεί το παραπάνω φάσμα σε ιστό πίσω από τη μηχανή.

4.5.1.2 Υπολογισμός της δόσης σε ανθρώπινο ιστό πίσω από τη μηχανή, λόγω του φάσματος ακτινοβολίας διαρροής που εκτιμάται μετά την διέλευση της πρωτεύουσας δέσμης μέσα από θωράκιση Pb 2.5mm.

Αυτό για το οποίο ενδιαφερόμαστε όταν εξετάζουμε την θωράκιση έναντι της ακτινοβολίας διαρροής της λυχνίας είναι σύμφωνα με τους κανονισμούς [NCRP Report No. 147, 2004] η δόση σε ιστό σε απόσταση 1m πίσω από τη μηχανή, χωρίς παρεμβολή επιπλέον θωράκισης (π.χ. τοίχου). Σε αντίθεση λοιπόν με τους προηγούμενους υπολογισμούς (βλ. § 4.3-4.4) η δόση στο σημείο αυτό θα υπολογιστεί σε ιστό μέσα και όχι έξω από το δωμάτιο.

Η δόση αυτή υπολογίζεται με προσομοίωση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο κώδικας penmain.

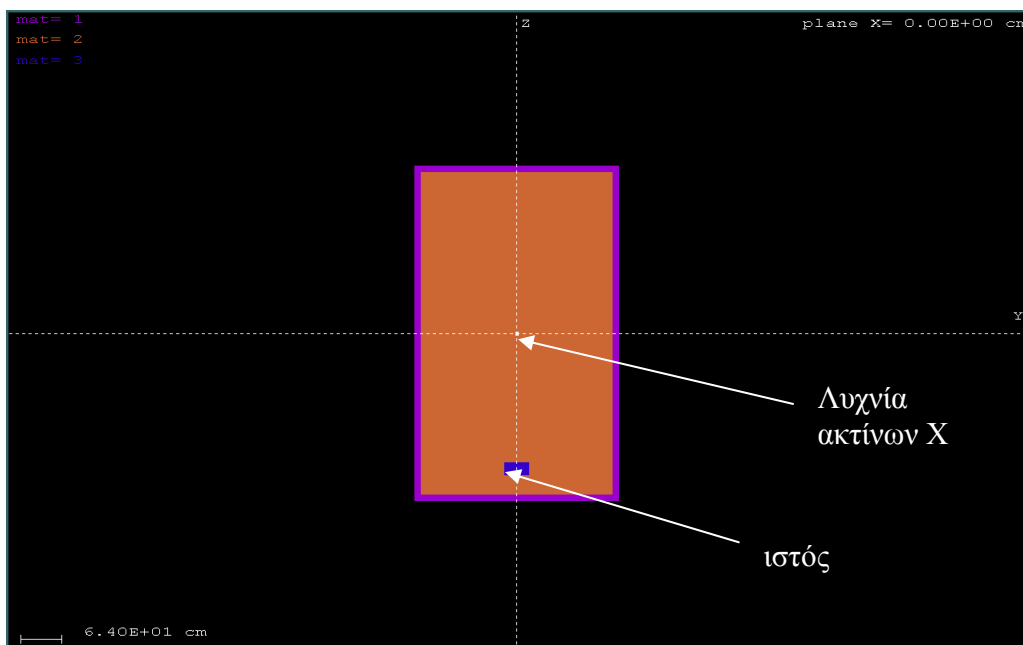
Στο αρχείο περιγραφής της γεωμετρίας με όνομα leak_pb.geo ο ιστός θεωρείται ως material 3 είναι τοποθετημένος σε απόσταση 100 cm από την πηγή και έχει διαστάσεις $R = 20$ cm και $h = 20$ cm ενώ το δωμάτιο ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις με την περίπτωση της προσομοίωσης ακτινοβολίας λόγω της πρωτεύουσας δέσμης (§ 4.3-4.4). Το αρχείο παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 4-7 στο τέλος του Κεφαλαίου.

Στο αρχείο εισόδου δεδομένων με όνομα leakin_pb.in εισάγεται το φάσμα της διαρρέουσας όπως αυτό προέκυψε από την προσομοίωση της παραγράφου 4.5.1.1 (και περιέχεται στο αρχείο, pm_energy_ph_trans.dat) το αρχείο υλικών leak.mat που αποτελείται από τα υλικά αέρας, μπετόν και ιστός και το αρχείο της γεωμετρίας leak_pb.geo. Η γεωμετρία παρουσιάζεται στην εικόνα 4.7. Η πηγή τοποθετείται ακριβώς στο κέντρο του δωματίου και ακτινοβολεί κατά τον αρνητικό ημιάξονα Oz. Επιλέγεται επίσης η πηγή να ακτινοβολεί προς όλες τις κατευθύνσεις

κατά τα αρνητικά z διότι η διαρρέουσα ακτινοβολία δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση εξόδου από τη μηχανή. Ορίζεται ένας ανιχνευτής δόσης με τις διαστάσεις του ιστού που αναφέρθηκαν και από το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή δόσης παίρνουμε το αποτέλεσμα για την απορροφούμενη από τον ιστό δόση μέσα στο δωμάτιο. Το αρχείο εισόδου δεδομένων παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-8 στο τέλος του Κεφαλαίου. Η προσομοίωση έγινε με τη χρήση της εντολής:

```
>penmain.exe<leakin_pb.in
```

Η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν $2.461397\text{E}+04$ sec και προσομοιώθηκαν συνολικά $3.926545\text{E}+06$ ιστορίες. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παρήχθησαν μια σειρά αρχείων αποτελεσμάτων από τα οποία χρησιμοποιήθηκε το αρχείο εξόδου δεύτερου τύπου του ανιχνευτή δόσης (βλ. §3.2.1.3.γ) από το οποίο λαμβάνεται η τιμή της απορροφούμενης δόσης από τον ιστό. Η δόση αυτή έχει τιμή **$9.30698\text{E}-03$ eV/g·φωτόνιο**. Αυτή είναι και η δόση που θα πρέπει να προκαλείται σε ιστό σε απόσταση 1m πίσω από τη μηχανή από το φάσμα της διαρρέουσας που θα προέρχεται από τη διέλευση της πρωτεύουσας δέσμης μέσα από το ισοδύναμο πάχος σιδήρου.



Εικ. 4.7 Γεωμετρία προβλήματος υπολογισμού της δόσης σε ανθρώπινο ιστό λόγω της διαρρέουσας ακτινοβολίας

4.5.2 Προσομοίωση του φάσματος της πρωτεύουσας ακτινοβολίας της μηχανής, πίσω από θωράκιση σιδήρου

Στα βήματα 1 και 2 της μεθοδολογίας που αναπτύσσεται στην παράγραφο 4.5 υπολογίστηκε το φάσμα της πρωτεύουσας ακτινοβολίας μετά τη δίοδο του μέσα από θωράκιση μολύβδου 2.5mm και η δόση που αυτό προκαλεί σε ιστό σε απόσταση 1m πίσω από τη μηχανή. Οι παράγραφοι που ακολουθούν αντιστοιχούν στα βήματα 3 και 4 της μεθοδολογίας, στον υπολογισμό του φάσματος της πρωτεύουσας μετά τη δίοδο της μέσα από πάχος σιδήρου και της δόσης που αυτό προκαλεί σε ιστό στο 1m από την μηχανή. Το πάχος αυτό θα βρεθεί με επαναληπτική διαδικασία, στην οποία κάθε φορά θα δοκιμάζεται ένα πάχος σιδήρου, θα προκύπτει το φάσμα της διαρρέουσας μετά τη δίοδο της πρωτεύουσας μέσα από αυτό το πάχος και θα συγκρίνεται η δόση που το φάσμα αυτό προκαλεί με τη δόση που υπολογίστηκε στο βήμα 2 της μεθόδου.

4.5.2.1 Προσομοίωση του φάσματος της πρωτεύουσας ακτινοβολίας της μηχανής, πίσω από θωράκιση σιδήρου 5 mm.

Ο σίδηρος είναι υλικού χαμηλότερου ατομικού αριθμού από το μόλυβδο και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο πάχος σε σχέση με το πάχος του μολύβδου (2.5mm).

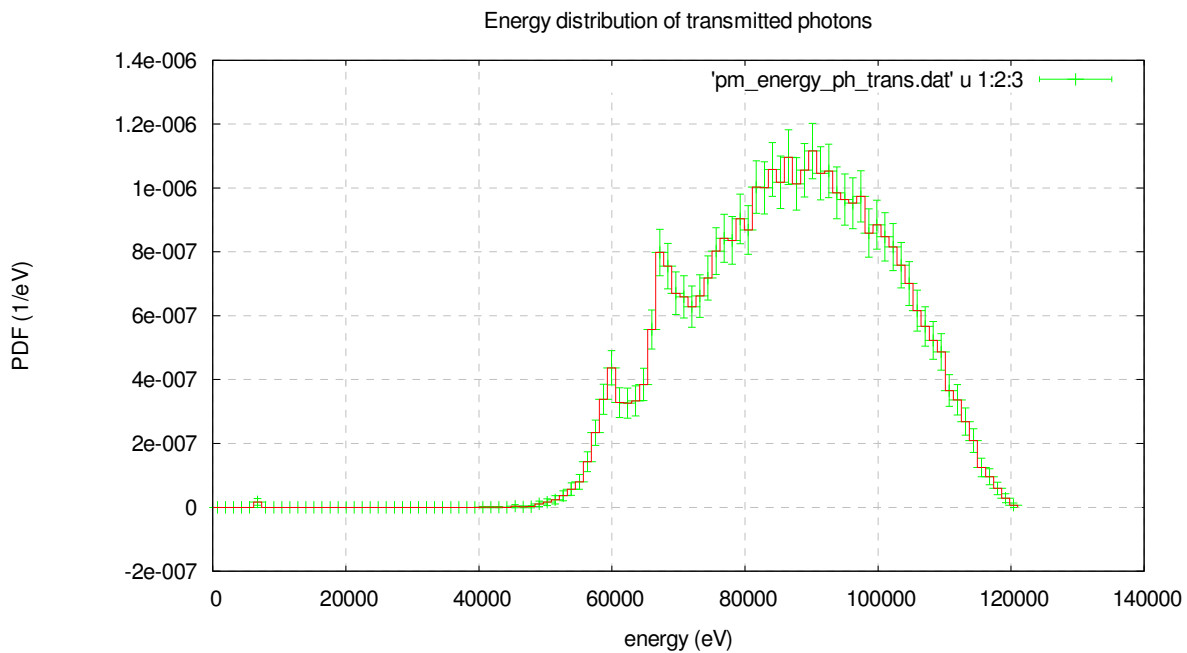
Δοκιμάστηκε αρχικά ένα πάχος σιδήρου 5 mm. Χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρία σφαίρας που φαίνεται στην εικόνα 4-6 με το μόλυβδο να αντικαθίσταται από το σίδηρο ενώ το αρχείο γεωμετρίας είναι ακριβώς το ίδιο σε μορφή με αυτό της προηγούμενη περίπτωση (βλ. §4.5.1.1). Μόνη διαφορά είναι το πάχος της σφαίρας που τώρα γίνεται 5 mm. Το όνομα του αρχείου σε αυτή την περίπτωση είναι leak2.geo και παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-9. Το αρχείο εισόδου δεδομένων ονομάζεται leakin2.in και η αλλαγή σε αυτό, σε σχέση με το αρχείο εισόδου της προσομοίωσης της §4.5.1.1 είναι το αρχείο υλικών που αυτή τη φορά είναι το airfe.mat και περιέχει τα υλικά αέρας και σίδηρος. Το αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης leakin.in παρουσιάζεται στο τέλος του κεφαλαίου στον Πίνακα 4-10.

Η προσομοίωση έγινε με τη χρήση της εντολής:

```
>penmain.exe<leakin2.in
```

Η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν $6.836516E+03$ sec και προσομοιώθηκαν συνολικά $1.115179E+06$ ιστορίες. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παρήχθησαν μια σειρά αρχείων αποτελεσμάτων από τα οποία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του αρχείου με όνομα **pm_energy_ph_trans.dat**. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4-2 με τη βοήθεια του wgnuplot και με χρήση της εντολής

`>wgnuplot penmain.gnu`



Διάγραμμα 4-2 Ενεργειακό φάσμα διαρρέουσας ακτινοβολίας με χρήση 5 mm σιδήρου

Αυτό που παρατηρείται είναι η εντυπωσιακή διαφορά από το φάσμα που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4-1. Το φάσμα αυτό έχει τη συνήθη μορφή των φασμάτων των μηχανών ακτίνων-X, μετά τη διέλευσή τους από φίλτρα. Στο φάσμα παρατηρούνται οι χαρακτηριστικές ακτίνες-X K_{α} K_{β} του W περί τα 60 και 68keV. Ωστόσο, θα πρέπει η δόση από το φάσμα αυτό στον ιστό που έχει τις ίδιες διαστάσεις και βρίσκεται στην ίδια θέση με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη § 4.5.1.2 να είναι η ίδια.

Για να εκτιμηθεί αυτή τη δόση χρησιμοποιήθηκε πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της επόμενης παραγράφου.

4.5.2.2 Υπολογισμός της δόσης σε ανθρώπινο ιστό πίσω από τη μηχανή, λόγω του φάσματος ακτινοβολίας διαρροής που προκύπτει μετά τη διέλευση της πρωτεύουσας δέσμης μέσα από θωράκιση σιδήρου 5 mm

Το αρχείο εισόδου της γεωμετρίας είναι το leak_fe5.geo, ακριβώς το ίδιο με το leak_pb.geo που παρουσιάστηκε στην § 4.5.1.2. Αυτό γίνεται γιατί το αρχείο αυτό περιγράφει τη γεωμετρία του δωματίου και του ιστού που δεν αλλάζουν όταν αλλάζει το ενεργειακό φάσμα των φωτονίων που χρησιμοποιείται. Το αρχείο εισόδου δεδομένων έχει διαφορά μόνο στο φάσμα των ενεργειών των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή και στο όνομα του αρχείου γεωμετρίας σε σχέση με το αρχείο .in της περίπτωσης υπολογισμού δόσης της παραγράφου 4.5.1.2. Τα δύο αρχεία παρουσιάζονται αναλυτικά στο τέλος του κεφαλαίου στους Πίνακες 4-11 και 4-12.

Η προσομοίωση έγινε με τη χρήση της εντολής:

>penmain.exe<leakin_fe5.in

Η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν $1.023263E+04$ sec και προσομοιώθηκαν συνολικά $3.531781E+06$ ιστορίες. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παρήχθησαν μια σειρά αρχείων αποτελεσμάτων από τα οποία χρησιμοποιήθηκε το αρχείο εξόδου δεύτερου τύπου του ανιχνευτή δόσης (βλ. §3.2.1.3.γ) και ελήφθη η τιμή της απορροφούμενης δόσης από τον ιστό. Η δόση αυτή έχει τιμή **$9.4109E-03eV/g\cdot\text{φωτόνιο}$** .

Η δόση αυτή δε διαφέρει αρκετά από τη δόση που υπολογίστηκε στην παράγραφο 4.5.1.2 (βήμα 2 της μεθοδολογίας), ωστόσο δοκιμάζουμε και το πάχος των 4 mm σιδήρου για να πετύχουμε ακριβέστερα αποτελέσματα για το ισοδύναμο πάχος.

4.5.2.3 Προσομοίωση του φάσματος της πρωτεύουσας ακτινοβολίας της μηχανής, πίσω από θωράκιση Fe 4 mm.

Μετά τη δοκιμή του πάχους των 5 mm σιδήρου ελέγχουμε και το πάχος των 4 mm. Όπως πριν, (βλ. §4.5.2.1), το μόνο που αλλάζει στο αρχείο της γεωμετρίας στο πρώτο στάδιο "παραγωγής" του φάσματος είναι το πάχος της σφαίρας που αυτή τη φορά είναι 4 mm. Η μορφή του

υπόλοιπου αρχείου παραμένει η ίδια με αυτή του αρχείου της §4.5.2.1 ενώ το όνομά του γίνεται leak3.geo. Το αρχείο παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-13 στο τέλος του κεφαλαίου.

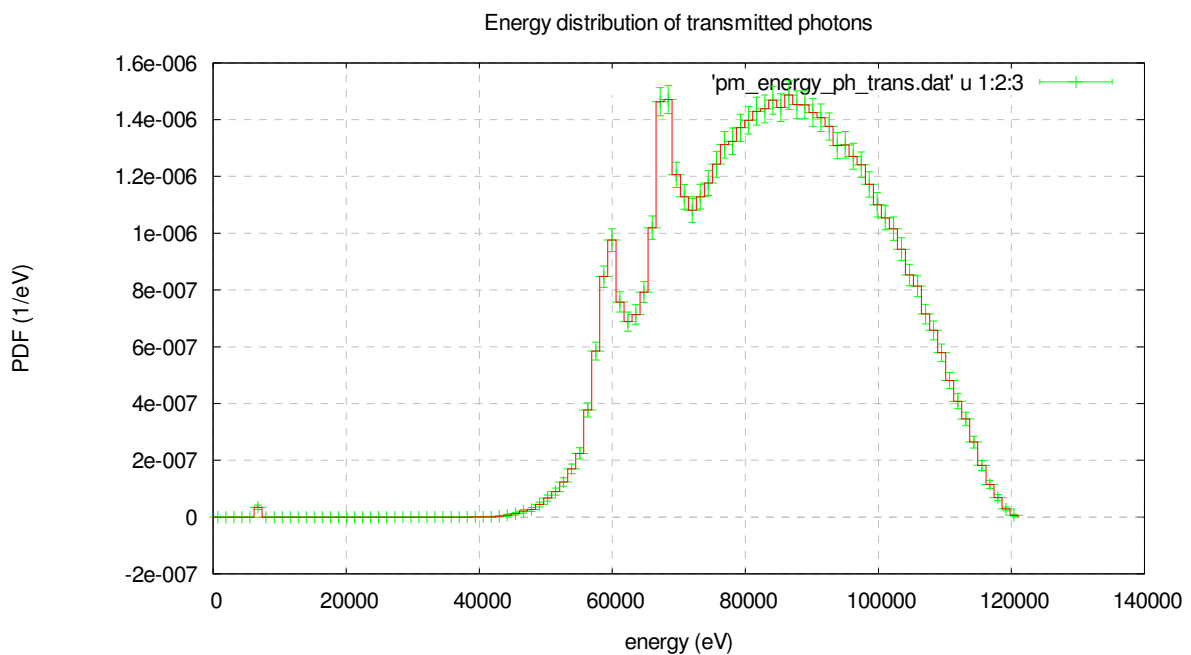
Στο αρχείο εισόδου δεδομένων δεν αλλάζει απολύτως τίποτα σε σχέση με την προηγούμενη δοκιμή (βλ. §4.5.2.1). Το όνομα του αρχείου είναι leakin3.in και παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-14 στο τέλος του κεφαλαίου.

