



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ
ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ
ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ
ΦΥΣΙΚΗΣ



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

«Μελέτη της διακριτικής ικανότητας μηχανής ακτίνων-Χ με τεχνικές προσομοίωσης Monte-Carlo»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

του Κωνσταντίνου Βασιλείου Αθανασόπουλου

Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Μ.Ι. Αναγνωστάκης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2017

Εισαγωγικό Σημείωμα

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποτελεί το επιστέγασμα της συμμετοχής μου στο Μεταπτυχιακό Διατμηματικό Πρόγραμμα Σπουδών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με τίτλο «Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές» που συντονίζει η Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών σε συνεργασία με τον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών και το Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος».

Ήταν πραγματικά μία όμορφη και ταυτόχρονα ωφέλιμη διαδρομή κατά την οποία αποκόμισα αξιόλογες γνώσεις και εμπειρίες. Στο τελευταίο τμήμα αυτής της πορείας με την εκπόνηση της παρούσας εργασίας με τίτλο «Μελέτη της χωρικής διακριτικής ικανότητας μηχανής ακτίνων-Χ με τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo» κατάφερα να εκπληρώσω μία επιθυμία που είχα σε προπτυχιακό στάδιο, όταν παρακολουθούσα μαθήματα του τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας, να ασχοληθώ με τη μέθοδο Monte Carlo και τη διαδικασία εκτέλεσης προσομοιώσεων.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μάριο Αναγνωστάκη, αφενός μεν για το χρόνο που διέθεσε και για την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της εργασίας, αφετέρου δε γιατί, όταν απευθύνθηκα σε αυτόν το 2014, με συμβούλεψε να παρακολουθήσω το συγκεκριμένο πρόγραμμα σπουδών, από τη στιγμή που πραγματικά το ήθελα. Παράλληλα μου έδωσε την ευκαιρία να λάβω μέρος σε σεμινάριο εκμάθησης του λογισμικού Gate (Geant4 Application for Tomographic Emission). Το σεμινάριο Gate έλαβε στο Jülich Campus στην πόλη της δυτικής Γερμανίας Jülich και αποτέλεσε μία ξεχωριστή εμπειρία στην ακαδημαϊκή μου πορεία.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Δημήτρη Καράγγελο, πτυχιούχο Φυσικό του Πανεπιστημίου Αθηνών και Διδάκτορα της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για την υποστήριξη που μου έδωσε, τόσο κατά την εκκίνηση της εκπόνησης της Δ.Ε., όταν με βοήθησε να κατανοήσω το περιβάλλον του προγράμματος που πραγματοποιεί προσομοιώσεις, όσο και κατά την εξέλιξή της, όταν εκτελούσε στον υπολογιστή του προσομοιώσεις της Δ.Ε. με στόχο να έχουμε άμεσα περισσότερα αποτελέσματα.

Επιπροσθέτως ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει στους συνάδελφους μηχανικούς που ασχολήθηκαν πριν από εμένα με την τεχνική προσομοιώσεων Monte Carlo. Χαρακτηριστικά αναφέρω τα ονόματα των Νικολάου Αθανασίου, Σπυρίδωνα Χαυλή και Αικατερίνης Μαρούδη. Τα αποτελέσματα των δικών τους

προσπαθειών ήταν ο θεμέλιος λίθος για να μπορέσω να ασχοληθώ επικοινωνητικά με την τεχνική προσομοιώσεων Monte Carlo.

Τέλος για ακόμη μια φορά θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους αγαπημένους μου γονείς, Βασίλη και Χρυσάνθη, για την αέναη και πολυδιάστατη υποστήριξη που μου παρέχουν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου αλλά και γενικότερα.

ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

Με τον όρο φυσική ραδιενέργεια εννοούμε την ιδιότητα που παρουσιάζουν ωρισμένα στοιχεία και οι ενώσεις τους να ακτινοβολούν ενέργεια χωρίς καμιά εξωτερική επίδραση.

Τα στοιχεία που παρουσιάζουν αυτήν την ιδιότητα ονομάζονται φυσικά, ραδιενεργά στοιχεία, και είναι σχεδόν όλα όσα έχουν ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από 82 (Ουράνιο, Ράδιο, ακτίριο κ. λ. π.).

Η ακτινοβόλουμένη ενέργεια οφείλεται στην αστάθεια των πυρήνων των στοιχείων αυτών, οι οποίοι διασπώνται εκπέμποντας είτε σωματία άλφα ($4 : 2 \text{ H E}$), είτε σωματία βήτα ($0 \text{ E} - 1$), και σε ρισμένες περιπτώσεις ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία γάμα (γ).

Όλα αυτά ανακαλύφθηκαν στο τέλος του περασμένου αιώνα, η δε μελέτη της φύσεως των ακτινοβολιών ολοκληρώθηκε στις αρχές του αιώνα μας από το ζεύγος CURIE.

Λίγο αργότερα (1919) θεμελιώθηκε η τεχνητή, ραδιενέργεια με την πρώτη τεχνητή διάσπαση πυρήνα από τον RUTHERFORD. (Κάποιος πυρήνας ενώ είναι σταθερός μετατρέπεται, με κατάλληλη, τεχνική, σε ραδιενεργό, συμπεριφερόμενος όπως οι πυρήνες των φυσικών ραδιενεργών στοιχείων.

Η αντίδραση αυτή έχει μεγάλη σημασία για την αρχαιολογία, γιατί με την βοήθειά της υπολογίζεται η ηλικία απολιθωμάτων, ξύλων, Παπύρων κ. λ. π.).

Οι ιδιότητες των ακτινοβολιών των ραδιενεργών σωμάτων είναι σημαντικές για την επιστήμη, σημαντικότερες όμως για την βιολογική τους δράση.

Σωματία άλφα : εκπέμπον-

ται από τους Πυρήνες με ταχύτητες που κυμαίνονται από 15.000 KM)SEC έως 25.000 KM)SEC εκπρέπονται από ηλεκτρικό και μαγνητικό, πεδίο δεδομένου ότι φέρουν θετικό φορτίο, προκαλούν ιονισμό των αερίων και έχουν μικρή διεισδυτική ικανότητα. Η βιολογική τους δράση για τον άνθρωπο περιορίζεται σε βλάβες της επιδερμίδας λόγω μικρής διεισδυτικής ικανότητας.

Σωματία βήτα : οι ταχύτητές τους ποικίλουν, μπορεί δε να πλησιάσουν την ταχύτητα του φωτός στο κενό (290.000 KM)SEC):

Φέρουν αρνητικό φορτίο, άρα εκπρέπονται από ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, έχουν δε μεγαλύτερη διεισδυτική ικανότητα εκείνης των σωματίων α. Όσον αφορά την δράση τους στους οργανισμούς προκαλούν βλάβες όχι όμως σε βάθος γιατί απορροφούνται γρήγορα από τους ιστούς.