Η προσομοίωση έγινε με τη χρήση της εντολής:

```
>penmain.exe<leakin3.in
```

Η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν $1.166694E+04$ sec και προσομοιώθηκαν συνολικά $4.455229E+06$ ιστορίες. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παρήχθησαν μια σειρά αρχείων αποτελεσμάτων από τα οποία χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα του αρχείου με όνομα **pm_energy_ph_trans.dat**. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4-3 με τη βοήθεια του wgnuplot και με χρήση της εντολής:

```
>wgnuplot penmain.gnu
```



Διάγραμμα 4-3 Ενεργειακό φάσμα διαρρέουσας ακτινοβολίας με χρήση 4 mm σιδήρου

Και σε αυτή την περίπτωση το φάσμα που προκύπτει έχει εμφανώς τη μορφή των φασμάτων εκπομπής των μηχανών ακτίνων-X.

4.5.2.4 Υπολογισμός της δόσης σε ανθρώπινο ιστό πίσω από τη μηχανή, λόγω του φάσματος ακτινοβολίας διαρροής που προκύπτει μετά την διόδο της πρωτεύουσας δέσμης μέσα από θωράκιση σιδήρου 4 mm

Για να βρούμε αυτή τη δόση χρησιμοποιούμε τον ίδιο ανιχνευτή δόσης στην ίδια γεωμετρία με την προηγούμενη δοκιμή (βλ. § 4.5.2.2) και με διαφορά μόνο στο φάσμα των ενεργειών των φωτονίων που προσπίπτουν πάνω στον ιστό.

Όσον αφορά το αρχείο της γεωμετρίας, το όνομά του γίνεται leak_fe4.geo αλλά στην πραγματικότητα δεν αλλάζει κάτι σε σχέση με το leak_fe5.geo (βλ. § 4.5.2.2) και το leak_pb.geo (βλ. § 4.5.1.2) . Τα αρχεία leakin_fe4.in και leak_fe4.geo παρουσιάζονται στο τέλος του κεφαλαίου στους Πίνακες 4-15 και 4-16.

Η προσομοίωση έγινε με τη χρήση της εντολής:

`>penmain.exe<leakin_fe4.in`

Η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν $1.160597E+04$ sec και προσομοιώθηκαν συνολικά $4.431518E+06$ ιστορίες. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παρήχθησαν μια σειρά αρχείων αποτελεσμάτων από τα οποία χρησιμοποιήσαμε το αρχείο εξόδου δεύτερου τύπου του ανιχνευτή δόσης (βλ. §3.2.1.3.γ) και παίρνουμε την τιμή της απορροφούμενης δόσης από τον ιστό. Η δόση αυτή έχει τιμή **$1.12315E-02eV/g\cdot\text{φωτόνιο}$**

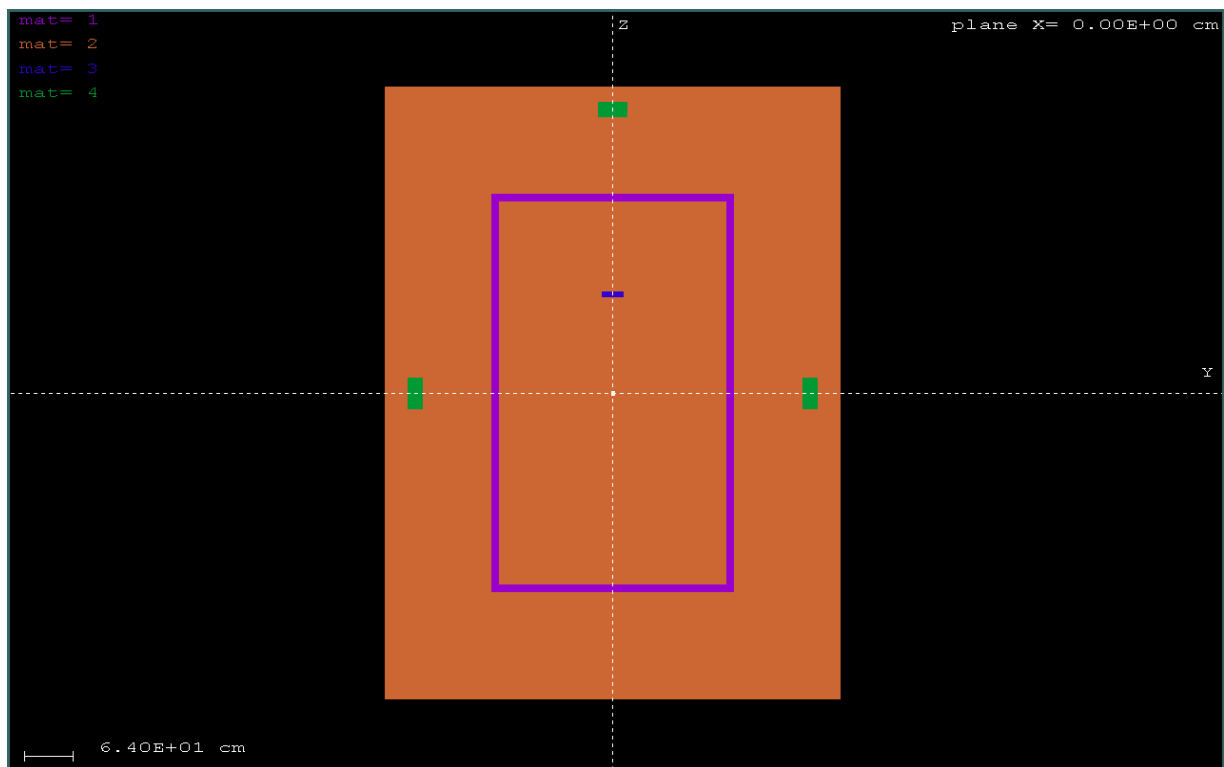
Η τιμή αυτή διαφέρει αρκετά από την τιμή της δόσης που υπολογίστηκε στην παράγραφο 4.5.1.2. Αρκούμεστε λοιπόν στην τιμή του ισοδύναμου πάχους των 5 mm που υπολογίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο (§ 4.5.2.2). Μπορούμε να υποθέσουμε λοιπόν ότι: ***το φάσμα της διαρρέουσας ακτινοβολίας που προκύπτει μετά από τη διέλευση της πρωτεύουσας δέσμης μέσα από 2.5 mm μολύβδου προκαλεί την ίδια δόση σε συγκεκριμένο τύπο και σχήμα ιστού, σε συγκεκριμένη σταθερή θέση πίσω από τη λυχνία, με το φάσμα που προκύπτει από τη διέλευση της πρωτεύουσας ακτινοβολίας μέσα από 5 mm σιδήρου. Η διαρρέουσα επομένως ακτινοβολία στους δοσιμετρικούς υπολογισμούς της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας***

μπορεί να προσομοιωθεί με το φάσμα που εκπέμπεται μετά τη διέλευση της πρωτεύουσας ακτινοβολίας μέσα από 5 mm σιδήρου.

4.6 Υπολογισμοί δόσεων έξω από ένα ακτινολογικό δωμάτιο

Η πρώτη περίπτωση που προσομοιώθηκε με τη βοήθεια του κώδικα PENELOPE ήταν αυτή του απλού ακτινολογικού δωματίου τυπικών διαστάσεων, με σκεδαστή της ακτινοβολίας ένα ανθρωπόμορφο ομοίωμα από νερό, και τη λυχνία να βρίσκεται στο κέντρο του δωματίου. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στον υπολογισμό της δόσης πίσω από τον τοίχο στον οποίο προσπίπτει η πρωτεύουσα δέσμη της ακτινοβολίας και, λαμβάνοντας υπ' όψη και τη βιβλιογραφία [NCRP Report No. 147, 2004], χαρακτηρίζεται ως primary barrier. Για τον λόγο αυτό τοποθετήθηκε σε απόσταση 1 m πίσω από τον τοίχο και έξω από το δωμάτιο ένα ομοίωμα κυλινδρικού σχήματος αποτελούμενο από ανθρώπινο ιστό, το οποίο παίζει το ρόλο του ακτινοβολούμενου που πρέπει να προστατευτεί από τη θωράκιση που του παρέχει ο τοίχος. Η απόσταση του 1 m επιλέχθηκε αφού αυτή, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [NCRP Report No. 147, 2004], είναι η απόσταση στην οποία γίνονται οι μετρήσεις της δόσης. Ο ανθρώπινος ιστός ορίζεται ως ανιχνευτής απορροφούμενης δόσης μέσα στο αρχείο εισόδου δεδομένων τύπου .in του προβλήματος. Παράλληλα, ορίζονται ίδια ομοιώματα, αποτελούμενα από τον ίδιο ιστό και πίσω από τους πλάγιους τοίχους του δωματίου σε απόσταση επίσης 1 m (secondary barriers) [NCRP Report No. 147, 2004]. Ο χρήστης μπορεί εύκολα να επιλέξει που θέλει να υπολογίσει τη δόση, δηλαδή πίσω από το primary ή το secondary barrier, κάνοντας μικρή αλλαγή στο αρχείο εισόδου δεδομένων τύπου .in, στο κομμάτι ορισμού των ανιχνευτών (βλ. § 3.2.1.1), στο σημείο ορισμού των κορυφών του παραλληλεπιπέδου που αποτελεί τον ανιχνευτή δόσης. Εννοείται βέβαια ότι θα πρέπει να επαναληφθεί η προσομοίωση. Υπενθυμίζεται ότι όπως είναι δομημένος ο κώδικας, κάθε φορά μπορεί να χρησιμοποιείται μόνον ένας ανιχνευτής δόσης. Όμως, όπως έχει αποδειχθεί στο Κεφάλαιο 3, είναι δυνατόν ο υπολογισμός της δόσης να γίνει με πολύ καλή ακρίβεια και με τη χρήση ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. Συνεπώς, θα μπορούσε, με μία μόνο προσομοίωση να εκτιμάται η δόση σε περισσότερα του ενός σημεία, με ταυτόχρονη ενεργοποίηση και χρήση ενός ανιχνευτή δόσεως και αρκετών (έως 5) ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας. Στην παρούσα Δ.Ε. ως εφαρμογή υπολογίσθηκε η δόση πίσω από το primary barrier, μέσω ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας. Στην εικόνα 4.8 φαίνεται η γεωμετρία του προβλήματος.

Μαζί με τον ανιχνευτή δόσης ορίσθηκε στο αρχείο τύπου .in και ορισμένοι ανιχνευτές αλληλεπιδράσεων. Αυτοί οι ανιχνευτές μας δίνουν τη δυνατότητα να βλέπουμε το φάσμα ενεργειών των σωματιδίων που προσπίπτουν σε ένα σώμα. Ορίσθηκαν 5 τέτοιοι ανιχνευτές. Ως ανιχνευτής #1 θεωρείται ο τοίχος πάνω στον οποίο κατευθύνεται η πρωτεύουσα δέσμη της ακτινοβολίας (primary barrier), ανιχνευτής #2 ο ένας από τους δύο πλάγιους τοίχους του δωματίου (secondary barrier), ανιχνευτής #3 ο άλλος πλάγιος τοίχος (secondary barrier), ανιχνευτής #4 ο ιστός έξω από τον πλάγιο τοίχο και ανιχνευτής #5 ο ιστός έξω από τον τοίχο πάνω στον οποίο πέφτει η πρωτεύουσα. Εξυπακούεται ότι θα μπορούσε να ορισθεί τέτοιος ανιχνευτής σε οποιαδήποτε θέση, μέσα και έξω από το δωμάτιο. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η ευκαιρία να καταγραφεί το φάσμα που προσπίπτει πάνω στους τοίχους του δωματίου καθώς και το φάσμα που εισέρχεται στους ιστούς και ευθύνεται για την υπολογιζόμενη απορροφούμενη δόση.



Εικ. 4.8 Γεωμετρία προβλήματος υπολογισμού της δόσης σε ανθρώπινο ιστό λόγω της ακτινοβολίας της μηχανής των ακτίνων-Χ

Η προσομοίωση έγινε με τη χρήση της εντολής:

>penmain.exe<roomin.in

Η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν $1.28E+05$ sec και προσομοιώθηκαν συνολικά $6.66E+07$ ιστορίες.

Η δόση που υπολογίστηκε πως απορροφήθηκε από τον ιστό πίσω από το primary barrier και διαβάστηκε από το αρχείο εξόδου του ανιχνευτή δόσης είναι **$5.23920E-04$ eV/g·φωτόνιο** ή **$5.23920E-04 * 6.66E+07 = 34898$ eV/g = $5.58E-12$ Gy = 5.58 pGy.**

Η παραπάνω δόση στη θέση που βρίσκεται ο ιστός, η οποία είναι εξαιρετικά χαμηλή, υπολογίστηκε για έναν αυθαίρετο αριθμό ιστοριών που προσομοιώθηκαν, άρα και φωτονίων που εκπέμφθηκαν από την πηγή. Αυτός ο αριθμός των φωτονίων δίνει σε απόσταση 1 m από την πηγή μια συγκεκριμένη τιμή του μεγέθους Air Kerma (βλ. § 2.3). Καθώς ο αριθμός των φωτονίων που προσομοιώθηκαν είναι αυθαίρετος, η τιμή του Air Kerma σε απόσταση 1 m από την πηγή που προκύπτει λόγω αυτών των φωτονίων είναι και αυτή αυθαίρετη και δεν ανταποκρίνεται με κανένα τρόπο στη δόση που θα αντιστοιχούσε σε μία πραγματική ακτινολογική εξέταση.

Σε μια πραγματική ιατρική εξέταση, το μέγεθος Air Kerma στην πρωτεύουσα δέσμη και σε μία συγκεκριμένη απόσταση από τη μηχανή έχει συγκεκριμένη τιμή που εξαρτάται από το είδος της ακτινογραφίας, τα kVp και το ρεύμα που χρησιμοποιούνται, το φίλτρο καθώς και λοιπά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της λυχνίας. Τυπικές τιμές του Air Kerma μπορούν να ευρεθούν σε πίνακες και υπόκεινται σε περιορισμούς από τους διεθνείς κανονισμούς ακτινοπροστασίας. Προκειμένου λοιπόν να εκτιμηθεί η δόση που αντιστοιχεί στη θέση 1m πίσω από τη θωράκιση, θα πρέπει να γίνει μια αναγωγή της τιμής της δόσης που εκτιμήθηκε από την προηγούμενη προσομοίωση, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του Air Kerma που εκτιμάται από την προσομοίωση και της τιμής του Air-Kerma που αντιστοιχεί σε μία πραγματική ακτινολογική εξέταση στην ίδια θέση. Στο σημείο αυτό χρειάζεται προσοχή, καθώς η αναγωγή αυτή θα έχει πραγματικό νόημα, μόνο στην περίπτωση πολύ καλής στατιστικής στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Το λογισμικό προσομοίωσης για την παραγωγή του φάσματος της μηχανής (βλ. § 4.2) προκειμένου να παράγει το αντίστοιχο φάσμα, ζητά τον καθορισμό από το χρήστη της τιμής του μεγέθους Air Kerma στο 1 m από τη λυχνία. Το φάσμα αυτό δίνεται με τη μορφή ενεργειών και αριθμού φωτονίων σε καθεμιά από αυτές (βλ. § 4.2, σχήμα(4-1)). Είναι εύκολο λοιπόν με μια

απλή άθροιση του πλήθους των φωτονίων του φάσματος, ανεξαρτήτως ενέργειας, να υπολογιστεί ο συνολικός αριθμός φωτονίων που απαιτείται για την επίτευξη της τιμής του Air Kerma που έχει επιλεγεί. Κατά την προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε, με το λογισμικό της Siemens, για την παραγωγή του αρχικού φάσματος, επελέγη τιμή του Air Kerma ίση με 1 Gy στο 1m από την πηγή, εντός της πρωτεύουσας δέσμης. Μετά από άθροιση των φωτονίων που αντιστοιχούν σε κάθε ενέργεια του φάσματος βρέθηκε πως το **1 Gy Air Kerma** στο 1m από την πηγή αντιστοιχεί σε εκπομπή συνολικά **2.37E+10 φωτονίων**.

Καθώς, για τον υπολογισμό της δόσης 1m πίσω από τον τοίχο προσομοιώθηκαν 6.66E+07 φωτόνια, πολύ απλά προκύπτει ότι το Air Kerma για την προσομοίωση, 1m από τη μηχανή είναι:

$$AirKerma_{\text{προσομοίωσης}} = \frac{(6.66E + 07) * 1}{2.37E + 10} = 2.81mGy$$

Συνεπώς, αυτή η τιμή για το Air Kerma, 1m από τη μηχανή, οδηγεί σε δόση 5.58 pGy, 1m πίσω από τον τοίχο. Αν υποθεθεί ότι σε μια πραγματική ακτινογραφία η απαίτηση για την τιμή του Air Kerma σε απόσταση 1 m από τη μηχανή είναι 1 Gy, τότε με απλούς υπολογισμούς προκύπτει ότι, σύμφωνα με την προσομοίωση που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ, για μία πραγματική ακτινογραφία, η δόση 1m πίσω από τον τοίχο θα είναι:

$$Dose = \frac{(2.37E + 10) * (5.58E - 12)}{6.66E + 07} = 2nGy$$

Η τιμή αυτή της δόσης για μία εξέταση που υπολογίστηκε από την προσομοίωση, θα μπορούσε να αποτελέσει την αρχική πληροφορία για τον υπολογισμό της επάρκειας της θωράκισης, ή για τον δοσιμετρικό υπολογισμό σε μία συγκεκριμένη θέση, πίσω από έναν τοίχο, με συγκεκριμένα υλικά και πάχη, για συγκεκριμένο πλήθος και τύπο εξετάσεων. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι θα μπορούσε από την αρχή να σχεδιασθεί η προσομοίωση, έτσι ώστε να εκτιμήσει απευθείας τη δόση πίσω από τον τοίχο, για προεπιλεγμένο πλήθος ιστοριών, δηλαδή τελικά για προεπιλεγμένη τιμή του Air-Kerma 1m από τη μηχανή, που αντιστοιχεί σε μία πραγματική εξέταση. Η διάρκεια της προσομοίωσης όμως θα ήταν πολύ μεγαλύτερη, καθώς θα έπρεπε να προσομοιωθεί πολύ μεγαλύτερο πλήθος φωτονίων. Για παράδειγμα, στην προσομοίωση που περιγράφεται στην παράγραφο αυτή θα έπρεπε να προσομοιωθούν συνολικά $2.37 \cdot 10^{10}$ φωτόνια, κάτι που θα απαιτούσε συνολικά χρόνο:

$$time = \frac{(2.37 \cdot 10^{10}) * (1.28 \cdot 10^5)}{6.66 \cdot 10^7} = 4.54 \cdot 10^6 \text{ sec} = 53 \text{ days}$$

Εξυπακούεται ότι η προσομοίωση καθώς και όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί είναι δυνατόν να γίνουν για οποιαδήποτε θέση γύρω, ή και μέσα στο δωμάτιο, και να υπολογισθούν οι δόσεις λόγω της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας ή της ακτινοβολίας διαρροής.

Μία άλλη πληροφορία που μας παρέχει η προσομοίωση είναι το ενεργειακό φάσμα των ακτίνων-X που φτάνουν σε κάθε θέσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των καταλλήλων ανιχνευτών αλληλεπίδρασης. Ενδεικτικά, στο τέλος του Κεφαλαίου παρουσιάζεται μια σειρά από διαγράμματα που προέκυψαν μετά την απεικόνιση των αρχείων αποτελεσμάτων των ανιχνευτών αλληλεπίδρασης οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση. Στο διάγραμμα 4-4 παρουσιάζεται το φάσμα της λυχνίας της μηχανής των ακτίνων X που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Στη συνέχεια, στο διάγραμμα 4-5 παρουσιάζεται το φάσμα που καταγράφει ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης #1, το φάσμα δηλαδή που προκύπτει μετά τη σκέδαση της πρωτεύουσας δέσμης πάνω στο ανθρωπόμορφο σκεδαστή της ακτινοβολίας. Είναι εμφανές το υψηλό φιλτράρισμα που υπόκεινται τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών ενώ και στις υψηλότερες ενέργειες τα φωτόνια υπόκεινται και αυτά σε ένα φιλτράρισμα όχι βέβαια ικανό να τα ανακόψει τελείως. Ακολουθεί το φάσμα που καταγράφεται από τον ιστό-ανιχνευτή έξω από το primary barrier στο διάγραμμα 4-6. Παρατηρείται ότι στο φάσμα αυτό υπάρχει έντονη αποκοπή των φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Στα διαγράμματα 4-7 και 4-8 παρουσιάζονται τα φάσματα της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στους δύο πλαϊνούς τοίχους του δωματίου (secondary barriers), τα φάσματα αυτά είναι όμοια μεταξύ τους όπως αναμενόταν, λόγω συμμετρίας του δωματίου. Πρόκειται για το φάσμα της σκεδαζόμενης μέσα στο δωμάτιο ακτινοβολίας που προέρχεται από τη σκέδαση της πρωτεύουσας δέσμης πάνω στον σκεδαστή (phantom) και τους τοίχους. Τέλος, στο διάγραμμα 4-9 παρουσιάζεται το φάσμα που απορροφάται από τον ιστό που βρίσκεται πίσω από το secondary barrier.

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που έδωσε η προσομοίωση της λειτουργίας της ακτινογραφικής λυχνίας μέσα σε χώρο με σκεδαστή ακτινοβολίας, έγινε και νέα προσομοίωση με μοναδική διαφορά ότι δεν υπήρχε σκεδαστής ακτινοβολίας. Η κατάσταση αυτή είναι λιγότερο ρεαλιστική από την προηγούμενη αφού σε κάθε περίπτωση μέσα στο δωμάτιο υπάρχει πάντα

κάτι που μπορεί να θεωρηθεί ως σκεδαστής. Αυτό μπορεί να είναι το ακτινολογικό τραπέζι, το φιλμ αλλά και ο ίδιος ο ασθενής.

Στην περίπτωση μη ύπαρξης σκεδαστή η πρωτεύουσα δέσμη της ακτινοβολίας προσπίπτει κατευθείαν πάνω στον τοίχο που θεωρείται ως primary barrier. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία σε αυτή την περίπτωση προέρχεται από τη σκέδαση της πρωτεύουσας δέσμης πάνω στους διάφορους τοίχους του δωματίου αφού δεν υπάρχει κάτι άλλο μέσα στο δωμάτιο που να προκαλεί τη σκέδαση της δέσμης. Στην περίπτωση αυτή υπολογίσθηκε η δόση σε ιστό με το ίδιο σχήμα και διαστάσεις έξω από το primary barrier και συγκρίθηκε η τιμή αυτή με την τιμή που προέκυψε στην προηγούμενη περίπτωση με τον σκεδαστή. Σημειώνεται ότι η σύγκριση αυτή έγινε μεταξύ των σχετικών τιμών της δόσης, των τιμών δηλαδή που έδωσε το dose enclosure και όχι μεταξύ των πραγματικών τιμών που αντιστοιχούν σε μία πραγματική εξέταση που γίνεται με τη μηχανή. Για το λόγο αυτό έγινε προσομοίωση για το ίδιο περίπου πλήθος ιστοριών και στις δύο περιπτώσεις. Χωρίς το σκεδαστή προσομοιώθηκαν $5.03E+07$ ιστορίες ενώ η προσομοίωση έγινε σε χρόνο $1.191005E+05$ sec. Ο ανιχνευτής δόσης έδωσε μια δόση **8.2E-04 eV/g·φωτόνιο** ή **41246 eV/g**. Η δόση αυτή είναι:

$$\frac{8.2 \cdot 10^{-4} - 5.2 \cdot 10^{-4}}{5.2 \cdot 10^{-4}} = 0.58 = 58\%$$

αυξημένη κατά 58% από την αντίστοιχη δόση, όταν υπάρχει και ο σκεδαστής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι φτάνουν πολύ περισσότερα φωτόνια υψηλής ενέργειας στον τοίχο αφού δεν υπάρχει ενδιάμεσα το υλικό στο οποίο θα μπορούσαν να σκεδαστούν και να χάσουν ενέργεια. Η προσομοίωση έδωσε λοιπόν ποιοτικά το αποτέλεσμα που αναμένετο να δώσει, μεγαλύτερη δόση στην περίπτωση έλλειψης σκεδαστή της πρωτεύουσας δέσμης μέσα στο δωμάτιο.

Στο τελευταίο τμήμα που αφορά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης της δόσης λόγω της διαρρέουσας ακτινοβολίας. Η μορφή του φάσματος διαρρέουσας λεπτομερώς στην παράγραφο 4.5, όπου αναπτύχθηκε και μια κατάλληλη τεχνική για τη δημιουργία του. Η δόση από τη διαρρέουσα υπολογίζεται μέσα στο δωμάτιο αυτή τη φορά και όχι σε χώρους έξω από αυτό όπως στις προηγούμενες. Αυτό συμβαίνει γιατί η ποσότητα της διαρρέουσας ακτινοβολίας είναι μικρότερη σε σχέση τόσο με την ποσότητα της πρωτεύουσας βέβαια, όσο και με αυτή της σκεδαζόμενης. Σαν αποτέλεσμα έχουμε τη θωράκιση που υπολογίζεται για τα δύο παραπάνω ήδη να επαρκεί και για τη διαρρέουσα τελικά. Επομένως

αυτό που μας μένει να υπολογίσουμε είναι η δόση που αυτή προκαλεί μέσα στο δωμάτιο και έναν τρόπο ώστε να μειώσουμε αυτή τη δόση σε αποδεκτά επίπεδα. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας προχωρούμε στον υπολογισμό της δόσης λόγω της διαρρέουσα μέσα στο δωμάτιο σε ιστό που είναι τοποθετημένος σε απόσταση 1m πίσω από τη λυχνία. Η δόση αυτή όπως αναφέρθηκε και παραπάνω (βλ. §4.5.2.2) έχει την τιμή **9.4109E-03 eV/g·φωτόνιο**.

Από τη μεθοδολογία, τα διαγράμματα και τα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται φανερό ότι είναι δυνατό και μάλιστα με σχετική ευκολία να χρησιμοποιηθεί ο κώδικας PENELOPE, και ειδικότερα ο κώδικας χρήστη PENMAIN, για τον υπολογισμό της δόσης που συνεπάγεται η χρήση μίας συγκεκριμένης μηχανής ακτίνων-X, μέσα σε ένα δωμάτιο ή και άλλους χώρους γύρω από αυτό. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη διερεύνηση της επάρκειας θωρακίσεων, αλλά και για τη σχεδίαση επιπλέον θωρακίσεων. Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε είναι απλή και γενική και σκοπό έχει τη διατύπωση μιας ιδέας χειρισμού του υπολογισμού θωρακίσεων που μπορεί κάλλιστα να αναπτυχθεί περαιτέρω έτσι ώστε να γίνει περισσότερο χρηστική και ακριβής.

Πίνακες Κεφαλαίου 4

Πίνακας 4-1 Αρχείο γεωμετρίας room.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
GEOMETRY FOR SIMULATION OF PRIMARY + SCATTERED RADIATION
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) Plane Z=250cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 2.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) Plane Z=260cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 2.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) Plane Y=-160cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(+1.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) Plane Y=160cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-1.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) Plane X=-150
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(+1.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) Plane X=150
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-1.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) Plane Z=-250cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=(-2.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) Plane Z=-260cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=(-2.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) Plane Y=150cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
```


(...συνέχεια πίνακα 4-1)

```
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 4)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 5)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 6)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 7)
MATERIAL( 3) WATER
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 17), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 18), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 8)
MATERIAL( 4) TISSUE
SURFACE ( 19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 20), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 21), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 9)
MATERIAL( 4) TISSUE
SURFACE ( 22), SIDE POINTER=(-1)
```

(...συνέχεια πίνακα 4-1)

```
SURFACE ( 23), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 24), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 10)
MATERIAL( 4) TISSUE
SURFACE ( 25), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 26), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 27), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE ( 11)
MATERIAL( 2) AIR
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(+1)
BODY ( 7)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE ( 12)
MATERIAL( 2) AIR
SURFACE ( 12), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 28), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 29), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 30), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 31), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 32), SIDE POINTER=(+1)
BODY ( 1)
BODY ( 2)
BODY ( 3)
BODY ( 4)
BODY ( 5)
BODY ( 6)
BODY ( 8)
BODY ( 9)
BODY ( 10)
MODULE ( 11)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Πίνακας 4-2 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης roomin.in

```
TITLE primary + scattered radiation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Pr.particles: 1=electron,2=photon,3=positron]
SPECTR 8e3 0.0
SPECTR 9e3 0.000254582
SPECTR 10e3 0.276434
SPECTR 11e3 20.0645
SPECTR 12e3 561.329
SPECTR 13e3 7.39657e3
SPECTR 14e3 7.63167e4
SPECTR 15e3 4.35739e5
SPECTR 16e3 1.72505e6
SPECTR 17e3 4.89426e6
SPECTR 18e3 1.02026e7
SPECTR 19e3 1.92874e7
SPECTR 20e3 3.31517e7
SPECTR 21e3 4.85308e7
SPECTR 22e3 6.83822e7
SPECTR 23e3 9.32224e7
SPECTR 24e3 1.20438e8
SPECTR 25e3 1.50938e8
SPECTR 26e3 1.82038e8
SPECTR 27e3 2.15834e8
SPECTR 28e3 2.49222e8
SPECTR 29e3 2.84627e8
SPECTR 30e3 3.15372e8
SPECTR 31e3 3.38008e8
SPECTR 32e3 3.58137e8
SPECTR 33e3 3.78396e8
SPECTR 34e3 3.93965e8
SPECTR 35e3 4.08099e8
SPECTR 36e3 4.19754e8
SPECTR 37e3 4.30314e8
SPECTR 38e3 4.39604e8
SPECTR 39e3 4.48359e8
SPECTR 40e3 4.53363e8
SPECTR 41e3 4.53977e8
SPECTR 42e3 4.53708e8
SPECTR 43e3 4.53472e8
SPECTR 44e3 4.50506e8
SPECTR 45e3 4.46268e8
SPECTR 46e3 4.45172e8
SPECTR 47e3 4.43677e8
SPECTR 48e3 4.36123e8
```

(...συνέχεια πίνακα 4-2)

SPECTR	49e3	4.28036e8
SPECTR	50e3	4.21959e8
SPECTR	51e3	4.14121e8
SPECTR	52e3	4.0626e8
SPECTR	53e3	3.98048e8
SPECTR	54e3	3.92786e8
SPECTR	55e3	3.87335e8
SPECTR	56e3	5.19765e8
SPECTR	57e3	6.5408e8
SPECTR	58e3	7.68688e8
SPECTR	59e3	8.83857e8
SPECTR	60e3	6.36106e8
SPECTR	61e3	3.83676e8
SPECTR	62e3	3.48119e8
SPECTR	63e3	3.12065e8
SPECTR	64e3	3.03621e8
SPECTR	65e3	2.94165e8
SPECTR	66e3	3.79895e8
SPECTR	67e3	4.6615e8
SPECTR	68e3	3.82211e8
SPECTR	69e3	2.95575e8
SPECTR	70e3	2.52568e8
SPECTR	71e3	2.09379e8
SPECTR	72e3	1.99922e8
SPECTR	73e3	1.89634e8
SPECTR	74e3	1.86378e8
SPECTR	75e3	1.83647e8
SPECTR	76e3	1.78093e8
SPECTR	77e3	1.7167e8
SPECTR	78e3	1.67562e8
SPECTR	79e3	1.60962e8
SPECTR	80e3	1.56542e8
SPECTR	81e3	1.49077e8
SPECTR	82e3	1.47948e8
SPECTR	83e3	1.42878e8
SPECTR	84e3	1.37046e8
SPECTR	85e3	1.31155e8
SPECTR	86e3	1.28035e8
SPECTR	87e3	1.24993e8
SPECTR	88e3	1.19391e8
SPECTR	89e3	1.13729e8
SPECTR	90e3	1.09139e8
SPECTR	91e3	1.04418e8
SPECTR	92e3	9.94269e7
SPECTR	93e3	9.40533e7

(...συνέχεια πίνακα 4-2)

```
SPECTR 94e3 8.98486e7
SPECTR 95e3 8.5661e7
SPECTR 96e3 8.2362e7
SPECTR 97e3 7.90896e7
SPECTR 98e3 7.47937e7
SPECTR 99e3 7.04915e7
SPECTR 100e3 6.71814e7
SPECTR 101e3 6.37154e7
SPECTR 102e3 5.92376e7
SPECTR 103e3 5.44219e7
SPECTR 104e3 5.07677e7
SPECTR 105e3 4.71609e7
SPECTR 106e3 4.2894e7
SPECTR 107e3 3.87263e7
SPECTR 108e3 3.50264e7
SPECTR 109e3 3.11001e7
SPECTR 110e3 2.73025e7
SPECTR 111e3 2.37063e7
SPECTR 112e3 2.01695e7
SPECTR 113e3 1.71175e7
SPECTR 114e3 1.33647e7
SPECTR 115e3 9.57218e6
SPECTR 116e3 6.77714e6
SPECTR 117e3 4.2867e6
SPECTR 118e3 2.3407e6
SPECTR 119e3 7.36959e5
SPECTR 120e3 1.42517e5
SPECTR 121e3 -0.0
SPOSIT 0,0,0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0,0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 7 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 4 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAN 1 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPAN 2 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPAN 3 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPAN 4 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2

PFNAME pri_sca.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN room.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles.
```

(...συνέχεια πίνακα 4-2)

```
NBE      10e1,120e3,100  [E-interval and no. of en. bins]
NBTH     90              [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH     3              [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Impact detectors (up to 5 different detectors).
IMPDET 10e2 120e3 100 0  [En. window, no. of channels]
IDSPC  pm_spc_impdet_1.dat [Output spectrum file name]
IDBODY 1  [Active body; one line for each active body]

IMPDET 10e2 120e3 100 0  [En. window, no. of channels]
IDSPC  pm_spc_impdet_2.dat [Output spectrum file name]
IDBODY 3  [Active body; one line for each active body]

IMPDET 10e2 120e3 100 0  [En. window, no. of channels]
IDSPC  pm_spc_impdet_3.dat [Output spectrum file name]
IDBODY 4  [Active body; one line for each active body]

IMPDET 10e2 120e3 100    [En. window, no. of channels]
IDSPC  pm_spc_impdet_4.dat [Output spectrum file name]
IDBODY 8  [Active body; one line for each active body]

IMPDET 10e2 120e3 100 0  [En. window, no. of channels]
IDSPC  pm_spc_impdet_5.dat [Output spectrum file name]
IDBODY 10 [Active body; one line for each active body]

>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX  -20 20
GRIDY  -20 20
GRIDZ   360 380
GRIDBN 1 1 1

>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  60        [Dumping period, in sec]

TIME    2.0e5    [Allotted simulation time, in sec]
```

Πίνακας 4-3 Αρχείο γεωμετρίας room2.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
CONCRETE ROOM
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) Plane Z=250cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 2.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) Plane Z=260cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 2.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) Plane Y=-160cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(+1.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) Plane Y=160cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-1.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) Plane X=-150
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(+1.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) Plane X=150
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-1.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) Plane Z=-250cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=(-2.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) Plane Z=-260cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=(-2.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) Plane Y=150cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-1.500000000000000E+02, 0)
```


(...συνέχεια πίνακα 4-3)

```

    AX=( 1.0000000000000000E+00,  0)
    A0=(-1.7000000000000000E+02,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 20)   Plane X=-200
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
    AX=( 1.0000000000000000E+00,  0)
    A0=(+2.0000000000000000E+02,  0)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 1)
MATERIAL( 2)   CONCRETE
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)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 2)
MATERIAL( 2)   CONCRETE
SURFACE ( 7),  SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 8),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4),  SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6),  SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 3)
MATERIAL( 2)   CONCRETE
SURFACE ( 9),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4),  SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 1),  SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6),  SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 4)
MATERIAL( 2)   CONCRETE
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 1),  SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5),  SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6),  SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 5)

```

(...συνέχεια πίνακα 4-3)

```
MATERIAL( 2) CONCRETE
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 6)
MATERIAL( 2) CONCRETE
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 20), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 7)
MATERIAL( 1) AIR
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 8)
MATERIAL( 3) tissue
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 15), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
MODULE ( 9)
MATERIAL( 1) AIR
SURFACE ( 15), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 17), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 18), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 19), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 20), SIDE POINTER=(+1)
BODY ( 1)
BODY ( 2)
BODY ( 3)
BODY ( 4)
BODY ( 5)
BODY ( 6)
BODY ( 8)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Πίνακας 4-4 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης roomin2.in

TITLE room + dose enclosure.