Ακτίνες γ : Διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός, δεν εκπρέπονται από ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, γιατί δεν έχουν φορτίο, έχουν μεγάλη διεισδυτική ικανότητα και προκαλούν έντονο Ιονισμό των αερίων. Είναι η σημαντικότερη ραδιενεργή ακτινοβολία ως αναφορά την βιολογική τους δράση. Εισχωρούν σε μεγάλο βάθος στους ιστούς δημιουργώντας ανεπιθύμητες αλλοιώσεις. Κυρίως προσβάλλουν τα αιμοποιητικά όργανα να προκαλώντας λευχαιμία. Επίσης επιδρούν στα γονίδια των χρωματισμάτων και προκαλούν μεταλλάξεις, δηλαδή μεταβολές στις κληρονομικές ιδιότητες, με αποτελέσματα οδυνηρά πολλές φορές για τον άνθρωπο (π. χ. Τερατογένεση).

Γενικά μια ακτινοβολία είναι περισσότερο επικίφτηνη όσο μεγαλύτερη είναι η δόση της, όσο μικρότερος είναι ο χρόνος επιδράσεως και όσο μικρότερη είναι η περιοχή, στην οποία συγκεντρώνεται. Μικρή δόση όμως, με κατάλληλο τρόπο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θεραπευτικούς σκοπούς.

Τα παραπάνω αναφέρονται σε εξωτερική ακτινοβολία. Αν ραδιενεργοί πυρήνες μπουν μέσα στον οργανισμό τότε οι συνέπειες είναι περισσότερο οδυνηρές. Καθένα από τα ραδιενεργά στοιχεία έχει και οι επιπτώσεις τους είναι και οι επιπτώσεις τους είναι ακόμη ερευνητέες. (Μερικές περιπτώσεις : Το κάσιο 137 κατοστρέφει το σπύκι, το ιώδιο 131 συγκεντρώνεται, στο θυρεοειδή αδένα, το Βάριο 140 δημιουργεί όγκους στα οστά κ. λ. π.).

Τα βιολογικά αποτελέσματα της ακτινοβολίας των ιστών τα μετράμε με την μονάδα REM. Ο άνθρωπος σε όλη του τη ζωή μπορεί να απορροφήσει 200 REM χωρίς κίνδυνο.

Δόση ακτινοβολίας μεγαλύτερη των 600 REM σε μικρό χρονικό διάστημα είναι θανατηφόρα. Αξίζει εδώ ένα συγκριτικό παράδειγμα. Το σαλιγκάρι για να σκοτωθεί θέλει 20.000 REM και η αμοιβάδα 100.0000 REM.

Η ανησυχία του ανθρώπου σε παγκόσμια κλίμακα για τις επιπτώσεις της ραδιενέργειας δεν μπορεί παρά να είναι δικαιολογημένη αν αναλογισθεί κανείς πόσο ευαίσθητος είναι ο ανθρώπινος οργανισμός απέναντι στις ακτινοβολίες.

Αθανασόπουλος Βασίλης
ΦΥΣΙΚΟΣ

**Στην αγαπημένη μας Αγγέλω
Για όσο σοφά μας χάρισε
στα 103 χρόνια ζωής της**

Περιεχόμενα

1 ^ο Κεφάλαιο : Εισαγωγή.....	10
1. Συνοπτική περιγραφή Διπλωματικής Εργασίας.....	10
2 ^ο Κεφάλαιο : Παραγωγή και αλληλεπιδράσεις των ακτίνων-Χ με την ύλη	13
2.1 Οι ακτίνες-Χ	13
2.2 Η ανακάλυψη των ακτίνων-Χ	13
2.3 Φύση και ιδιότητες των ακτίνων-Χ.....	15
2.4 Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ηλεκτρονίων με την ύλη και δημιουργία των ακτίνων-Χ.....	16
2.4.1 Αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων με την ύλη	16
2.4.2 Φάσμα ακτίνων-Χ.....	18
2.4.3 Ακτινοβολία πέδησης	19
2.4.4 Χαρακτηριστική ακτινοβολία	20
2.5 Μηχανή παραγωγής ακτίνων-Χ	23
2.6 Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ακτίνων-Χ με την ύλη	25
2.6.1 Ελαστική Σκέδαση	26
2.6.2 Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο	27
2.6.3 Σκέδαση Compton.....	29
2.6.4 Η δίδυμη γένεση ή υλοποίηση της ακτινοβολίας γ.....	33
2.7 Εξασθένηση ακτινοβολίας μέσα στην ύλη	34
3 ^ο Κεφάλαιο : Η δημιουργία της ραδιογραφικής εικόνας και ο ποιοτικός έλεγχός της	38
3.1 Η μηχανή παραγωγής ακτίνων-Χ.....	38
3.2 Γενικά χαρακτηριστικά της μηχανής ακτίνων-Χ.....	38
3.3 Κατηγορίες μηχανών παραγωγής ακτίνων-Χ	39
3.3.1 Μηχανές ακτίνων-Χ με γεωμετρία πλαϊνού παραθύρου.....	39
3.3.2 Μηχανές ακτίνων-Χ με γεωμετρία end window.....	40
3.3.3 Μηχανές ακτίνων Χ με περιστρεφόμενο τμήμα ανόδου	41
3.3.4 Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της καθόδου	42

3.3.5	Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της ανόδου	42
3.3.6	Το κέλυφος της μηχανής παραγωγής ακτίνων-Χ.....	43
3.4	Η μηχανή ακτίνων-Χ στη διαγνωστική ραδιογραφία	44
3.5	Η δημιουργία εικόνας στη διαγνωστική ραδιογραφία	47
3.5.1.	Η χρήση του φιλμ στην εκτέλεση διαγνωστικής ραδιογραφίας.....	48
3.5.2.	Η χρήση του ενισχυτικών οθονών στην εκτέλεση διαγνωστικής ραδιογραφίας	49
3.6	Ποιότητα στην εκτέλεση της διαγνωστικής ραδιογραφίας	51
3.7	Ποιότητα στο αποτέλεσμα της διαγνωστικής ραδιογραφίας.....	52
3.7.1	Ασάφεια ορίων ραδιογραφίας.....	52
3.7.2	Διακριτική ικανότητα μεταξύ δύο αντικειμένων	55
3.7.3	Αντίθεση.....	55
3.7.4	Θόρυβος και κβαντικός θόρυβος.....	56
3.8	Βασικές παράμετροι για τη διασφάλιση της ποιότητας των ακτίνων-Χ.....	57
3.8.1	Η ορθή λειτουργία της μηχανής ακτίνων-Χ.....	57
3.8.2	Χρόνος έκθεσης κατά την εκτέλεση της ραδιογραφίας.....	59
3.8.3	Η μέτρηση του Half Value Layer (HVL)	60
3.8.4	Τα χαρακτηριστικά του εστιακού σημείου	65
3.8.5	Η επίδραση του θορύβου στη διαγνωστική εικόνα.....	73
3.9	Η Συνάρτηση Μεταφοράς Διαμόρφωσης (Modulation Transfer Function - MTF)	74
3.9.1	Πειραματικός προσδιορισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς Διαμόρφωσης.....	77
3.10	Η συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης για τα συστήματα απεικόνισης.....	80
3.10.1.	Ενισχυτής εικόνας	80
3.10.2.	Οθόνες και φιλμ.....	81
3.10.3.	Συστήματα απεικόνισης	82
3.11	Συνοπτική περιγραφή των διαδικασιών που απαιτούνται για τη διασφάλιση ποιότητας κατά την εκτέλεση διαγνωστικής ραδιογραφίας	83