>>>>>>> Source definition.

SKPAR 2 [Pr.particles:1=electron,2=photon,3=positron]

SPECTR 8e3 0.0

SPECTR 9e3 0.000254582

SPECTR 10e3 0.276434

SPECTR 11e3 20.0645

SPECTR 12e3 561.329

SPECTR 13e3 7.39657e3

SPECTR 14e3 7.63167e4

SPECTR 15e3 4.35739e5

SPECTR 16e3 1.72505e6

SPECTR 17e3 4.89426e6

SPECTR 18e3 1.02026e7

SPECTR 19e3 1.92874e7

SPECTR 20e3 3.31517e7

SPECTR 21e3 4.85308e7

SPECTR 22e3 6.83822e7

SPECTR 23e3 9.32224e7

SPECTR 24e3 1.20438e8

SPECTR 25e3 1.50938e8

SPECTR 26e3 1.82038e8

SPECTR 27e3 2.15834e8

SPECTR 28e3 2.49222e8

SPECTR 29e3 2.84627e8

SPECTR 30e3 3.15372e8

SPECTR 31e3 3.38008e8

SPECTR 32e3 3.58137e8

SPECTR 33e3 3.78396e8

SPECTR 34e3 3.93965e8

SPECTR 35e3 4.08099e8

SPECTR 36e3 4.19754e8

SPECTR 37e3 4.30314e8

SPECTR 38e3 4.39604e8

SPECTR 39e3 4.48359e8

SPECTR 40e3 4.53363e8

SPECTR 41e3 4.53977e8

SPECTR 42e3 4.53708e8

SPECTR 43e3 4.53472e8

SPECTR 44e3 4.50506e8

SPECTR 45e3 4.46268e8

SPECTR 46e3 4.45172e8

SPECTR 47e3 4.43677e8

SPECTR 48e3 4.36123e8

(...συνέχεια πίνακα 4-4)

SPECTR 49e3 4.28036e8
SPECTR 50e3 4.21959e8
SPECTR 51e3 4.14121e8
SPECTR 52e3 4.0626e8
SPECTR 53e3 3.98048e8
SPECTR 54e3 3.92786e8
SPECTR 55e3 3.87335e8
SPECTR 56e3 5.19765e8
SPECTR 57e3 6.5408e8
SPECTR 58e3 7.68688e8
SPECTR 59e3 8.83857e8
SPECTR 60e3 6.36106e8
SPECTR 61e3 3.83676e8
SPECTR 62e3 3.48119e8
SPECTR 63e3 3.12065e8
SPECTR 64e3 3.03621e8
SPECTR 65e3 2.94165e8
SPECTR 66e3 3.79895e8
SPECTR 67e3 4.6615e8
SPECTR 68e3 3.82211e8
SPECTR 69e3 2.95575e8
SPECTR 70e3 2.52568e8
SPECTR 71e3 2.09379e8
SPECTR 72e3 1.99922e8
SPECTR 73e3 1.89634e8
SPECTR 74e3 1.86378e8
SPECTR 75e3 1.83647e8
SPECTR 76e3 1.78093e8
SPECTR 77e3 1.7167e8
SPECTR 78e3 1.67562e8
SPECTR 79e3 1.60962e8
SPECTR 80e3 1.56542e8
SPECTR 81e3 1.49077e8
SPECTR 82e3 1.47948e8
SPECTR 83e3 1.42878e8
SPECTR 84e3 1.37046e8
SPECTR 85e3 1.31155e8
SPECTR 86e3 1.28035e8
SPECTR 87e3 1.24993e8
SPECTR 88e3 1.19391e8
SPECTR 89e3 1.13729e8
SPECTR 90e3 1.09139e8
SPECTR 91e3 1.04418e8
SPECTR 92e3 9.94269e7
SPECTR 93e3 9.40533e7

(...συνέχεια πίνακα 4-4)

```
SPECTR 94e3 8.98486e7
SPECTR 95e3 8.5661e7
SPECTR 96e3 8.2362e7
SPECTR 97e3 7.90896e7
SPECTR 98e3 7.47937e7
SPECTR 99e3 7.04915e7
SPECTR 100e3 6.71814e7
SPECTR 101e3 6.37154e7
SPECTR 102e3 5.92376e7
SPECTR 103e3 5.44219e7
SPECTR 104e3 5.07677e7
SPECTR 105e3 4.71609e7
SPECTR 106e3 4.2894e7
SPECTR 107e3 3.87263e7
SPECTR 108e3 3.50264e7
SPECTR 109e3 3.11001e7
SPECTR 110e3 2.73025e7
SPECTR 111e3 2.37063e7
SPECTR 112e3 2.01695e7
SPECTR 113e3 1.71175e7
SPECTR 114e3 1.33647e7
SPECTR 115e3 9.57218e6
SPECTR 116e3 6.77714e6
SPECTR 117e3 4.2867e6
SPECTR 118e3 2.3407e6
SPECTR 119e3 7.36959e5
SPECTR 120e3 1.42517e5
SPECTR 121e3 -0.0
SPOSIT 0,0,0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0,0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 7 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 3 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAN 1 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPAN 2 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPAN 3 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2

PFNAME room.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN room2.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles.
NBE 10e1,120e3,50 [E-interval and no. of en.bins]
```

(...συνέχεια πίνακα 4-4)

```
NBTH  90          [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH   3          [No. of bins for the azimuthal angle PHI]
```

```
>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1.5e2,120e3,100 [En.window and num. of channels]
EDSPC  pm_spc_enddet_1.dat
EDBODY 1              [Active body; one line for each body]
```

```
>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 5).
ENDDET 1.5e2,120e3,100 [En.window and num. of channels]
EDSPC  pm_spc_enddet_2.dat
EDBODY 8              [Active body; one line for each body]
```

```
>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX  -20,20
GRIDY  -20,20
GRIDZ  360,380
GRIDBN 1,1,1
```

```
>>>>>>> Job properties
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP  60        [Dumping period, in sec]
```

```
TIME  2.0e5      [Allotted simulation time, in sec]
```

Πίνακας 4-5 Αρχείο γεωμετρίας leak.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
LEAKAGE RADIATION Pb
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) sfere R=5cm
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=( 5.0000000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 5.0000000000000000E+00, 0)
Z-SCALE=( 5.0000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) sfere R=5.25cm
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=( 5.2500000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 5.2500000000000000E+00, 0)
Z-SCALE=( 5.2500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 1)
MATERIAL( 1) air
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 2)
MATERIAL( 2) lead
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Πίνακας 4-6 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης leakin.in

TITLE room + leakage radiation Pb.

>>>>>>> Source definition.

SKPAR 2 [Pr. particles:1=electron,2=photon,3=positron]

SPECTR 8e3 0.0

SPECTR 9e3 0.000254582

SPECTR 10e3 0.276434

SPECTR 11e3 20.0645

SPECTR 12e3 561.329

SPECTR 13e3 7.39657e3

SPECTR 14e3 7.63167e4

SPECTR 15e3 4.35739e5

SPECTR 16e3 1.72505e6

SPECTR 17e3 4.89426e6

SPECTR 18e3 1.02026e7

SPECTR 19e3 1.92874e7

SPECTR 20e3 3.31517e7

SPECTR 21e3 4.85308e7

SPECTR 22e3 6.83822e7

SPECTR 23e3 9.32224e7

SPECTR 24e3 1.20438e8

SPECTR 25e3 1.50938e8

SPECTR 26e3 1.82038e8

SPECTR 27e3 2.15834e8

SPECTR 28e3 2.49222e8

SPECTR 29e3 2.84627e8

SPECTR 30e3 3.15372e8

SPECTR 31e3 3.38008e8

SPECTR 32e3 3.58137e8

SPECTR 33e3 3.78396e8

SPECTR 34e3 3.93965e8

SPECTR 35e3 4.08099e8

SPECTR 36e3 4.19754e8

SPECTR 37e3 4.30314e8

SPECTR 38e3 4.39604e8

SPECTR 39e3 4.48359e8

SPECTR 40e3 4.53363e8

SPECTR 41e3 4.53977e8

SPECTR 42e3 4.53708e8

SPECTR 43e3 4.53472e8

SPECTR 44e3 4.50506e8

SPECTR 45e3 4.46268e8

SPECTR 46e3 4.45172e8

SPECTR 47e3 4.43677e8

SPECTR 48e3 4.36123e8

(...συνέχεια πίνακα 4-6)

SPECTR	49e3	4.28036e8
SPECTR	50e3	4.21959e8
SPECTR	51e3	4.14121e8
SPECTR	52e3	4.0626e8
SPECTR	53e3	3.98048e8
SPECTR	54e3	3.92786e8
SPECTR	55e3	3.87335e8
SPECTR	56e3	5.19765e8
SPECTR	57e3	6.5408e8
SPECTR	58e3	7.68688e8
SPECTR	59e3	8.83857e8
SPECTR	60e3	6.36106e8
SPECTR	61e3	3.83676e8
SPECTR	62e3	3.48119e8
SPECTR	63e3	3.12065e8
SPECTR	64e3	3.03621e8
SPECTR	65e3	2.94165e8
SPECTR	66e3	3.79895e8
SPECTR	67e3	4.6615e8
SPECTR	68e3	3.82211e8
SPECTR	69e3	2.95575e8
SPECTR	70e3	2.52568e8
SPECTR	71e3	2.09379e8
SPECTR	72e3	1.99922e8
SPECTR	73e3	1.89634e8
SPECTR	74e3	1.86378e8
SPECTR	75e3	1.83647e8
SPECTR	76e3	1.78093e8
SPECTR	77e3	1.7167e8
SPECTR	78e3	1.67562e8
SPECTR	79e3	1.60962e8
SPECTR	80e3	1.56542e8
SPECTR	81e3	1.49077e8
SPECTR	82e3	1.47948e8
SPECTR	83e3	1.42878e8
SPECTR	84e3	1.37046e8
SPECTR	85e3	1.31155e8
SPECTR	86e3	1.28035e8
SPECTR	87e3	1.24993e8
SPECTR	88e3	1.19391e8
SPECTR	89e3	1.13729e8
SPECTR	90e3	1.09139e8
SPECTR	91e3	1.04418e8
SPECTR	92e3	9.94269e7
SPECTR	93e3	9.40533e7

(...συνέχεια πίνακα 4-6)

```
SPECTR 94e3 8.98486e7
SPECTR 95e3 8.5661e7
SPECTR 96e3 8.2362e7
SPECTR 97e3 7.90896e7
SPECTR 98e3 7.47937e7
SPECTR 99e3 7.04915e7
SPECTR 100e3 6.71814e7
SPECTR 101e3 6.37154e7
SPECTR 102e3 5.92376e7
SPECTR 103e3 5.44219e7
SPECTR 104e3 5.07677e7
SPECTR 105e3 4.71609e7
SPECTR 106e3 4.2894e7
SPECTR 107e3 3.87263e7
SPECTR 108e3 3.50264e7
SPECTR 109e3 3.11001e7
SPECTR 110e3 2.73025e7
SPECTR 111e3 2.37063e7
SPECTR 112e3 2.01695e7
SPECTR 113e3 1.71175e7
SPECTR 114e3 1.33647e7
SPECTR 115e3 9.57218e6
SPECTR 116e3 6.77714e6
SPECTR 117e3 4.2867e6
SPECTR 118e3 2.3407e6
SPECTR 119e3 7.36959e5
SPECTR 120e3 1.42517e5
SPECTR 121e3 -0.0
SPOSIT 0,0,0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0,0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 7 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 2 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAN 1 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPAN 2 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2

PFNAME airlead.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN leak.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles
NBE 10e1,120e3,100 [E-interval and no. of en. bins]
NBTH 90 [No. of bins for the polar angle THETA]
```

(...συνέχεια πίνακα 4-6)

NBPH 3 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Job properties

RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]

DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]

DUMPP 60 [Dumping period, in sec]

TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

Πίνακας 4-7 Αρχείο γεωμετρίας leak_pb.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
LEAKAGE RADIATION
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) Plane Z=250cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 2.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) Plane Z=260cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 2.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) Plane Y=-160cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
A0=(+1.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) Plane Y=160cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
A0=(-1.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) Plane X=-150
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AX=( 1.000000000000000E+00, 0)
A0=(+1.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) Plane X=150
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AX=( 1.000000000000000E+00, 0)
A0=(-1.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) Plane Z=-250cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=(-2.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) Plane Z=-260cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=(-2.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) Plane Y=150cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
A0=(-1.500000000000000E+02, 0)
```


(...συνέχεια πίνακα 4-7)

```

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 10)   Plane Y=-150cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
          AY=( 1.0000000000000000E+00,  0)
          A0=(+1.5000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 11)   Plane X=160
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
          AX=( 1.0000000000000000E+00,  0)
          A0=(-1.6000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 12)   Plane X=-160
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
          AX=( 1.0000000000000000E+00,  0)
          A0=(+1.6000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 13)   Cylinder R=20cm
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 2.0000000000000000E+01,  0)
Y-SCALE=( 2.0000000000000000E+01,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 14)   Plane Z=-100cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1, -1)
Z-SHIFT=(-1.0000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 15)   Plane Z=-120cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1, -1)
Z-SHIFT=(-1.2000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 16)   Plane X=-200
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
          AX=( 1.0000000000000000E+00,  0)
          A0=(+2.0000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 1)
MATERIAL( 1)   CONCRETE
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)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      ( 2)
MATERIAL( 1)   CONCRETE

```

(...συνέχεια πίνακα 4-7)

```
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 3)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 4)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 5)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 6)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 7)
MATERIAL( 3) tissue
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 15), SIDE POINTER=(+1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

(...συνέχεια πίνακα 4-7)

```
MODULE ( 8)
MATERIAL( 2) AIR
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(+1)
BODY ( 7)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Πίνακας 4-8 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης leakin_pb.in

```
TITLE room + leakage radiation.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Pr. particles:1=electron,2=photon,3=positron]
SPECTR 7.05E+02 1.00E-35
SPECTR 1.91E+03 1.00E-35
SPECTR 3.12E+03 1.00E-35
SPECTR 4.33E+03 1.00E-35
SPECTR 5.54E+03 1.00E-35
SPECTR 6.75E+03 1.00E-35
SPECTR 7.96E+03 1.00E-35
SPECTR 9.17E+03 3.60E-10
SPECTR 1.04E+04 1.80E-10
SPECTR 1.16E+04 1.00E-35
SPECTR 1.28E+04 1.80E-10
SPECTR 1.40E+04 1.00E-35
SPECTR 1.52E+04 1.00E-35
SPECTR 1.64E+04 1.00E-35
SPECTR 1.76E+04 1.00E-35
SPECTR 1.88E+04 1.00E-35
SPECTR 2.00E+04 1.00E-35
SPECTR 2.13E+04 1.00E-35
SPECTR 2.25E+04 1.00E-35
SPECTR 2.37E+04 1.00E-35
SPECTR 2.49E+04 1.00E-35
SPECTR 2.61E+04 1.00E-35
SPECTR 2.73E+04 1.00E-35
SPECTR 2.85E+04 1.00E-35
SPECTR 2.97E+04 1.00E-35
SPECTR 3.09E+04 1.00E-35
SPECTR 3.21E+04 1.00E-35
SPECTR 3.33E+04 1.00E-35
SPECTR 3.46E+04 1.00E-35
SPECTR 3.58E+04 1.00E-35
SPECTR 3.70E+04 1.00E-35
SPECTR 3.82E+04 1.00E-35
SPECTR 3.94E+04 1.00E-35
SPECTR 4.06E+04 1.00E-35
SPECTR 4.18E+04 1.00E-35
SPECTR 4.30E+04 1.00E-35
SPECTR 4.42E+04 1.00E-35
SPECTR 4.54E+04 1.00E-35
SPECTR 4.66E+04 1.00E-35
SPECTR 4.79E+04 1.00E-35
SPECTR 4.91E+04 1.00E-35
```

(...συνέχεια πίνακα 4-8)

SPECTR	5.03E+04	1.00E-35
SPECTR	5.15E+04	1.00E-35
SPECTR	5.27E+04	1.00E-35
SPECTR	5.39E+04	1.00E-35
SPECTR	5.51E+04	1.00E-35
SPECTR	5.63E+04	1.80E-10
SPECTR	5.75E+04	1.00E-35
SPECTR	5.87E+04	1.00E-35
SPECTR	5.99E+04	1.00E-35
SPECTR	6.12E+04	1.80E-10
SPECTR	6.24E+04	1.80E-10
SPECTR	6.36E+04	1.00E-35
SPECTR	6.48E+04	3.60E-10
SPECTR	6.60E+04	5.40E-10
SPECTR	6.72E+04	8.99E-10
SPECTR	6.84E+04	1.62E-09
SPECTR	6.96E+04	2.16E-09
SPECTR	7.08E+04	1.62E-09
SPECTR	7.20E+04	3.24E-09
SPECTR	7.32E+04	2.52E-09
SPECTR	7.45E+04	7.91E-09
SPECTR	7.57E+04	5.76E-09
SPECTR	7.69E+04	6.65E-09
SPECTR	7.81E+04	9.17E-09
SPECTR	7.93E+04	1.46E-08
SPECTR	8.05E+04	1.85E-08
SPECTR	8.17E+04	1.85E-08
SPECTR	8.29E+04	2.12E-08
SPECTR	8.41E+04	2.45E-08
SPECTR	8.53E+04	3.08E-08
SPECTR	8.65E+04	3.36E-08
SPECTR	8.78E+04	3.89E-08
SPECTR	8.90E+04	1.00E-35
SPECTR	9.02E+04	1.00E-35
SPECTR	9.14E+04	1.00E-35
SPECTR	9.26E+04	1.00E-35
SPECTR	9.38E+04	1.00E-35
SPECTR	9.50E+04	1.00E-35
SPECTR	9.62E+04	1.00E-35
SPECTR	9.74E+04	1.00E-35
SPECTR	9.86E+04	1.00E-35
SPECTR	9.98E+04	1.00E-35
SPECTR	1.01E+05	1.00E-35
SPECTR	1.02E+05	1.00E-35
SPECTR	1.03E+05	1.00E-35

(...συνέχεια πίνακα 4-8)

```
SPECTR 1.05E+05      1.00E-35
SPECTR 1.06E+05      1.00E-35
SPECTR 1.07E+05      1.00E-35
SPECTR 1.08E+05      1.00E-35
SPECTR 1.10E+05      1.00E-35
SPECTR 1.11E+05      1.00E-35
SPECTR 1.12E+05      1.00E-35
SPECTR 1.13E+05      1.00E-35
SPECTR 1.14E+05      1.00E-35
SPECTR 1.16E+05      1.00E-35
SPECTR 1.17E+05      1.00E-35
SPECTR 1.18E+05      1.00E-35
SPECTR 1.19E+05      1.00E-35
SPECTR 1.20E+05      -0.0
SPOSIT 0,0,0          [Coordinates of the source]
SDIREC 180,0         [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 90             [Beam aperture, in deg]
```

>>>>>>> Material data and simulation parameters.

```
NMAT 3 [Number of different materials, .le.10]
SIMPARG 1 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPARG 2 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPARG 3 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
```

```
PFNAME leak.mat [Material definition file, 20 chars]
```

>>>>>>> Geometry definition file.

```
GEOMFN leak_pb.geo [Geometry definition file, 20 chars]
```

>>>>>>> Emerging particles.

```
NBE 10e1,120e3,100 [E-interval and no. of en. bins]
NBTH 90 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 3 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]
```

>>>>>>> Dose distribution.

```
GRIDX -20,20
GRIDY -20,20
GRIDZ -100,-120
GRIDBN 1,1,1
```

>>>>>>> Job properties

```
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]
```

(...συνέχεια πίνακα 4-8)

TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

Πίνακας 4-9 Αρχείο γεωμετρίας leak2.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
LEAKAGE RADIATION Pb
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) sfere R=5cm
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=( 5.0000000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 5.0000000000000000E+00, 0)
Z-SCALE=( 5.0000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) sfere R=5.25cm
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=( 5.2500000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 5.2500000000000000E+00, 0)
Z-SCALE=( 5.2500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 1)
MATERIAL( 1) air
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 2)
MATERIAL( 2) lead
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```


Πίνακας 4-10 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης leakin2.in

TITLE room+dose enclosure+leakage radiation 5mm Fe.

>>>>>> Source definition.

SKPAR 2 [Pr. particles:1=electron,2=photon,3=positron]

SPECTR 8e3 0.0

SPECTR 9e3 0.000254582

SPECTR 10e3 0.276434

SPECTR 11e3 20.0645

SPECTR 12e3 561.329

SPECTR 13e3 7.39657e3

SPECTR 14e3 7.63167e4

SPECTR 15e3 4.35739e5

SPECTR 16e3 1.72505e6

SPECTR 17e3 4.89426e6

SPECTR 18e3 1.02026e7

SPECTR 19e3 1.92874e7

SPECTR 20e3 3.31517e7

SPECTR 21e3 4.85308e7

SPECTR 22e3 6.83822e7

SPECTR 23e3 9.32224e7

SPECTR 24e3 1.20438e8

SPECTR 25e3 1.50938e8

SPECTR 26e3 1.82038e8

SPECTR 27e3 2.15834e8

SPECTR 28e3 2.49222e8

SPECTR 29e3 2.84627e8

SPECTR 30e3 3.15372e8

SPECTR 31e3 3.38008e8

SPECTR 32e3 3.58137e8

SPECTR 33e3 3.78396e8

SPECTR 34e3 3.93965e8

SPECTR 35e3 4.08099e8

SPECTR 36e3 4.19754e8

SPECTR 37e3 4.30314e8

SPECTR 38e3 4.39604e8

SPECTR 39e3 4.48359e8

SPECTR 40e3 4.53363e8

SPECTR 41e3 4.53977e8

SPECTR 42e3 4.53708e8

SPECTR 43e3 4.53472e8

SPECTR 44e3 4.50506e8

SPECTR 45e3 4.46268e8

SPECTR 46e3 4.45172e8

SPECTR 47e3 4.43677e8

SPECTR 48e3 4.36123e8

(...συνέχεια πίνακα 4-10)

SPECTR 49e3 4.28036e8
SPECTR 50e3 4.21959e8
SPECTR 51e3 4.14121e8
SPECTR 52e3 4.0626e8
SPECTR 53e3 3.98048e8
SPECTR 54e3 3.92786e8
SPECTR 55e3 3.87335e8
SPECTR 56e3 5.19765e8
SPECTR 57e3 6.5408e8
SPECTR 58e3 7.68688e8
SPECTR 59e3 8.83857e8
SPECTR 60e3 6.36106e8
SPECTR 61e3 3.83676e8
SPECTR 62e3 3.48119e8
SPECTR 63e3 3.12065e8
SPECTR 64e3 3.03621e8
SPECTR 65e3 2.94165e8
SPECTR 66e3 3.79895e8
SPECTR 67e3 4.6615e8
SPECTR 68e3 3.82211e8
SPECTR 69e3 2.95575e8
SPECTR 70e3 2.52568e8
SPECTR 71e3 2.09379e8
SPECTR 72e3 1.99922e8
SPECTR 73e3 1.89634e8
SPECTR 74e3 1.86378e8
SPECTR 75e3 1.83647e8
SPECTR 76e3 1.78093e8
SPECTR 77e3 1.7167e8
SPECTR 78e3 1.67562e8
SPECTR 79e3 1.60962e8
SPECTR 80e3 1.56542e8
SPECTR 81e3 1.49077e8
SPECTR 82e3 1.47948e8
SPECTR 83e3 1.42878e8
SPECTR 84e3 1.37046e8
SPECTR 85e3 1.31155e8
SPECTR 86e3 1.28035e8
SPECTR 87e3 1.24993e8
SPECTR 88e3 1.19391e8
SPECTR 89e3 1.13729e8
SPECTR 90e3 1.09139e8
SPECTR 91e3 1.04418e8
SPECTR 92e3 9.94269e7
SPECTR 93e3 9.40533e7

(...συνέχεια πίνακα 4-10)

```
SPECTR 94e3 8.98486e7
SPECTR 95e3 8.5661e7
SPECTR 96e3 8.2362e7
SPECTR 97e3 7.90896e7
SPECTR 98e3 7.47937e7
SPECTR 99e3 7.04915e7
SPECTR 100e3 6.71814e7
SPECTR 101e3 6.37154e7
SPECTR 102e3 5.92376e7
SPECTR 103e3 5.44219e7
SPECTR 104e3 5.07677e7
SPECTR 105e3 4.71609e7
SPECTR 106e3 4.2894e7
SPECTR 107e3 3.87263e7
SPECTR 108e3 3.50264e7
SPECTR 109e3 3.11001e7
SPECTR 110e3 2.73025e7
SPECTR 111e3 2.37063e7
SPECTR 112e3 2.01695e7
SPECTR 113e3 1.71175e7
SPECTR 114e3 1.33647e7
SPECTR 115e3 9.57218e6
SPECTR 116e3 6.77714e6
SPECTR 117e3 4.2867e6
SPECTR 118e3 2.3407e6
SPECTR 119e3 7.36959e5
SPECTR 120e3 1.42517e5
SPECTR 121e3 -0.0
SPOSIT 0,0,0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0,0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 7 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 2 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAN 1 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPAN 2 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2

PFNAME airfe.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN leak2.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles.
NBE 10e1,120e3,100 [E-interval and no. of en. bins]
NBTH 90 [No. of bins for the polar angle THETA]
```

(...συνέχεια πίνακα 4-10)

NBPH 3 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Job properties

RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]

DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]

DUMPP 60 [Dumping period, in sec]

TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

Πίνακας 4-11 Αρχείο γεωμετρίας leak_fe5.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
LEAKAGE RADIATION
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) Plane Z=250cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 2.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) Plane Z=260cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 2.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) Plane Y=-160cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(+1.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) Plane Y=160cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-1.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) Plane X=-150
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(+1.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) Plane X=150
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-1.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) Plane Z=-250cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=(-2.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) Plane Z=-260cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=(-2.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) Plane Y=150cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-1.500000000000000E+02, 0)
```


(...συνέχεια πίνακα 4-11)

```
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 3)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 4)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 5)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 6)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 7)
MATERIAL( 3) tissue
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 15), SIDE POINTER=(+1)
00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```


Πίνακας 4-12 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης leakin_fe5.in

TITLE room + leakage radiation.

>>>>>>> Source definition.

SKPAR 2 [Pr. particles:1=electron,2=photon,3=positron]

SPECTR	7.05E+02	1.00E-35
SPECTR	1.91E+03	1.00E-35
SPECTR	3.12E+03	1.00E-35
SPECTR	4.33E+03	1.00E-35
SPECTR	5.54E+03	1.00E-35
SPECTR	6.75E+03	1.71E-08
SPECTR	7.96E+03	1.00E-35
SPECTR	9.17E+03	1.00E-35
SPECTR	1.04E+04	1.00E-35
SPECTR	1.16E+04	1.00E-35
SPECTR	1.28E+04	1.00E-35
SPECTR	1.40E+04	1.00E-35
SPECTR	1.52E+04	1.00E-35
SPECTR	1.64E+04	1.00E-35
SPECTR	1.76E+04	1.00E-35
SPECTR	1.88E+04	1.00E-35
SPECTR	2.00E+04	1.00E-35
SPECTR	2.13E+04	1.00E-35
SPECTR	2.25E+04	1.00E-35
SPECTR	2.37E+04	1.00E-35
SPECTR	2.49E+04	1.00E-35
SPECTR	2.61E+04	1.00E-35
SPECTR	2.73E+04	1.00E-35
SPECTR	2.85E+04	1.00E-35
SPECTR	2.97E+04	1.00E-35
SPECTR	3.09E+04	1.00E-35
SPECTR	3.21E+04	1.00E-35
SPECTR	3.33E+04	1.00E-35
SPECTR	3.46E+04	1.00E-35
SPECTR	3.58E+04	1.00E-35
SPECTR	3.70E+04	1.00E-35
SPECTR	3.82E+04	1.00E-35
SPECTR	3.94E+04	1.00E-35
SPECTR	4.06E+04	7.42E-10
SPECTR	4.18E+04	7.42E-10
SPECTR	4.30E+04	7.42E-10
SPECTR	4.42E+04	1.00E-35
SPECTR	4.54E+04	3.71E-09
SPECTR	4.66E+04	1.48E-09
SPECTR	4.79E+04	2.23E-09
SPECTR	4.91E+04	1.11E-08

(...συνέχεια πίνακα 4-12)

SPECTR	5.03E+04	1.63E-08
SPECTR	5.15E+04	2.37E-08
SPECTR	5.27E+04	3.63E-08
SPECTR	5.39E+04	5.71E-08
SPECTR	5.51E+04	7.94E-08
SPECTR	5.63E+04	1.43E-07
SPECTR	5.75E+04	2.34E-07
SPECTR	5.87E+04	3.38E-07
SPECTR	5.99E+04	4.37E-07
SPECTR	6.12E+04	3.28E-07
SPECTR	6.24E+04	3.26E-07
SPECTR	6.36E+04	3.33E-07
SPECTR	6.48E+04	3.85E-07
SPECTR	6.60E+04	5.57E-07
SPECTR	6.72E+04	7.98E-07
SPECTR	6.84E+04	7.55E-07
SPECTR	6.96E+04	6.70E-07
SPECTR	7.08E+04	6.59E-07
SPECTR	7.20E+04	6.28E-07
SPECTR	7.32E+04	6.62E-07
SPECTR	7.45E+04	7.18E-07
SPECTR	7.57E+04	8.03E-07
SPECTR	7.69E+04	8.43E-07
SPECTR	7.81E+04	8.36E-07
SPECTR	7.93E+04	9.03E-07
SPECTR	8.05E+04	8.69E-07
SPECTR	8.17E+04	1.00E-06
SPECTR	8.29E+04	1.00E-06
SPECTR	8.41E+04	1.06E-06
SPECTR	8.53E+04	1.02E-06
SPECTR	8.65E+04	1.10E-06
SPECTR	8.78E+04	1.01E-06
SPECTR	8.90E+04	1.06E-06
SPECTR	9.02E+04	1.12E-06
SPECTR	9.14E+04	1.05E-06
SPECTR	9.26E+04	1.05E-06
SPECTR	9.38E+04	9.85E-07
SPECTR	9.50E+04	9.63E-07
SPECTR	9.62E+04	9.52E-07
SPECTR	9.74E+04	9.74E-07
SPECTR	9.86E+04	8.59E-07
SPECTR	9.98E+04	8.85E-07
SPECTR	1.01E+05	8.47E-07
SPECTR	1.02E+05	8.15E-07
SPECTR	1.03E+05	7.58E-07

(...συνέχεια πίνακα 4-12)

```
SPECTR 1.05E+05      7.01E-07
SPECTR 1.06E+05      6.16E-07
SPECTR 1.07E+05      5.67E-07
SPECTR 1.08E+05      5.23E-07
SPECTR 1.10E+05      4.87E-07
SPECTR 1.11E+05      3.66E-07
SPECTR 1.12E+05      3.37E-07
SPECTR 1.13E+05      2.68E-07
SPECTR 1.14E+05      2.09E-07
SPECTR 1.16E+05      1.25E-07
SPECTR 1.17E+05      9.57E-08
SPECTR 1.18E+05      5.93E-08
SPECTR 1.19E+05      2.89E-08
SPECTR 1.20E+05      -6.68E-09
SPOSIT 0,0,0          [Coordinates of the source]
SDIREC 180,0         [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 90             [Beam aperture, in deg]
```

>>>>>>> Material data and simulation parameters.

```
NMAT 3 [Number of different materials, .le.10]
SIMPARG 1 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPARG 2 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPARG 3 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
```

```
PFNAME leak.mat [Material definition file, 20 chars]
```

>>>>>>> Geometry definition file.

```
GEOMFN leak_fe5.geo [Geometry definition file]
```

>>>>>>> Emerging particles.

```
NBE 10e1,120e3,100 [E-interval and no. of en bins]
NBTH 90 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 3 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]
```

>>>>>>> Dose distribution.

```
GRIDX -20,20
GRIDY -20,20
GRIDZ -100,-120
GRIDBN 1,1,1
```

>>>>>>> Job properties

```
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]
```

(...συνέχεια πίνακα 4-12)

TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

Πίνακας 4-13 Αρχείο γεωμετρίας leak3.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
LEAKAGE RADIATION Pb
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1)  sfere R=4cm
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=( 4.0000000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 4.0000000000000000E+00, 0)
Z-SCALE=( 4.0000000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2)  sfere R=5.25cm
INDICES=( 1, 1, 1, 0,-1)
X-SCALE=( 5.2500000000000000E+00, 0)
Y-SCALE=( 5.2500000000000000E+00, 0)
Z-SCALE=( 5.2500000000000000E+00, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 1)
MATERIAL( 1)  air
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 2)
MATERIAL( 2)  lead
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
END 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

Πίνακας 4-14 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης leakin3.in

```
TITLE room+dose enclosure+leakage radiation 4mm Fe.

>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Pr. particles:1=electron,2=photon,3=positron]
SPECTR 8e3 0.0
SPECTR 9e3 0.000254582
SPECTR 10e3 0.276434
SPECTR 11e3 20.0645
SPECTR 12e3 561.329
SPECTR 13e3 7.39657e3
SPECTR 14e3 7.63167e4
SPECTR 15e3 4.35739e5
SPECTR 16e3 1.72505e6
SPECTR 17e3 4.89426e6
SPECTR 18e3 1.02026e7
SPECTR 19e3 1.92874e7
SPECTR 20e3 3.31517e7
SPECTR 21e3 4.85308e7
SPECTR 22e3 6.83822e7
SPECTR 23e3 9.32224e7
SPECTR 24e3 1.20438e8
SPECTR 25e3 1.50938e8
SPECTR 26e3 1.82038e8
SPECTR 27e3 2.15834e8
SPECTR 28e3 2.49222e8
SPECTR 29e3 2.84627e8
SPECTR 30e3 3.15372e8
SPECTR 31e3 3.38008e8
SPECTR 32e3 3.58137e8
SPECTR 33e3 3.78396e8
SPECTR 34e3 3.93965e8
SPECTR 35e3 4.08099e8
SPECTR 36e3 4.19754e8
SPECTR 37e3 4.30314e8
SPECTR 38e3 4.39604e8
SPECTR 39e3 4.48359e8
SPECTR 40e3 4.53363e8
SPECTR 41e3 4.53977e8
SPECTR 42e3 4.53708e8
SPECTR 43e3 4.53472e8
SPECTR 44e3 4.50506e8
SPECTR 45e3 4.46268e8
SPECTR 46e3 4.45172e8
SPECTR 47e3 4.43677e8
SPECTR 48e3 4.36123e8
```

(...συνέχεια πίνακα 4-14)

SPECTR	49e3	4.28036e8
SPECTR	50e3	4.21959e8
SPECTR	51e3	4.14121e8
SPECTR	52e3	4.0626e8
SPECTR	53e3	3.98048e8
SPECTR	54e3	3.92786e8
SPECTR	55e3	3.87335e8
SPECTR	56e3	5.19765e8
SPECTR	57e3	6.5408e8
SPECTR	58e3	7.68688e8
SPECTR	59e3	8.83857e8
SPECTR	60e3	6.36106e8
SPECTR	61e3	3.83676e8
SPECTR	62e3	3.48119e8
SPECTR	63e3	3.12065e8
SPECTR	64e3	3.03621e8
SPECTR	65e3	2.94165e8
SPECTR	66e3	3.79895e8
SPECTR	67e3	4.6615e8
SPECTR	68e3	3.82211e8
SPECTR	69e3	2.95575e8
SPECTR	70e3	2.52568e8
SPECTR	71e3	2.09379e8
SPECTR	72e3	1.99922e8
SPECTR	73e3	1.89634e8
SPECTR	74e3	1.86378e8
SPECTR	75e3	1.83647e8
SPECTR	76e3	1.78093e8
SPECTR	77e3	1.7167e8
SPECTR	78e3	1.67562e8
SPECTR	79e3	1.60962e8
SPECTR	80e3	1.56542e8
SPECTR	81e3	1.49077e8
SPECTR	82e3	1.47948e8
SPECTR	83e3	1.42878e8
SPECTR	84e3	1.37046e8
SPECTR	85e3	1.31155e8
SPECTR	86e3	1.28035e8
SPECTR	87e3	1.24993e8
SPECTR	88e3	1.19391e8
SPECTR	89e3	1.13729e8
SPECTR	90e3	1.09139e8
SPECTR	91e3	1.04418e8
SPECTR	92e3	9.94269e7
SPECTR	93e3	9.40533e7

(...συνέχεια πίνακα 4-14)