4ο Κεφάλαιο : Ο κώδικας προσομοίωσης Monte-Carlo PENELOPE	85
4.1 Εισαγωγή	85
4.2 Παρουσίαση του Κώδικα PENELOPE προσομοίωσης με τη μέθοδο Monte Carlo	85
4.3 Δομή του κώδικα PENELOPE	88
4.4 Ο κώδικας χρήστη Penmain	90
4.5 Αρχεία εισόδου δεδομένων του κώδικα Penmain	92
4.5.1 Το αρχείο εισόδου δεδομένων τύπου *.in του κώδικα Penmain	93
4.5.2 Το αρχείο δεδομένων γεωμετρίας τύπου .geo του κώδικα Penmain	93
4.6 Ο ορισμός εικονικών ανιχνευτών κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης ...	94
4.6.1 Ανιχνευτής Αλληλεπίδρασης (Impact Detector)	94
4.6.2 Ανιχνευτής Αποτιθέμενης Ενέργειας (Energy Deposition Detector)	95
4.6.3 Ανιχνευτής Δόσης (Dose Enclosure)	95
4.7 Διαδικασία εκτέλεσης του κώδικα Penmain	95
4.7.1 Δημιουργία του αρχείου υλικών	96
4.7.2 Εκτέλεση κώδικα Penmain	97
4.7.3 Τα αρχεία αποτελεσμάτων κώδικα Penmain	98
4.8 Το αρχείο 3d-dose.dat	99
5ο Κεφάλαιο : Προσομοίωση του ποιοτικού ελέγχου μηχανής ακτίνων-Χ με την ύλη	103
5.1 Εισαγωγή	103
5.2 Περιγραφή της γεωμετρίας της διάταξης	104
5.3 Ορισμός ανιχνευτή δόσης	105
5.4 Απεικόνιση και επεξεργασία και των αποτελεσμάτων	105
5.5 Θεωρητικοί υπολογισμοί δεικτών ποιότητας ραδιογραφίας	109
5.6 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων προσομοίωσης που αφορούν το υλικό	110
5.7 Η επίδραση της επιλογής του υλικού του φιλμ στο ραδιογραφικό αποτέλεσμα	115

5.8	Μελέτη χωρικής διακριτικής ικανότητας της μηχανής ακτίνων Χ	119
5.8.1	Το μέγεθος του εστιακού σημείου	120
5.8.2	Η μεταβολή της απόστασης μεταξύ δοκιμίων δοκιμής και φιλμ	128
5.8.3	Η μεταβολή της απόστασης μεταξύ των δοκιμίων δοκιμής	137
5.8.4	Επίδραση της ενέργειας της ακτινοβολίας των ακτίνων Χ.....	146
5.8.5	Σύγκριση μονοενεργειακής ακτινοβολίας και φάσματος ενέργειας	151
6 ^ο	Κεφάλαιο : Επίλογος.....	160
6.1	Εισαγωγή.....	160
6.2	Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας	160
6.3	Αξιολόγηση εργασίας - Μελλοντικά Βήματα	163
	Παραρτήματα	165
1	Παράρτημα Α-Παρουσίαση όλων των προσομοιώσεων της παραμετρικής μελέτης με διαγράμματα χρωματικής κλίμακας.....	165
2	Παράρτημα Β-Διαδικασία αλλαγής κώδικα για τον ορισμό ανιχνευτών με μεγαλύτερη διαμέριση	178
3	Παράρτημα Γ-Βοηθητικά προγράμματα προγράμματος Penelope.....	179
4	Παράρτημα Δ-Συνοπτική παρουσίαση προγραμμάτων προβολής των αρχείων γεωμετρίας GVIEW 2d και GVIEW 3d.....	184
5	Παράρτημα Ε-Συνοπτική παρουσίαση του προγράμματος δημιουργίας απεικονίσεων gnuplot.exe.....	187
6	Παράρτημα ΣΤ-Παρουσίαση της δομής του αρχείου δεδομένων του κώδικα Penmain και αναλυτική επεξήγηση των διάφορων παραμέτρων του αρχείου εισόδου	191
7	Σεμινάριο Gate.....	197
	Βιβλιογραφία	199

1^ο Κεφάλαιο : Εισαγωγή

1. Συνοπτική περιγραφή Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (Δ.Ε.) αποτελεί η μελέτη της χωρικής διακριτικής ικανότητας μίας διάταξης απεικόνισης με ακτίνες-Χ, με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo. Ως χωρική διακριτική ικανότητα (spatial resolution) ορίζεται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο αντικειμένων που μπορεί να ανιχνευτεί από μία διάταξη.

Η λειτουργία της διάταξης, η οποία περιλαμβάνει τη μηχανή των ακτίνων-Χ, το φιλμ ραδιογραφίας και το αντικείμενο της ραδιογραφίας, προσομοιώθηκε μέσω του κώδικα PENELOPE (έκδοση 2011). Σκοπός των προσομοιώσεων ήταν η διερεύνηση της επίδρασης στο ραδιογραφικό αποτέλεσμα των διαφόρων παραμέτρων της ακτινοβολήσης. Οι κυριότερες παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, οι διαστάσεις του σημείου εστίασης (focal spot) της μηχανής ακτίνων-Χ, η θέση και η διάταξη των δοκιμίων δοκιμής (test objects) που θα χρησιμοποιηθούν ως αντικείμενα ραδιογραφίας.

Παράλληλα με την εκτέλεση των προσομοιώσεων αναλύθηκαν σε θεωρητικό επίπεδο οι κυριότερες συνιστώσες μιας διάταξης ραδιογραφίας.

Αναλυτικότερα, στο 2^ο Κεφάλαιο της Δ.Ε. παρουσιάζονται αρχικά ορισμένα ιστορικά στοιχεία με την ανακάλυψη των ακτίνων-Χ και τις ιδιότητές τους. Κατόπιν, γίνεται περιγραφή του μηχανισμού και των συνθηκών, κάτω από τις οποίες παράγονται οι ακτίνες-Χ, αναλύονται οι αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων με την ύλη και περιγράφεται το φάσμα των ακτίνων-Χ. Ακόμη αναλύονται οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των ακτίνων-Χ με την ύλη, ενώ τέλος γίνεται αναφορά και στην εξασθένηση της φωτονιακής ακτινοβολίας από την ύλη.

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφονται σε πρώτη φάση τα χαρακτηριστικά μίας μηχανής ακτίνων-Χ, παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες μηχανών ακτίνων-Χ και αναλύονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο μηχανισμός δημιουργίας της ραδιογραφικής εικόνας, προσεγγίζεται η έννοια της ποιότητας της εικόνας σε εφαρμογές διαγνωστικής ραδιογραφίας, περιγράφονται οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν το επίπεδο ποιότητας σε μία τέτοια διαδικασία και γίνονται προτάσεις για την βελτίωση της ποιότητας της εικόνας. Τέλος, παρουσιάζεται η συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης (Modulation Transfer Function), η οποία περιγράφει με ποσοτικό τρόπο τη μεταβολή της πληροφορίας

της ραδιογραφικής εικόνας καθώς αυτή γίνεται αντικείμενο επεξεργασίας από ένα σύστημα προβολής.

Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη παρουσίαση της δομής και του τρόπου λειτουργίας του κώδικα PENELOPE. Αρχικά γίνεται μια σύντομη αναφορά στην προσομοίωση με τη μέθοδο Monte Carlo ενώ στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας και το λογικό διάγραμμα ενός τυπικού προγράμματος προσομοίωσης. Επιπλέον, αναλύεται σε βάθος ο κώδικας Penmain, ο οποίος συνιστά το τμήμα του λογισμικού της PENELOPE που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα αρχεία εισόδου δεδομένων και γεωμετρίας, μέσα από τα οποία δίνεται η δυνατότητα να καθοριστούν ρεαλιστικά τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε προσομοίωσης. Τέλος, γίνεται αναφορά στα είδη εικονικών ανιχνευτών που μπορούν να οριστούν μέσα από το λογισμικό προσομοίωσης και κυρίως του ανιχνευτή δόσης, οποίος κατά κύριο λόγο χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

Στο 5^ο κεφάλαιο της παρουσιάζεται το σύνολο των αποτελεσμάτων των παραμετρικών προσομοιώσεων. Αρχικά γίνεται μία σύντομη περιγραφή και επεξήγηση του τρόπου παρουσίασης των αποτελεσμάτων και της περαιτέρω επεξεργασίας τους. Στόχος της επεξεργασίας τους μέσω στατιστικών υπολογισμών είναι η απεικόνισή τους με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα αναφορικά με τη διακριτική ικανότητα της διάταξης. Το βασικό κομμάτι των προσομοιώσεων εστιάζεται, όπως προαναφέρθηκε, στις σημαντικές συνιστώσες της ραδιογραφικής διάταξης (διαστάσεις focal spot, ενέργεια ακτινοβολίας, γεωμετρία διάταξης). Ωστόσο, θα παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα βοηθητικών προσομοιώσεων, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για να απαντήσουν σε ευρύτερους προβληματισμούς που έθεσε η εξέλιξη των βασικών προσομοιώσεων. Αναμφίβολα και αυτά τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως για παράδειγμα η σύγκριση του ραδιογραφικού αποτελέσματος για μονοενεργειακή ακτινοβολία και για ακτινοβολία με φάσμα ακτινοβολίας.

Το 6^ο κεφάλαιο αποτελεί τη σύνοψη της Διπλωματικής Εργασίας, όπου γίνεται μία συγκεντρωτική αναφορά στα συμπεράσματα που προέκυψαν από το προηγούμενο κεφάλαιο ενώ παρουσιάζονται οι προοπτικές που δημιουργούνται από την παρούσα εργασία.

Επιπροσθέτως η εργασία ολοκληρώνεται με 7 παραρτήματα. Στο πρώτο παράρτημα βρίσκονται συγκεντρωμένα όλα τα διαγράμματα χρωματικής κλίμακας που σχετίζονται με αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης που

πραγματοποιήθηκε. Το δεύτερο παράρτημα αφορά κάποιες μεταβολές που πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα του προγράμματος προσομοίωσης με στόχο την ορθότερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Ακόμη στο τρίτο παράρτημα περιγράφεται η λειτουργία βοηθητικών προγραμμάτων που περιλαμβάνονται στο γενικό πρόγραμμα προσομοιώσεων. Το τέταρτο παράρτημα περιλαμβάνει συνοπτική περιγραφή των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση των σωμάτων που δημιουργεί μέσα από το λογισμικό ο χρήστης ενώ στο πέμπτο παράρτημα παρουσιάζεται το πρόγραμμα απεικόνισης αποτελεσμάτων που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον στο έκτο παράρτημα δίνονται αναλυτικά το περιεχόμενο του αρχείου εισόδου του κώδικα Penmain και επεξηγούνται οι διάφορες παράμετροι του αρχείου εισόδου. Τέλος στο έβδομο παράρτημα πραγματοποιείται σύντομη αναφορά στο σεμινάριο του λογισμικού προσομοίωσης και απεικόνισης τεχνικών διαγνωστικής ραδιολογίας και ακτινοθεραπείας Gate, στο οποίο έλαβα μέρος από 19/9/2016 έως 23/9/2016 στο Jülich Campus, το οποίο αποτελεί παράρτημα του πανεπιστημίου του Άαχεν (FH Aachen University of Applied Sciences).

Στο τελευταίο τμήμα της εργασίας καταγράφεται η ελληνική και ξένη βιβλιογραφία που αποτέλεσε θεμέλιο λίθο για την ανάπτυξη της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

2^ο Κεφάλαιο : Παραγωγή και αλληλεπιδράσεις των ακτίνων-Χ με την ύλη

2.1 Οι ακτίνες-Χ

Οι ακτίνες-Χ παράγονται όταν ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη. Τα ηλεκτρόνια κατά τις αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη προκαλούν αφ' ενός μεν διεγέρσεις, αφετέρου δε ιονισμούς των ατόμων της ύλης. Όταν τα άτομα αυτά εν συνεχεία αποδιεγείρονται, εκπέμπονται φωτόνια καθορισμένων ενεργειών, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές των ατόμων του υλικού μέσου. Επιπλέον, τα ηλεκτρόνια, λόγω της επιβράδυνσής τους στο ηλεκτρικό πεδίο των πυρήνων των ατόμων, εκπέμπουν ακτινοβολία, η οποία είναι γνωστή ως ακτινοβολία πέδησης. Τα φωτόνια, τα οποία εκπέμπονται με τους παραπάνω μηχανισμούς (λόγω αποδιέγερσης ή πεδήσεως) αποτελούν στο σύνολο τους τις ακτίνες-Χ.