```
SPECTR 94e3 8.98486e7
SPECTR 95e3 8.5661e7
SPECTR 96e3 8.2362e7
SPECTR 97e3 7.90896e7
SPECTR 98e3 7.47937e7
SPECTR 99e3 7.04915e7
SPECTR 100e3 6.71814e7
SPECTR 101e3 6.37154e7
SPECTR 102e3 5.92376e7
SPECTR 103e3 5.44219e7
SPECTR 104e3 5.07677e7
SPECTR 105e3 4.71609e7
SPECTR 106e3 4.2894e7
SPECTR 107e3 3.87263e7
SPECTR 108e3 3.50264e7
SPECTR 109e3 3.11001e7
SPECTR 110e3 2.73025e7
SPECTR 111e3 2.37063e7
SPECTR 112e3 2.01695e7
SPECTR 113e3 1.71175e7
SPECTR 114e3 1.33647e7
SPECTR 115e3 9.57218e6
SPECTR 116e3 6.77714e6
SPECTR 117e3 4.2867e6
SPECTR 118e3 2.3407e6
SPECTR 119e3 7.36959e5
SPECTR 120e3 1.42517e5
SPECTR 121e3 -0.0
SPOSIT 0,0,0 [Coordinates of the source]
SDIREC 0,0 [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 7 [Beam aperture, in deg]

>>>>>>> Material data and simulation parameters.
NMAT 2 [Number of different materials, .1e.10]
SIMPAN 1 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPAN 2 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2

PFNAME airfe.mat [Material definition file, 20 chars]

>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN leak3.geo [Geometry definition file, 20 chars]

>>>>>>> Emerging particles.
NBE 10e1,120e3,100 [E-interval and no. of en. bins]
NBTH 90 [No. of bins for the polar angle THETA]
```


(...συνέχεια πίνακα 4-14)

NBPH 3 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]

>>>>>>> Job properties

RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]

DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]

DUMPP 60 [Dumping period, in sec]

TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

Πίνακας 4-15 Αρχείο γεωμετρίας leak_fe4.geo

```
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
LEAKAGE RADIATION
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 1) Plane Z=250cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 2.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 2) Plane Z=260cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=( 2.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 3) Plane Y=-160cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(+1.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 4) Plane Y=160cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-1.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 5) Plane X=-150
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(+1.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 6) Plane X=150
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-1.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 7) Plane Z=-250cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=(-2.500000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 8) Plane Z=-260cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1,-1)
Z-SHIFT=(-2.600000000000000E+02, 0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 9) Plane Y=150cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.000000000000000E+00, 0)
      A0=(-1.500000000000000E+02, 0)
```

(...συνέχεια πίνακα 4-15)

```
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 10)   Plane Y=-150cm
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AY=( 1.0000000000000000E+00,  0)
      AO=(+1.5000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 11)   Plane X=160
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.0000000000000000E+00,  0)
      AO=(-1.6000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 12)   Plane X=-160
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.0000000000000000E+00,  0)
      AO=(+1.6000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 13)   Cylinder R=20cm
INDICES=( 1, 1, 0, 0, -1)
X-SCALE=( 2.0000000000000000E+01,  0)
Y-SCALE=( 2.0000000000000000E+01,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 14)   Plane Z=-100cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1, -1)
Z-SHIFT=(-1.0000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 15)   Plane Z=-120cm
INDICES=( 0, 0, 0, 1, -1)
Z-SHIFT=(-1.2000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
SURFACE ( 16)   Plane X=-200
INDICES=( 0, 0, 0, 0, 0)
      AX=( 1.0000000000000000E+00,  0)
      AO=(+2.0000000000000000E+02,  0)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      (  1)
MATERIAL(  1)  CONCRETE
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)
0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY      (  2)
MATERIAL(  1)  CONCRETE
```

(...συνέχεια πίνακα 4-15)

```

SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 3)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 9), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 4)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 10), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 7), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 5)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 6), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 11), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 8), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(+1)
SURFACE ( 4), SIDE POINTER=(-1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 6)
MATERIAL( 1) CONCRETE
SURFACE ( 5), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 16), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
BODY ( 7)
MATERIAL( 3) tissue
SURFACE ( 13), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 14), SIDE POINTER=(-1)
SURFACE ( 15), SIDE POINTER=(+1)
000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000

```


Πίνακας 4-16 Αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης leakin_fe4.in

TITLE room + leakage radiation.

>>>>>>> Source definition.

SKPAR 2 [Pr. particles:1=electron,2=photon,3=positron]

SPECTR	7.05E+02	1.00E-35
SPECTR	1.91E+03	1.00E-35
SPECTR	3.12E+03	1.00E-35
SPECTR	4.33E+03	1.00E-35
SPECTR	5.54E+03	1.00E-35
SPECTR	6.75E+03	1.71E-08
SPECTR	7.96E+03	1.00E-35
SPECTR	9.17E+03	1.00E-35
SPECTR	1.04E+04	1.00E-35
SPECTR	1.16E+04	1.00E-35
SPECTR	1.28E+04	1.00E-35
SPECTR	1.40E+04	1.00E-35
SPECTR	1.52E+04	1.00E-35
SPECTR	1.64E+04	1.00E-35
SPECTR	1.76E+04	1.00E-35
SPECTR	1.88E+04	1.00E-35
SPECTR	2.00E+04	1.00E-35
SPECTR	2.13E+04	1.00E-35
SPECTR	2.25E+04	1.00E-35
SPECTR	2.37E+04	1.00E-35
SPECTR	2.49E+04	1.00E-35
SPECTR	2.61E+04	1.00E-35
SPECTR	2.73E+04	1.00E-35
SPECTR	2.85E+04	1.00E-35
SPECTR	2.97E+04	1.00E-35
SPECTR	3.09E+04	1.00E-35
SPECTR	3.21E+04	1.00E-35
SPECTR	3.33E+04	1.00E-35
SPECTR	3.46E+04	1.00E-35
SPECTR	3.58E+04	1.00E-35
SPECTR	3.70E+04	1.00E-35
SPECTR	3.82E+04	1.00E-35
SPECTR	3.94E+04	1.00E-35
SPECTR	4.06E+04	7.42E-10
SPECTR	4.18E+04	7.42E-10
SPECTR	4.30E+04	7.42E-10
SPECTR	4.42E+04	1.00E-35
SPECTR	4.54E+04	3.71E-09
SPECTR	4.66E+04	1.48E-09
SPECTR	4.79E+04	2.23E-09
SPECTR	4.91E+04	1.11E-08

(...συνέχεια πίνακα 4-16)

SPECTR	5.03E+04	1.63E-08
SPECTR	5.15E+04	2.37E-08
SPECTR	5.27E+04	3.63E-08
SPECTR	5.39E+04	5.71E-08
SPECTR	5.51E+04	7.94E-08
SPECTR	5.63E+04	1.43E-07
SPECTR	5.75E+04	2.34E-07
SPECTR	5.87E+04	3.38E-07
SPECTR	5.99E+04	4.37E-07
SPECTR	6.12E+04	3.28E-07
SPECTR	6.24E+04	3.26E-07
SPECTR	6.36E+04	3.33E-07
SPECTR	6.48E+04	3.85E-07
SPECTR	6.60E+04	5.57E-07
SPECTR	6.72E+04	7.98E-07
SPECTR	6.84E+04	7.55E-07
SPECTR	6.96E+04	6.70E-07
SPECTR	7.08E+04	6.59E-07
SPECTR	7.20E+04	6.28E-07
SPECTR	7.32E+04	6.62E-07
SPECTR	7.45E+04	7.18E-07
SPECTR	7.57E+04	8.03E-07
SPECTR	7.69E+04	8.43E-07
SPECTR	7.81E+04	8.36E-07
SPECTR	7.93E+04	9.03E-07
SPECTR	8.05E+04	8.69E-07
SPECTR	8.17E+04	1.00E-06
SPECTR	8.29E+04	1.00E-06
SPECTR	8.41E+04	1.06E-06
SPECTR	8.53E+04	1.02E-06
SPECTR	8.65E+04	1.10E-06
SPECTR	8.78E+04	1.01E-06
SPECTR	8.90E+04	1.06E-06
SPECTR	9.02E+04	1.12E-06
SPECTR	9.14E+04	1.05E-06
SPECTR	9.26E+04	1.05E-06
SPECTR	9.38E+04	9.85E-07
SPECTR	9.50E+04	9.63E-07
SPECTR	9.62E+04	9.52E-07
SPECTR	9.74E+04	9.74E-07
SPECTR	9.86E+04	8.59E-07
SPECTR	9.98E+04	8.85E-07
SPECTR	1.01E+05	8.47E-07
SPECTR	1.02E+05	8.15E-07
SPECTR	1.03E+05	7.58E-07

(...συνέχεια πίνακα 4-16)

```
SPECTR 1.05E+05      7.01E-07
SPECTR 1.06E+05      6.16E-07
SPECTR 1.07E+05      5.67E-07
SPECTR 1.08E+05      5.23E-07
SPECTR 1.10E+05      4.87E-07
SPECTR 1.11E+05      3.66E-07
SPECTR 1.12E+05      3.37E-07
SPECTR 1.13E+05      2.68E-07
SPECTR 1.14E+05      2.09E-07
SPECTR 1.16E+05      1.25E-07
SPECTR 1.17E+05      9.57E-08
SPECTR 1.18E+05      5.93E-08
SPECTR 1.19E+05      2.89E-08
SPECTR 1.20E+05      -6.68E-09
SPOSIT 0,0,0          [Coordinates of the source]
SDIREC 180,0         [Beam axis direction angles, in deg]
SAPERT 90            [Beam aperture, in deg]
```

>>>>>>> Material data and simulation parameters.

```
NMAT 3 [Number of different materials, .le.10]
SIMPARG 1 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPARG 2 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
SIMPARG 3 1.2e3 1.2e2 1.2e3 0.1 0.1 1.2e3 1.2e2
```

```
PFNAME leak.mat [Material definition file, 20 chars]
```

>>>>>>> Geometry definition file.

```
GEOMFN leak_fe4.geo [Geometry definition file]
```

>>>>>>> Emerging particles.

```
NBE 10e1,120e3,100 [E-interval and no. of en bins]
NBTH 90 [No. of bins for the polar angle THETA]
NBPH 3 [No. of bins for the azimuthal angle PHI]
```

>>>>>>> Dose distribution.

```
GRIDX -20,20
GRIDY -20,20
GRIDZ -100,-120
GRIDBN 1,1,1
```

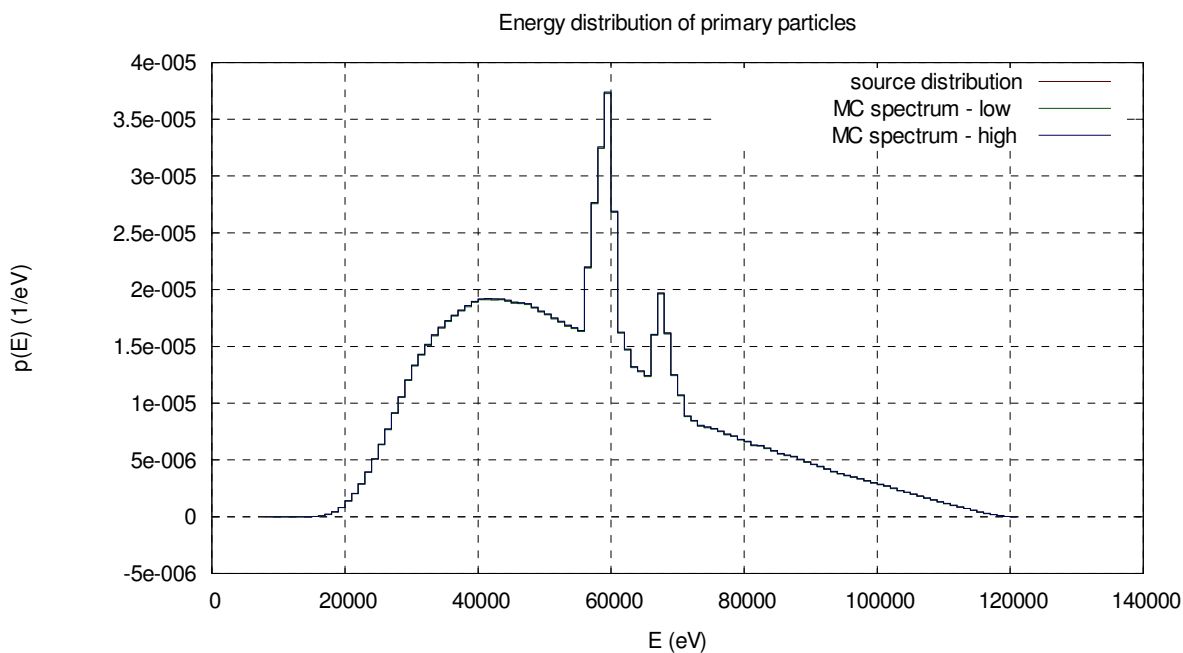
>>>>>>> Job properties