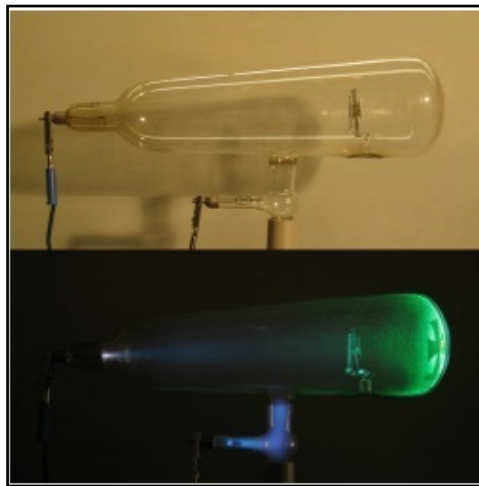
2.2 Η ανακάλυψη των ακτίνων-Χ

Το 1895 ο Γερμανός φυσικός Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) προχώρησε σε μία σημαντική ανακάλυψη, η οποία έμελλε να αποτελέσει ορόσημο για την εξέλιξη της φυσικής. Κατά τη διάρκεια του 1895 ο Röntgen μελετούσε τις επιδράσεις που είχαν στο εξωτερικό περιβάλλον οι ηλεκτρικές εκκενώσεις μέσα σε σωλήνες κενού (vacuum tubes).



Σχήμα 2.1-Wilhelm Conrad Röntgen

Συγκεκριμένα, μελετούσε μία δέσμη ηλεκτρονίων, η οποία έπεφτε σε μεταλλικό στόχο σε συνθήκες κενού. Στις αρχές Νοεμβρίου, επαναλαμβάνοντας τα πειράματα του με ένα σωλήνα τύπου Lenard, ο οποίος είχε ένα λεπτό παράθυρο αλουμινίου, προσέθεσε ένα κάλυμμα από χαρτόνι μπροστά από το παράθυρο. Ήξερε πως το κάλυμμα αυτό απέτρεπε το φως από το να βγει έξω από το σωλήνα, αλλά παρατήρησε πως «αόρατες ακτίνες» προκάλεσαν εκπομπή ορατής ακτινοβολίας (φθορισμό) σε ένα χαρτόνι που είχε επικαλυφθεί με άλας λευκόχρυσου-κυανιούχου βαρίου ($\text{BaPt}(\text{CN})_4$). Ο Röntgen κατάλαβε πως το ίδιο θα συνέβαινε και με τους σωλήνες τύπου Hittorf- Crookes, των οποίων τα τοιχώματα ήταν πολύ πιο λεπτά από αυτά του τύπου Lenard.



Σχήμα 2.2-Σωλήνες τύπου Hittorf-Crookes

Σε επόμενο πείραμα κατασκεύασε ένα μαύρο κάλυμμα ίδιο με αυτό που είχε χρησιμοποιήσει στα πρώτα πειράματα και κάλυψε με αυτό το σωλήνα τύπου Hittorf-Crookes. Επιπλέον συνέδεσε στα ηλεκτρόδια της καθόδου πηνίο Ruhmkorff, έτσι ώστε να δημιουργηθεί το ηλεκτροστατικό πεδίο. Στη συνέχεια ξεκίνησε το πείραμα σε σκοτεινό δωμάτιο. Καθώς προκλήθηκε η ηλεκτρική εκκένωση παρατήρησε μία μικρή λάμψη στο κάλυμμα με το λευκόχρυσου-κυανιούχο βάριο, το οποίο βρισκόταν δίπλα από το σωλήνα, χωρίς ωστόσο να το έχει χρησιμοποιήσει. Έτσι κατάλαβε πως πρόκειται για ένα νέο είδος ακτινοβολίας, η οποία διαπερνούσε αρκετά υλικά. Λόγω της άγνωστης φύσης της ακτινοβολίας αυτής, έδωσε σε αυτήν το όνομα ακτίνες-X. Αργότερα ονομάστηκαν ακτίνες Röntgen προς τιμή του. Αμέσως αναγνώρισε τα μοναδικά χαρακτηριστικά της νέας ακτινοβολίας και τις πιθανές

εφαρμογές της, όπως η ραδιογραφία. Η πρώτη ραδιογραφία που έβγαλε ήταν του χεριού της συζύγου του, Anna Bertha.



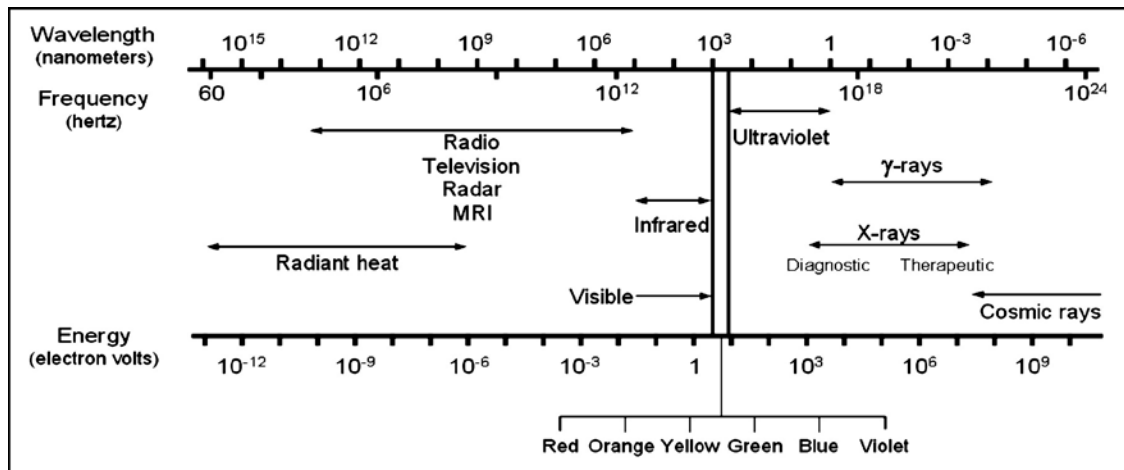
Σχήμα 2.3-Ραδιογραφία του χεριού της Anna Bertha

2.3 Φύση και ιδιότητες των ακτίνων-Χ

Από τη στιγμή της ανακάλυψης της νέας ακτινοβολίας έως και σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί πλήθος από πειράματα και μελέτες με απώτερο στόχο την ταυτοποίηση αυτής της «άγνωστης» ακτινοβολίας. Για να επιτευχθεί η ταυτοποίηση των ακτίνων-Χ είναι απαραίτητη τόσο η γνώση για τη φύση τους, όσο και η καταγραφή των ιδιοτήτων τους.

Οι ακτίνες-Χ μαζί με τις ακτίνες-γ αποτελούν φωτονιακές ακτινοβολίες και είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως ακτινοβολίες, όπως και το φως. Η μόνη διαφορά μεταξύ των ακτίνων-Χ και των ακτίνων-γ είναι η προέλευσή τους, ενώ όσον αφορά τις ιδιότητές τους δεν υπάρχει διαφορά. Στο σχήμα 2.4 δίνονται οι περιοχές συχνότητας (ν), μήκους κύματος (λ) και ενέργειας (E) των ακτίνων-Χ στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα:

Οι ακτίνες-Χ έχουν αρκετά μικρό μήκος κύματος και επομένως υψηλές συχνότητες και ενέργεια. Το μήκος κύματος τους κυμαίνεται από 10^{-9} έως 10^{-12} m και η συχνότητά τους από 3×10^{16} έως 3×10^{19} Hz. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4, η ενεργειακή περιοχή των ακτίνων-Χ και η ενεργειακή περιοχή των ακτίνων-γ επικαλύπτονται σημαντικά. Συνεπώς δεν έχει νόημα ή διάκριση ακτίνων-Χ και ακτίνων-γ ενεργειακά.



Σχήμα 2.4-Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

. Οι ακτίνες-Χ ανάλογα με την ενέργεια τους διακρίνονται σε «μαλακές» (0.12 - 12 keV) και «σκληρές» ακτίνες-Χ (12 έως 120 keV).

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των ακτίνων-Χ ,όπως και κάθε ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συνδέονται με βάση την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$c = \lambda * \nu = \frac{\lambda * E}{h} \leftrightarrow E = h * \nu$$

όπου:

$c = 2,997925 * 10^8 m / sec$, η ταχύτητα του φωτός στο κενό

$h = 6,626068 * 10^{-34} J * s$, η σταθερά του Planck

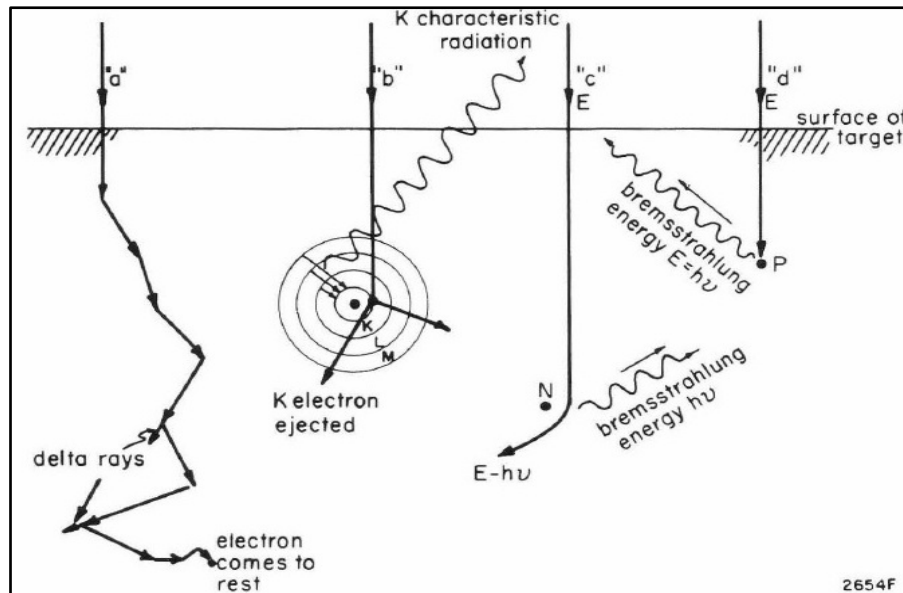
2.4 Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ηλεκτρονίων με την ύλη και δημιουργία των ακτίνων-Χ

Στις ακόλουθες παραγράφους αναλύονται οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των ακτινοβολιών με την ύλη καθώς και η συσχέτισή τους με τη παραγωγή ακτίνων-Χ.

2.4.1 Αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων με την ύλη

Οι αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων με την ύλη οφείλονται στις δυνάμεις Coulomb που αναπτύσσονται μεταξύ των φορτισμένων σωματιδίων. Παράλληλα η απώλεια της ενέργειάς τους οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις μη ελαστικές σκεδάσεις με περιφερειακά ηλεκτρόνια και με τους πυρήνες της ύλης. Όταν ένα ηλεκτρόνιο

υψηλής ταχύτητας αλληλεπιδρά με τα άτομα του στόχου σε μία μηχανή ακτίνων-Χ τότε μπορεί να συμμετάσχει σε διαφορά είδη αλληλεπιδράσεων [5] , οι οποίες απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 2.5:



Σχήμα 2.5-Πιθανά είδη αλληλεπιδράσεων των ηλεκτρονίων με το υλικό της ανόδου [5]

- το ηλεκτρόνιο πραγματοποιεί ελαστικές σκεδάσεις με τα άτομα του υλικού του στόχου, χωρίς σημαντική απώλεια ενέργειας σε κάθε αλληλεπίδραση.
- το ηλεκτρόνιο συγκρούεται με άτομο του στόχου με αποτέλεσμα τον ιονισμό του. Ένα ηλεκτρόνιο από μία στιβάδα απελευθερώνεται ενώ ταυτόχρονα ένα ηλεκτρόνιο από στιβάδα υψηλότερης ενεργειακής στάθμης μεταβαίνει στην στιβάδα που έχει κενό με ταυτόχρονη εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας-Χ που ισοδυναμεί με την διαφορά ενέργειας ανάμεσα στην αρχική και στην τελική στιβάδα του ηλεκτρονίου.
- το ηλεκτρόνιο συγκρούεται με άτομο του στόχου με αποτέλεσμα τη διέγερσή του. Ένα ηλεκτρόνιο από μία στιβάδα απορροφά την ενέργεια του ηλεκτρονίου, η οποία σε κάθε περίπτωση είναι μικρότερη από την ενέργεια ιονισμού του. Το ηλεκτρόνιο διεγείρεται και στη συνέχεια αποδιεγείρεται με ταυτόχρονη εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας-Χ που ισοδυναμεί με την ενέργεια του ηλεκτρονίου που αρχικά απορρόφησε.
- το ηλεκτρόνιο αλληλεπιδρά με το θετικά φορτισμένο πυρήνα του ατόμου με αποτέλεσμα τη μεταβολή της κινητικής ενέργειάς του. Η απώλεια της

κινητικής ενέργειας θα εμφανιστεί ως φωτονιακή ακτινοβολία, η οποία ονομάζεται ακτινοβολία πέδησης.