```
RESUME dump1.dat [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump1.dat [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 60 [Dumping period, in sec]
```

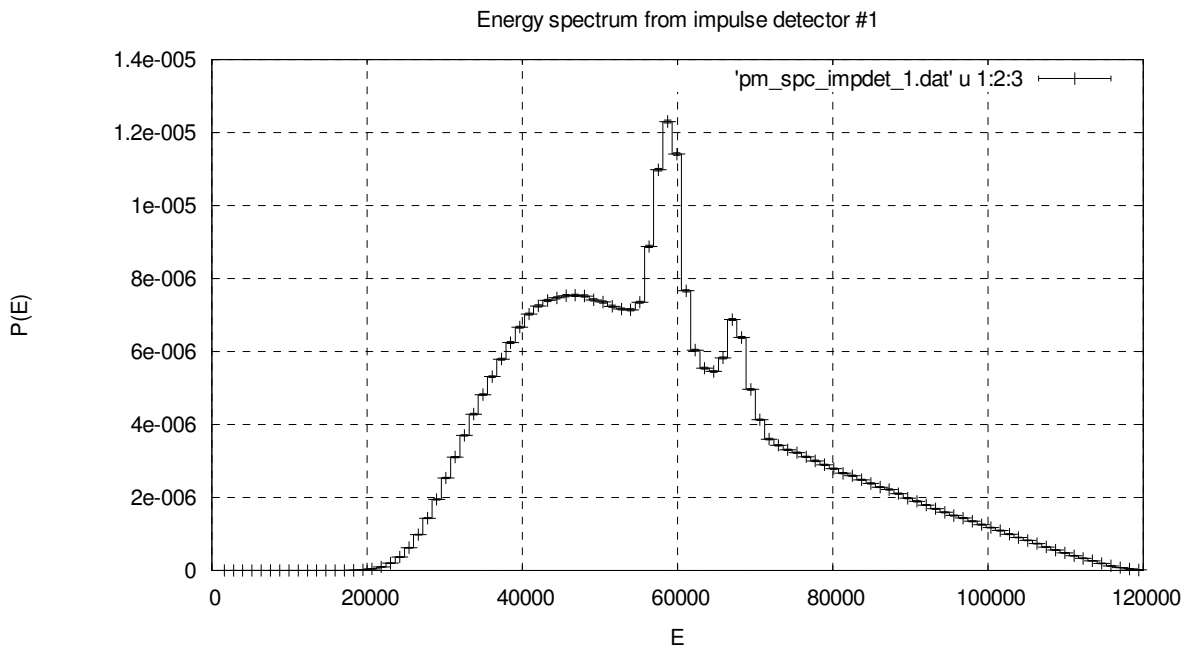

(...συνέχεια πίνακα 4-16)

TIME 2.0e5 [Allotted simulation time, in sec]

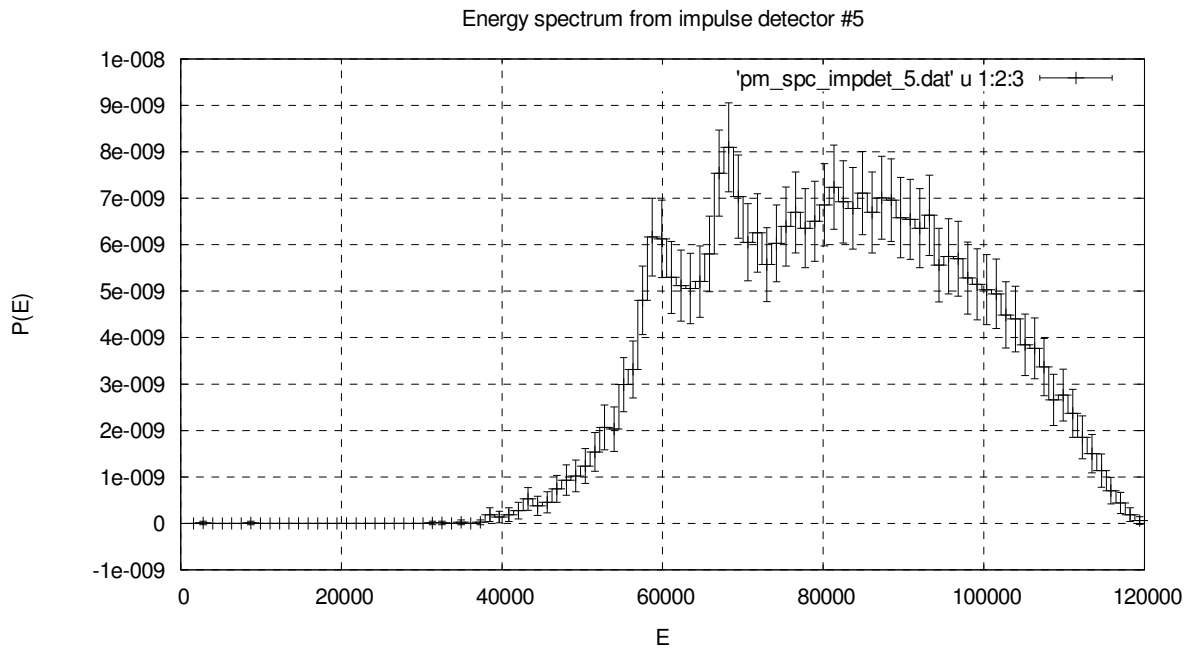
Διαγράμματα Κεφαλαίου 4



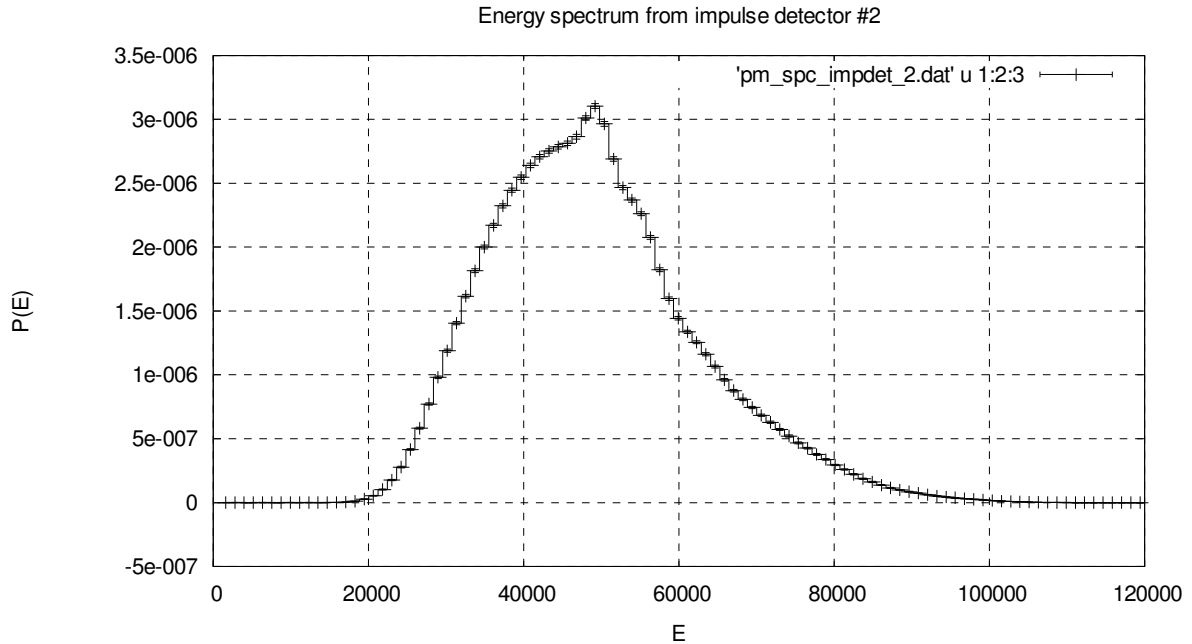
Διάγραμμα 4-4 Ενεργειακό φάσμα πρωτεύουσας ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τη λυχνία της μηχανής των ακτίνων X



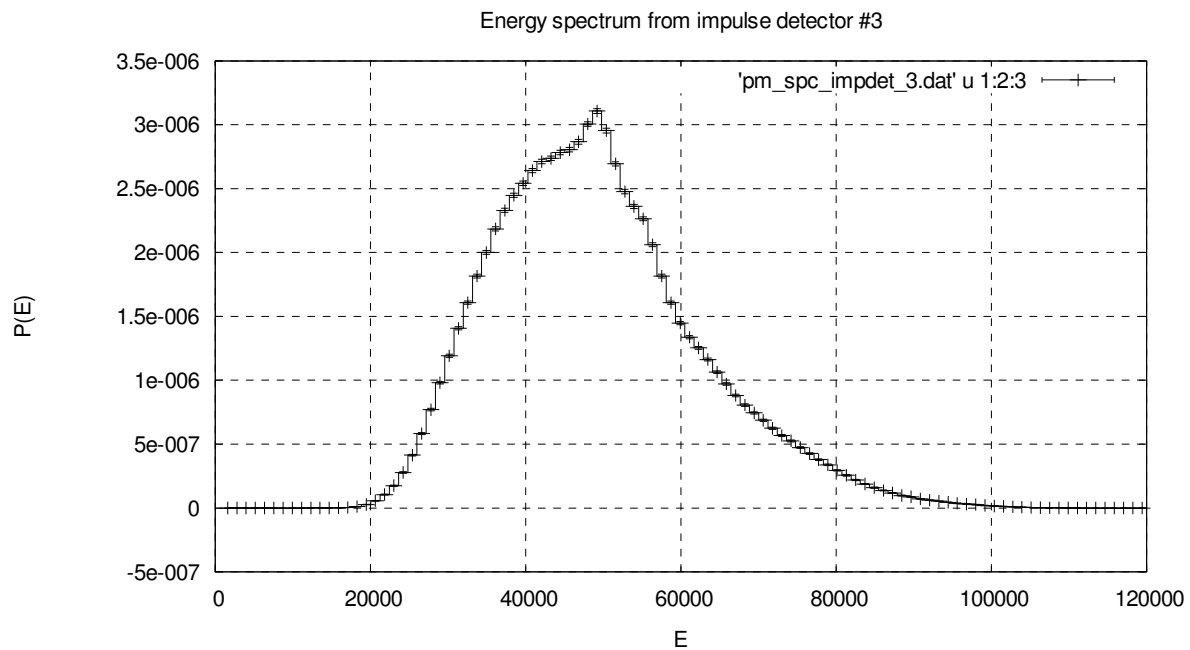
Διάγραμμα 4-5 Ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στο primary barrier



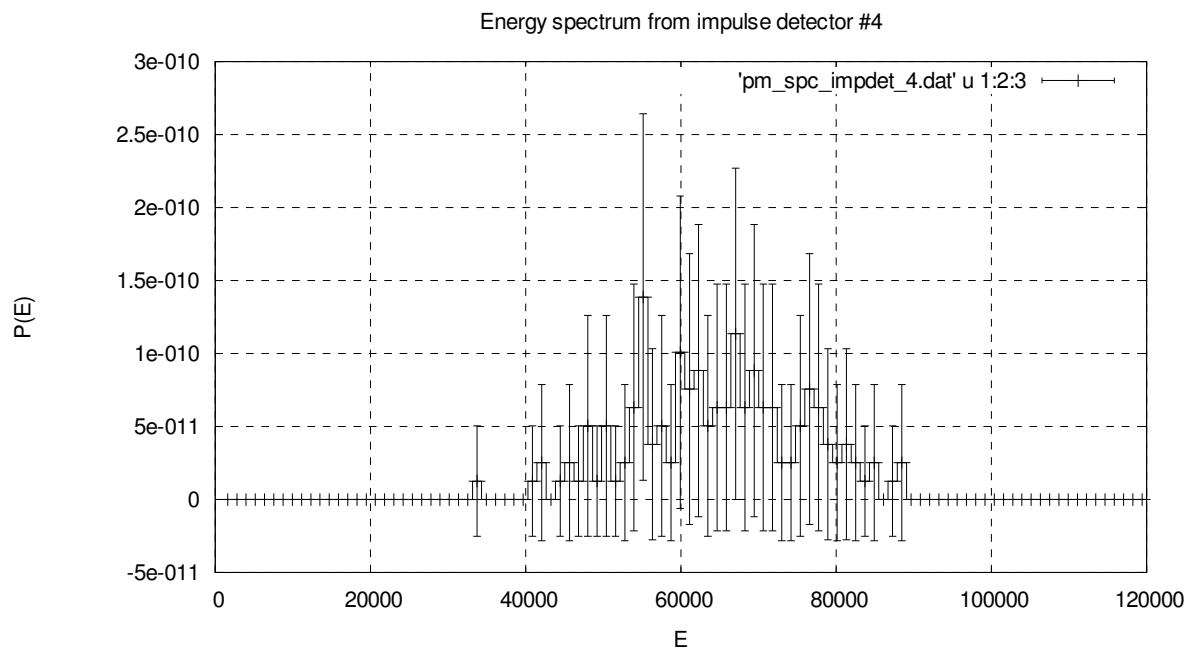
Διάγραμμα 4-6 Ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στον ιστό έξω από το *primary barrier*. Η ενέργεια στον άξονα *X* δίνεται σε eV και η πυκνότητα πιθανότητας στον άξονα *Y* σε 1/eV



Διάγραμμα 4-7 Ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στον πρώτο πλαϊνό τοίχο. Η ενέργεια στον άξονα *X* δίνεται σε eV και η πυκνότητα πιθανότητας στον άξονα *Y* σε 1/eV



Διάγραμμα 4-8 Ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στον δεύτερο πλαϊνό τοίχο. Η ενέργεια στον άξονα X δίνεται σε eV και η πυκνότητα πιθανότητας στον άξονα Y σε 1/eV



Διάγραμμα 4-9 Ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στον ιστό έξω από το secondary barrier. Η ενέργεια στον άξονα X δίνεται σε eV και η πυκνότητα πιθανότητας στον άξονα Y σε 1/eV

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η Διπλωματική Εργασία αυτή έχει ως κεντρικό της θέμα τη χρήση του κώδικα αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας και ύλης PENELOPE για τον υπολογισμό νέων θωρακίσεων ή τον έλεγχο των ήδη υπαρχόντων, σε χώρους μέσα στους οποίους λειτουργούν μηχανές παραγωγής ακτίνων-X για ιατρικούς σκοπούς και πιο συγκεκριμένα για απεικονιστικές μεθόδους.

Στο 2^ο Κεφάλαιο έγινε μια σύντομη αναφορά στις μεθόδους υπολογισμού θωρακίσεων που συναντούμε στην παγκόσμια βιβλιογραφία. Αναφέρθηκαν στοιχεία που αφορούν τα όρια δοσιμετρίας και ακτινοπροστασίας τόσο των εργαζομένων στους χώρους που μας ενδιαφέρουν όσο και του κοινού που κινείται μέσα στους χώρους αυτούς. Αναφέρθηκαν στοιχεία που αφορούν τους κανονισμούς υπολογισμού των θωρακίσεων και πως αυτοί εκφράζονται από τους διεθνείς οργανισμούς και στο τέλος δόθηκε ένα απλό παράδειγμα υπολογισμού θωράκισης σύμφωνα με αυτούς τους κανονισμούς. Μία βασική αδυναμία όλων των μεθοδολογιών αυτών είναι ότι στηρίζονται σε παραδοχές και σε διάφορες εκτιμήσεις για μία σειρά από παραμέτρους, όπως για παράδειγμα τη χρονική διάρκεια της παρουσίας προσωπικού σε ορισμένες θέσεις εργασίας. Κατά συνέπεια, προκειμένου να εφαρμοσθούν αυτές οι μεθοδολογίες είναι απαραίτητη η επιλογή μίας σειράς παραμέτρων, οι οποίες προσομοιάζουν όσο γίνεται περισσότερο στις συνθήκες του πραγματικού προβλήματος. Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος, οι παράμετροι αυτές μπορεί να είναι εύκολο ή δύσκολο να επιλεγούν. Εν γένει οι μεθοδολογίες αυτές οδηγούν σε υπερεκτίμηση των απαιτούμενων θωρακίσεων.

Στο 3^ο Κεφάλαιο ξεκίνησε η μελέτη των δυνατοτήτων που προσφέρει ο κώδικας προσομοίωσης για PENELOPE και την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών. Ο στόχος που ετέθη και τελικά επετεύχθη ήταν ο έλεγχος της αξιοπιστίας και της ακρίβειας με την οποία μπορούν να γίνουν δοσιμετρικοί υπολογισμοί, με χρήση του user code PENMAIN, ο οποίος καλεί τον κώδικα προσομοίωσης PENELOPE. Υπολογίσθηκαν δόσεις σε πολύ απλές καταστάσεις ακτινοβολήσης και γεωμετρίας και ελέγχθηκε σε μεγάλο βαθμό ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο κώδικας προσομοίωσης. Αποκωδικοποιήθηκε η λειτουργία του εργαλείου που

προσφέρεται από το πρόγραμμα PENELOPE για τους δοσιμετρικούς υπολογισμούς, το Dose Enclosure και επιπλέον αποδείχθηκε ότι είναι δυνατόν να γίνονται δοσιμετρικοί υπολογισμοί με τη χρήση και άλλων εικονικών ανιχνευτών, όπως είναι οι ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο καθώς, ενώ σε μία προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιείται μόνον ένας ανιχνευτής δόσης, μπορούν να χρησιμοποιούνται περισσότεροι ανιχνευτές αποτιθέμενης ενέργειας.

Στο 4^ο Κεφάλαιο, αφού ο κώδικας PENELOPE μπορούσε πλέον να θεωρηθεί ένα αξιόπιστο εργαλείο υπολογισμού δόσεων μέσω της προσομοίωσης, έγιναν σημαντικά βήματα προς την κατεύθυνση του προσδιορισμού της δόσης, η οποία προέρχεται από τα διάφορα είδη ακτινοβολίας που εκπέμπονται από μία μηχανή ακτίνων-X. Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία που αφορούν τη λυχνία και τη λειτουργία της που είναι όσο πιο κοντά στην πραγματικότητα γίνεται και η εργασία κατέληξε στην διατύπωση μιας γενικής μορφής μεθοδολογίας για τον υπολογισμό των δόσεων από την ακτινοβολία της λυχνίας και επομένως τον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους θωράκισης. Στα πλαίσια της ΔΕ εισήχθη το ενεργειακό φάσμα της ακτινοβολίας της μηχανής στο αρχείο δεδομένων και κατέστη δυνατή η περιγραφή πολύπλοκης γεωμετρίας ενός δωματίου, με απορροφητές και διαφόρων ειδών εικονικούς ανιχνευτές σε διάφορες θέσεις. Σε όλη την εργασία οι διάφορες προσομοιώσεις που έγιναν περιγράφηκαν λεπτομερώς ως προς τη γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε, πως αυτή εισάγεται μέσα στο πρόγραμμα μέσω του αρχείου περιγραφής τύπου .geo, των δεδομένων της προσομοίωσης και πως αυτά εισάγονται μέσω του αρχείου τύπου .in. Ένα πολύ σημαντικό τμήμα του 4^{ου} Κεφαλαίου αναφέρεται στη δημιουργία ενός φάσματος το ποίο να προσεγγίζει το φάσμα της ακτινοβολίας διαρροής της μηχανής. Ανεξάρτητα του κατά πόσον οι παραδοχές πάνω στις οποίες βασίσθηκε η δημιουργία του φάσματος αυτού είναι οι καλύτερες δυνατές, η όλη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε θα είναι πολύ χρήσιμη για τη δημιουργία φάσματος διαρροής υπό άλλες παραδοχές.

Ο κύριος στόχος της ΔΕ ήταν στο τέλος της να έχει πλήρως αποκωδικοποιηθεί η λειτουργία του κώδικα PENELOPE και το πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτός και τα εργαλεία που αυτός προσφέρει για δοσιμετρικούς υπολογισμούς. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας για δύο προσομοιώσεις μίας μηχανής ακτίνων-X, η οποία λειτουργεί μέσα σε ένα δωμάτιο, με και χωρίς σκεδαστή ακτινοβολίας. Στις προσομοιώσεις αυτές ελήφθησαν τα ενεργειακά φάσματα της ακτινοβολίας σε διάφορες επιλεγμένες θέσεις και εκτιμήθηκε η δόση, πίσω από το primary

barrier. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε δεν είναι ολοκληρωμένη και σίγουρα επιδέχεται αρκετών βελτιώσεων. Αποτελεί όμως μια βάση για την περαιτέρω ανάπτυξη με τελικό στόχο τον έλεγχο της επάρκειας θωρακίσεων και τον υπολογισμό επιπλέον θωρακίσεων. Οι μελλοντικές εξελίξεις και εφαρμογές της μεθόδου που παρουσιάστηκε αφορούν τον πλήρη υπολογισμό των θωρακίσεων μέσω του κώδικα PENELOPE. Ζητούμενο είναι η λεπτομερέστερη περιγραφή τόσο της γεωμετρίας του χώρου που ζητείται να θωρακισθεί όσο και η πιο ρεαλιστική περιγραφή των συνθηκών λειτουργίας και των χαρακτηριστικών της λυχνίας, αλλά και του σκεδαστή (phantom). Ζητούμενο και αναμενόμενο βέβαια είναι ακόμα ο όλος υπολογισμός να εναρμονίζεται με τους διεθνείς κανονισμούς. Το NCRP Report No 147 είναι κανονισμός που πρέπει να αποτελέσει οδηγό στην περαιτέρω ανάπτυξη. Οι οδηγίες που παρέχονται εκεί τόσο για τις συνθήκες λειτουργίας όσο και για την σχεδίαση των χώρων που θωρακίζονται πρέπει να αποτελέσουν το γνώμονα σύμφωνα με τον οποίο θα γίνει αυτή η ανάπτυξη. Συνεπώς, σε μελλοντική εργασία θα πρέπει να ελεγχθούν τα αποτελέσματα του κώδικα σε σχέση με τα αποτελέσματα που θα έδινε η μεθοδολογία που περιγράφεται στο NCRP Report No 147, όσον αφορά στον υπολογισμό θωρακίσεων.

Η ανάπτυξη του σκελετού της μεθόδου όπως έγινε στην εργασία αυτή βασίστηκε στο γεγονός πως η ακτινοβολία που θωρακίζεται προέρχεται από απεικονιστικές μηχανές ακτίνων-X. Με την κατάλληλη προσαρμογή όμως είναι εύκολο ο σκελετός αυτός να αποτελέσει τη βάση για μια μέθοδο θωράκισης χώρων από θεραπευτικές μηχανές ακτίνων-X, όπου είναι οι ενέργειες είναι σαφώς υψηλότερες, ή ακόμα και από άλλες πηγές ακτινοβολίας πέραν των μηχανών των ακτίνων-X. Μπορεί ακόμα να αποτελέσει εργαλείο στη ανάπτυξη μεθόδων για θωράκιση σε περιπτώσεις εφαρμογής ακτινοβολιών πέραν του ιατρικού ενδιαφέροντος όπως στις βιομηχανικές ραδιογραφίες.

Η δυνατότητα εξέλιξης και περαιτέρω ανάπτυξης της μεθόδου είναι μεγάλη. Η ανάγκη για θωρακίσεις έναντι σε ακτινοβολίες θα υπάρχει πάντα και η ύπαρξη ενός εργαλείου – οδηγού για τον υπολογισμό αυτών των ασπίδων επιβάλλεται. Είναι στο χέρι αυτών που θα χρειαστούν αυτό το εργαλείο, να το χρησιμοποιήσουν κατάλληλα για να πετύχουν το αναμενόμενο αποτέλεσμα.

Παράρτημα 1