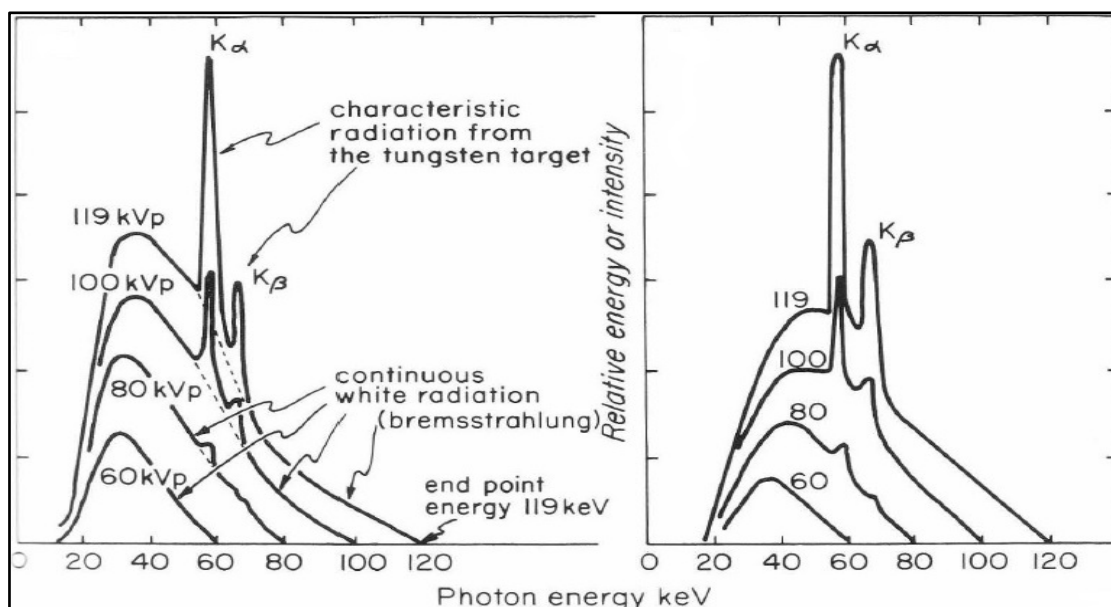
- το ηλεκτρόνιο αλληλεπιδρά με τον θετικά φορτισμένο πυρήνα του ατόμου με αποτέλεσμα πρακτικά την απώλεια όλης της κινητικής του ενέργειας. Η απώλεια της κινητικής ενέργειας θα εμφανιστεί ως φωτονιακή ακτινοβολία, η οποία ονομάζεται ακτινοβολία πέδησης.

Συγκεντρωτικά, η παραγωγή ακτίνων-Χ μπορεί να υλοποιηθεί μέσω δύο μηχανισμών:

- από την εκπομπή φωτονίων που προκύπτουν από την επιβράδυνση ηλεκτρονίων όταν αυτά προσεγγίσουν τον πυρήνα ενός ατόμου,
- από την εκπομπή φωτονίων λόγω αποδιέγερσης ή ιονισμού ενός ατόμου (χαρακτηριστική ακτινοβολία).

2.4.2 Φάσμα ακτίνων-Χ

Για να γίνουν κατανοητές οι θεμελιώδεις διαδικασίες που σχετίζονται με την παραγωγή ακτίνων-Χ θα εξεταστούν οι ιδιότητες μιας τυπικής δέσμης ακτίνων-Χ, όπως αυτή απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 2.6. Σε αυτό απεικονίζονται τα φάσματα εκπομπής φωτονίων προερχόμενα από τη λειτουργία διαγνωστικής μηχανής ακτίνων-Χ στα 60, 80, 100, και 120kV. Τα γραφήματα δίνουν το πλήθος φωτονίων ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων.



Σχήμα 2.6-Φάσμα Ακτινοβολίας μηχανής ακτίνων-Χ για διάφορες τιμές της τάσης λειτουργίας [5]

Η καταγραφή των παραπάνω φασμάτων παρέχει σημαντικές πληροφορίες. Από τις παραπάνω απεικονίσεις προκύπτει το συμπέρασμα πως το φάσμα των ακτίνων-Χ είναι σύνθετο με έντονες γραμμές (γραμμικό φάσμα) πάνω σε συνεχές φάσμα. Το συνεχές φάσμα που ονομάζεται «λευκή ακτινοβολία» ή «ακτινοβολία πέδησης», επειδή οφείλεται σε αυτό καθ' αυτό το φαινόμενο, στην πέδηση των ταχέως κινούμενων ηλεκτρονίων του πεδίου των πυρήνων των ατόμων του υλικού της ανόδου. Το γραμμικό φάσμα οφείλεται στην αποδιέγερση διεγερμένων καταστάσεων, τις οποίες προκαλούν τα ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια, όταν αλληλεπιδρούν με τα περιφερειακά ηλεκτρόνια των ατόμων του υλικού της ανόδου. Επομένως, το φάσμα τούτο αποτελείται από φωτόνια με συχνότητες χαρακτηριστικές του είδους των ατόμων της ανόδου και ονομάζεται «χαρακτηριστική ακτινοβολία».

Από όσα αναφέρθηκαν μέχρι τώρα γίνεται φανερό ότι η μορφή του φάσματος ακτίνων-Χ εξαρτάται από το υλικό της ανόδου (γραμμικό φάσμα) και από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου (συνεχές φάσμα). Η ένταση του φάσματος, δηλαδή, το πλήθος των εκπεμπόμενων από την άνοδο φωτονίων ορισμένης συχνότητας, ανά μονάδα χρόνου, εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία της καθόδου, δηλαδή από το πλήθος των ανά μονάδα χρόνου ηλεκτρονίων που έλκονται, όσο και από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ καθόδου και ανόδου, δεδομένου ότι με τη μεταβολή της τάσεως αυτής μεταβάλλεται το πλήθος των ηλεκτρονίων τα οποία εξαναγκάζονται να κατευθυνθούν προς το στόχο (την άνοδο).

2.4.3 Ακτινοβολία πέδησης

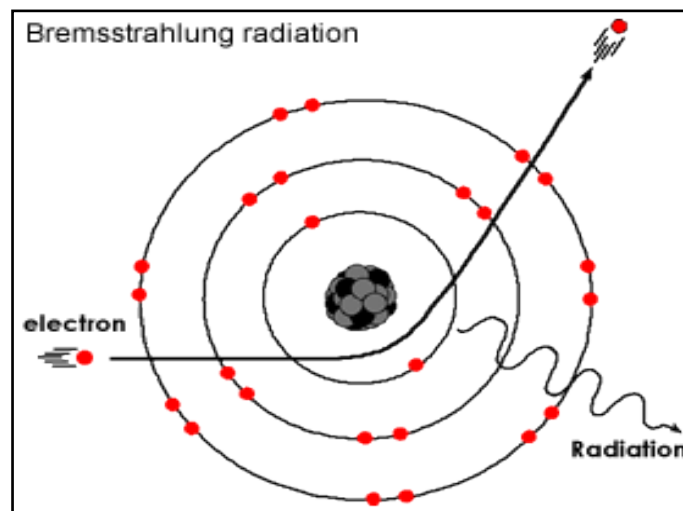
Όταν ένα ηλεκτρόνιο βρεθεί πολύ κοντά στον πυρήνα ενός ατόμου, είναι δυνατόν να χάσει μέρος ή ολόκληρη την κινητική ενέργειά του. Το ηλεκτρόνιο επιβραδύνεται καθώς δέχεται ισχυρές ηλεκτρικές δυνάμεις Coulomb από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα και αυτό προκαλεί τη μείωση της κινητικής ενέργειάς του και την αλλαγή της ευθύγραμμης πορείας του. Σύμφωνα με το αρχή της διατήρησης της ενέργειας, η κινητική ενέργεια που χάνει το ηλεκτρόνιο μετατρέπεται σε φωτόνιο ίσης ενέργειας.