Παράδειγμα απλού υπολογισμού θωράκισης ενός ακτινογραφικού θαλάμου καρδιακού καθετηριασμού με τη μέθοδο που περιγράφεται στο NCRP Report No 49

Στο παρών παράδειγμα υπολογίζεται αναλυτικά η θωράκιση του δωματίου ελέγχου του μηχανήματος που θεωρείται ως primary barrier. Η ακτινοβολία από την οποία θωρακίζεται είναι και πρωτεύουσα, κατευθείαν από την πηγή, αλλά και ακτινοβολία διαρροής και ακτινοβολία σκεδαζόμενη. Το σχέδιο του δωματίου φαίνεται στην εικόνα 1.

Κατασκευαστικά στοιχεία δωματίου

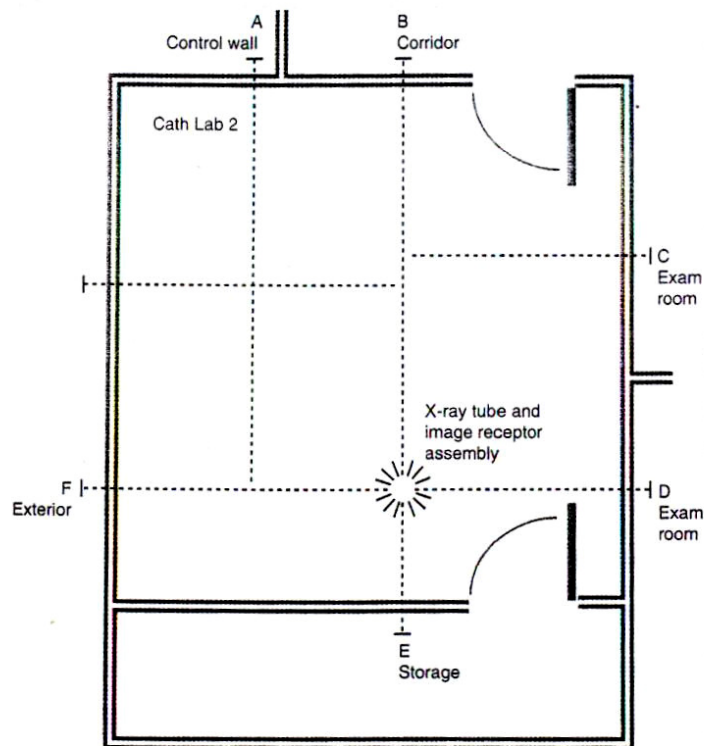
Πάτωμα: Τσιμέντο πάνω στο επίπεδο του εδάφους.

Οροφή: Τσιμέντο πάχους 4 in με άλλο όροφο από πάνω και την πρωτεύουσα δέσμη να μην κατευθύνεται ποτέ προς εκεί.

Τοίχοι: Εξωτερικός τοίχος πάχους 8 in από ενισχυμένο σκυρόδεμα με επίχρισμα τούβλου. Εσωτερικοί τοίχοι φτιαγμένοι από 5/8 -inch γυψοσανίδα και μεταλλικά καρφιά 4 in. Όλοι οι τοίχοι θεωρούνται ως secondary barriers με εξαίρεση το δωμάτιο ελέγχου που θα θεωρηθεί primary barrier για μεγαλύτερη προστασία του χειριστή του μηχανήματος.

Αναμενόμενος φόρτος εργασίας: 1000mA-min/week στα 125kVp (περίπου 24 ασθενείς/ μέρα)

Προσανατολισμός πρωτεύουσας δέσμης: Η δέσμη στις περισσότερες εξετάσεις θεωρείται στραμμένη προς το έδαφος.



Εικ. 1 Θάλαμος καρδιακού καθετηριασμού

Υπολογισμός του Primary Barrier

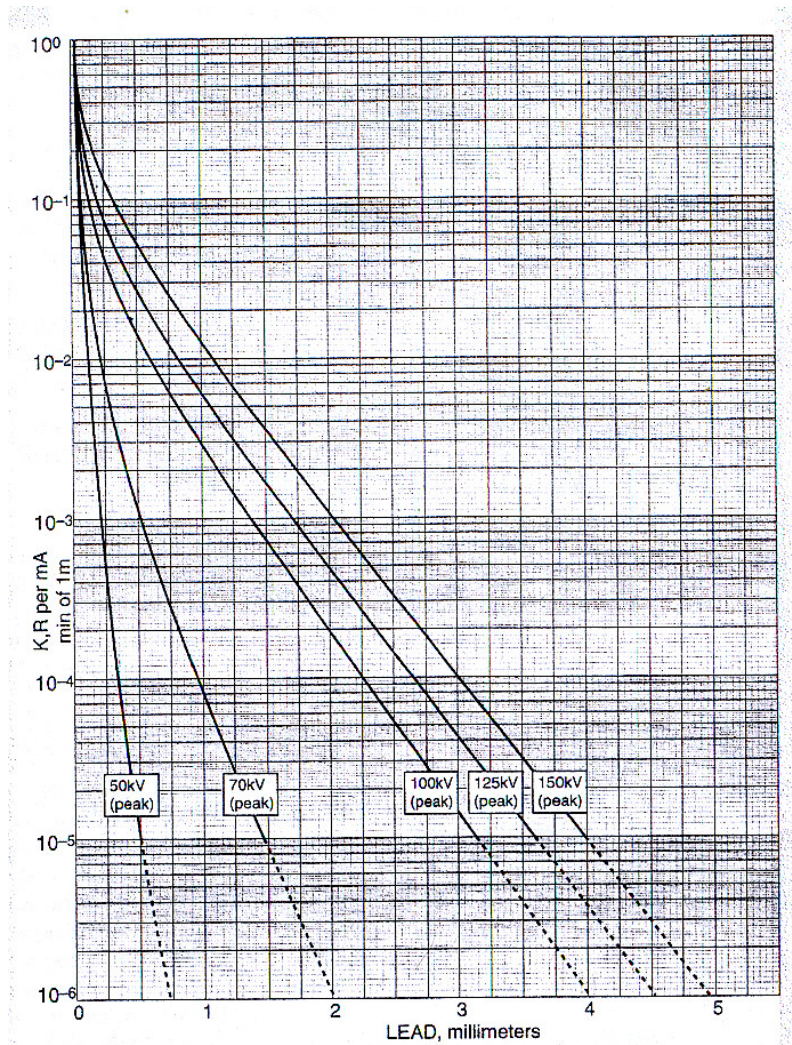
Το primary barrier χρησιμοποιείται για την εξασθένιση της πρωτεύουσας δέσμης της ακτινοβολίας. Για τον υπολογισμό του χρειαζόμαστε την τιμή του συντελεστή εξασθένισης K. Αυτός υπολογίζεται από τη σχέση (2.2). Είναι δηλαδή:

$$K = Ex^2 \frac{1}{WUT}$$

Από τα δεδομένα του παραδείγματος έχουμε πως $W = 1000 \text{ mA-min/week}$, $U = 1$, $T = 1$, ενώ από το κατασκευαστικό σχέδιο έχουμε πως $x = 5.65\text{m}$. Το shielding design goal της θωράκισης μας είναι $E = 0.1 \text{ R}$ μιας και πρόκειται για επαγγελματικά εκτιθέμενους. Είναι τελικά:

$$K = 0.1 * (5.64)^2 / 1000 * 1 * 1 = 0.0032$$

Η απαραίτητη θωράκιση από μόλυβδο για την μείωση της έντασης της δέσμης της πρωτεύουσας ακτινοβολίας στα επιθυμητά επίπεδα στο σημείο που εξετάζουμε δίνεται αν τοποθετήσουμε την τιμή του K που υπολογίσαμε στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 1 Υπολογισμός θωράκισης μολύβδου για *primary barrier*

Το παραπάνω διάγραμμα έχει παρθεί από το NCRP Report No49 και μας δίνει το απαραίτητο πάχος θωράκισης από μόλυβδο για να πετύχουμε με το *primary barrier* το συντελεστή εξασθένισης που υπολογίσαμε. Βάζοντας σα δεδομένα το K και τα kVp της λυχνίας, παίρνουμε το απαραίτητο πάχος μολύβδου.

Το αποτέλεσμα που παίρνουμε είναι ένα πάχος 1.2 mm μολύβδου. Στην αγορά είναι διαθέσιμο το τυποποιημένο πάχος 1.19 mm και των 1.5 mm. Για τη θωράκισή μας επιλέγουμε το πάχος των 1.5 mm μολύβδου.

Υπολογισμός Secondary Barrier

Ως secondary barrier θεωρούμε τη θωράκιση που οδηγεί στην εξασθένηση της διαρρέουσας από τη λυχνία και της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Ο υπολογισμός του γίνεται σε δυο στάδια, στο ένα γίνεται ο υπολογισμός για την διαρρέουσα και στο άλλο για τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία. Για τη διαρρέουσα έχουμε τον συντελεστή εξασθένησης να δίνεται από τη σχέση:

$$K_L = E_L x^2 \frac{600I}{WT}$$

Όπου ο όρος 600I είναι μια έκφραση που χρησιμοποιείται συχνά για το συντελεστή E_L με το I να εκφράζει το μέγιστο συνεχές φορτίο της λυχνίας σε mA. Οι τιμές του I καθώς και των άλλων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται παραθέτονται στον πίνακα 2-7 που ακολουθεί παρακάτω και υπάρχει στο NCRP Report No49.

Εφαρμογή	Γ^a	a^b	d_{sca}^{γ}	F^d
100 kVp ακτινοσκόπηση	5	0.0013	0.45	400
125 kVp ακτινοσκόπηση	4	0.0015	0.45	400
150 kVp ακτινοσκόπηση	3.3	0.0016	0.45	400
100 kVp ακτινογραφία	5	0.0013	0.8	1000
125 kVp ακτινογραφία	4	0.0015	0.8	1000
150 kVp ακτινογραφία	3.3	0.0016	0.8	1000

a I είναι το μέγιστο συνεχές φορτίο της λυχνίας σε mA για τα συγκεκριμένα kVp.

β a είναι ο λόγος της έκθεσης λόγω σκεδαζόμενης προς την έκθεση λόγω προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο 1m από την πηγή.

γ d_{sca} είναι η απόσταση της πηγής από το σκεδαστή της ακτινοβολίας.

δ F είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του σκεδαστή της ακτινοβολίας.

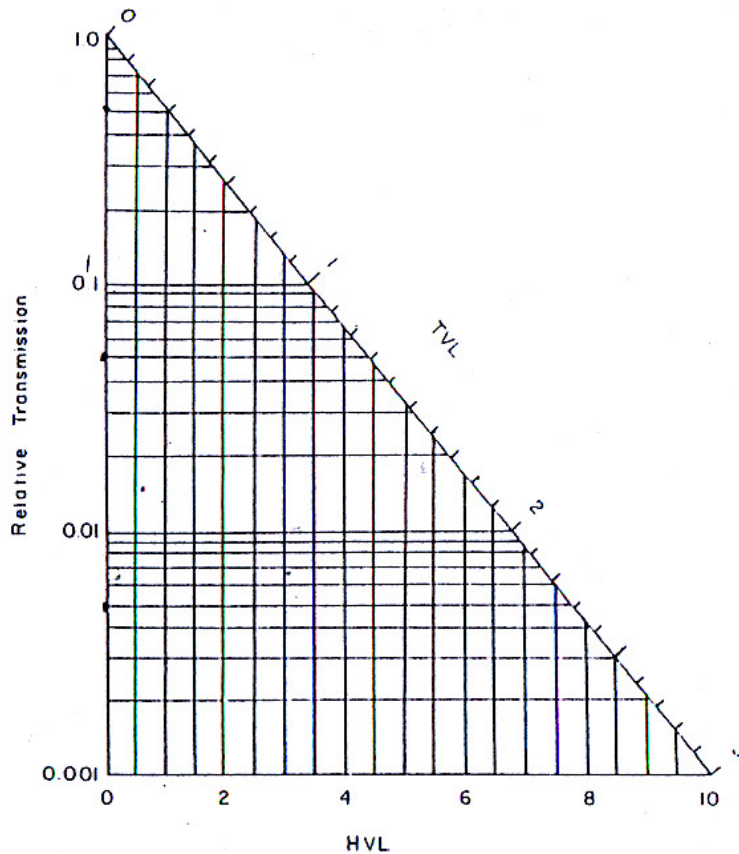
Πίνακας 1 Παράμετροι που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς των secondary barriers

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τα στοιχεία από τον παραπάνω πίνακα ο συντελεστής εξασθένησης υπολογίζεται ως εξής:

$$K_L = 0.1 * 5.64^2 * (600 * 4) / 1000 * 1 = 9.5429$$

Παίρνοντας την τιμή αυτού του συντελεστή που υπολογίσαμε πάμε στο παρακάτω διάγραμμα και διαβάζουμε πόσα HVL του μολύβδου χρειάζονται για τη θωράκισή μας.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η τιμή που προκύπτει υπερβαίνει κατά πολύ το 1 με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται ουσιαστικά επιπλέον θωράκιση έναντι της ακτινοβολίας διαρροής.



Διάγραμμα 2 Υπολογισμός πάχους θωράκισης από ακτινοβολία διαρροής

Για τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία ο συντελεστής εξασθένισης δίνεται από τη σχέση:

$$K_s = E_s d_{sca}^2 d_{sec}^2 \frac{400}{WTF_a}$$

Από τον πίνακα 2-7 παίρνουμε τις τιμές των d_{sca} , F και a και ο συντελεστής εξασθένισης παίρνει την τιμή :

$$K_s = (0.1 * 0.45^2 * 5.64^2 * 400) / (0.0015 * 1000 * 1 * 400) = 0.4294$$

Έχοντας την τιμή αυτή του K_s πάμε στο διάγραμμα 2-1 και διαβάζουμε πως το απαραίτητο πάχος του μολύβδου είναι 0.3 mm.

Συμπερασματικά λοιπόν έχουμε ένα συνολικό πάχος μολύβδου ίσο με 1.8 mm το οποίο θα προσφέρει ασφάλεια στον άνθρωπο που θα εργάζεται μέσα στο control room της εγκατάστασης από την πρωτογενή, την διαρρέουσα και τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Φυσικές και τεχνολογικές αρχές ακτινοδιαγνωστικής**
Ι. Κανδαράκης
Εκδόσεις ΕΛΛΗΝ, Αθήνα 1998.
- 2. Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολιών και ύλης – Δοσιμετρία – Ακτινοπροστασία**
Δ. Λεωνίδου
Ε.Μ.Π., Αθήνα 1984.
- 3. Ακτινοπροστασία**
Γ. Κουτρομπής
Εκδόσεις Λύχνος, Αθήνα 2000.
- 4. Απεικονίσεις και Θεραπευτικές Ακτινοβολήσεις Βιοϊατρικής Τεχνολογίας**
Μ. Ι. Αναγνωστάκης
Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006
- 5. Οδηγός διασφάλισης ποιότητας ακτινολογικού τμήματος, Τόμος Α**
Γ. Μαλαχίας, Α. Περρής, Ν. Παναγιωτάκης, Σ. Τσίλικας, Δ. Κατσιφαράκης,
Γ. Τσουρούφλης
Εκδόσεις Μπάστα, Αθήνα 2000
- 6. Μέθοδοι απεικόνισης**
Α. Κοκκινάκη, Π. Παντελάκη, Γ. Τσουρούφλης
Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, Αθήνα 2001
- 7. Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης φωτονιακών ακτινοβολιών και ύλης με χρήση του κώδικα PENELOPE – Εφαρμογή σε προβλήματα υπολογισμού θωρακίσεων και βαθμονόμησης ανιχνευτικών διατάξεων**
Διπλωματική Εργασία Αθανασίου Νικόλαου, Αθήνα 2006
- 8. NCRP Report No 147, Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities**
National Council on Radiation Protection and Measurements
U.S.A., October 2004
- 9. Radiation Shielding**
J.K. Shultis, R.E. Faw
American Nuclear Society, 1996.
- 10. Linear accelerators for radiation therapy**
D. Greene, P.C. Walbarst
Medical Science Series

11. **Physics of Radiology**
Antony Brinton Wolbarst
International Edition
12. **Medical Radiographic Imaging**
R. Pizzutiello Jr., J. E. Cullinan
Kodak, U.S.A. 1993
13. **Calculating Shielding Requirements in Diagnostic X-Ray departments**
M. Petronaki, C. Kappas, E. P. Efstathopoulos, Y. Theodorakos, G. Panayiotakis
The British Journal of Radiology, February 1999
14. **A model for Calculating Shielding Requirements in Diagnostic X-Ray facilities**
I. A. Tsalafoutas, E. Yakoumakis, P. Sandilos
The British Journal of Radiology, October 2003
15. **Important changes in medical X-ray imaging facilities shielding design methodology. A brief summary of recommendations in NCRP Report No 147**
B. R. Archer, J. E. Gray
Medical Physics, December 2005
16. **On the primary barrier in diagnostic X-ray shielding**
R. L. Dixon
Medical Physics, December 2005
17. **Shielding of diagnostic X-ray facilities for cost-effective and beneficial use and protection**
B. R. Archer
IRPA – 10, Course EO-6
18. **A revised schema for performing diagnostic X-Ray shielding calculations**
E. L. Mc Guire
Health Physicists, 1983
19. **Evaluation of NCRP Report No 49 assumptions on workloads and use factors in diagnostic radiology.**
D.J Simpkin, Medical Physicist 1996
20. **Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης φωτονίων με την ύλη, με τη χρήση του κώδικα EGS4, για απλές γεωμετρίες**
Διπλωματική Εργασία Στέφανου Διαμαντούρου, Αθήνα 2004

Internet

1. www.nndc.bnl.gov
2. www.ncrponline.org
3. www.iaea.or.at
4. www.icru.org
5. www.healthcare.siemens.com
6. <http://bjr.bjrjournals.org>
7. <http://scitation.aip.org/medphys/>