Το σύνολο των φωτονίων που εκπέμπονται μέσω αυτού του μηχανισμού, της επιβράδυνσης δηλαδή των ηλεκτρονίων αποτελούν την ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung) ή «λευκή ακτινοβολία» (white radiation). Το πόσο κοντά στον πυρήνα θα βρεθεί το ηλεκτρόνιο θα καθορίσει και το ποσοστό της κινητικής του ενέργειας που θα χάσει και ταυτόχρονα την ενέργεια του φωτονίου που εκπέμπεται.

Όταν το ηλεκτρόνιο χάσει ολόκληρη την κινητική του ενέργεια, τότε αυτή μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε ενέργεια της ακτινοβολίας-Χ.

Το φαινόμενο εκπομπής ακτινοβολίας πεδήσεως είναι αξιόλογο στην περίπτωση των ηλεκτρονίων, γιατί τα ηλεκτρόνια αποκλίνουν έντονα από την αρχική τους πορεία στα ηλεκτρικά πεδία των πυρήνων, λόγω της μικρής τους μάζας. Στην περίπτωση άλλων βαρύτερων φορτισμένων σωματιδίων (π.χ. α) το φαινόμενο εκπομπής ακτινοβολίας πεδήσεως είναι αμελητέο.

Επειδή τα φωτόνια που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία μπορούν να έχουν οποιαδήποτε ενέργεια, από 0 keV έως την ενέργεια του αρχικού ηλεκτρονίου, η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται και συνεχής ακτινοβολία (continuum radiation) και εμφανίζει συνεχές ενεργειακό φάσμα και ανισότροπη κατανομή της εντάσεώς της.

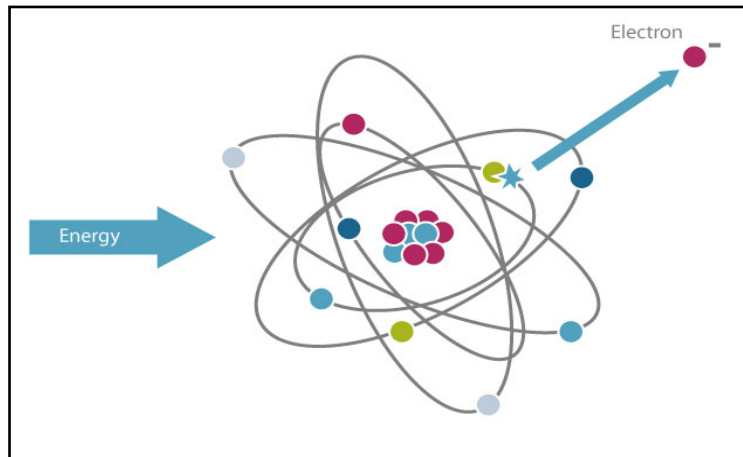


Σχήμα 2.7-Εκπομπή ακτινοβολίας πέδησης

2.4.4 Χαρακτηριστική ακτινοβολία

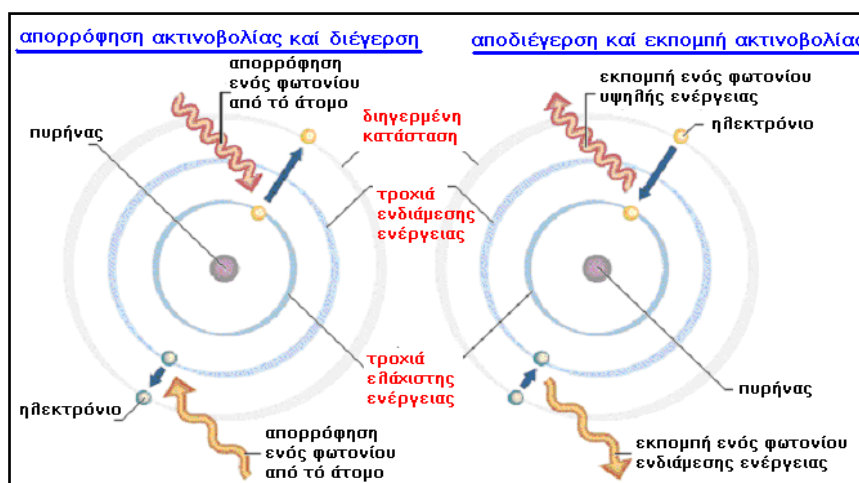
Κάθε στιβάδα ενός ατόμου σχετίζεται με συγκεκριμένα ενεργειακά επίπεδα, στα οποία είναι δυνατόν να βρεθεί το ηλεκτρόνιο. Για ένα ηλεκτρόνιο, το οποίο αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο στιβάδας ενός ατόμου, εφόσον η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσής του ηλεκτρονίου στη στιβάδα τότε είναι πιθανό να προκληθεί ιονισμός, δηλαδή απελευθέρωση του ηλεκτρονίου της στιβάδας. Επιπλέον υπάρχει η πιθανότητα διέγερσης του ατόμου, δηλαδή μετακίνησης του ηλεκτρονίου της στιβάδας σε ανώτερη στιβάδα του ατόμου, γεγονός που οδηγεί το άτομο σε μη θεμελιώδη κατάσταση. Αποτέλεσμα και των δύο παραπάνω φαινομένων είναι η αποδιέγερση του ατόμου και η εκπομπή ακτινοβολίας.

Στην πρώτη περίπτωση (σχήμα 2.8) η εκπομπή ακτινοβολίας προέρχεται από τη μετακίνηση ενός ηλεκτρονίου που αρχικά βρισκόταν σε στιβάδα μεγαλύτερης ενεργειακής στάθμης στην αντίστοιχη στιβάδα όπου πραγματοποιήθηκε ο ιονισμός. Το φωτόνιο που εκπέμπεται έχει ενέργεια ίση με την διαφορά ενέργειας των δύο στιβάδων.



Σχήμα 2.8-Μηχανισμός ιονισμού ατόμου

Στη δεύτερη περίπτωση (σχήμα 2.9) το διεγερμένο ηλεκτρόνιο μετακινείται σε στιβάδα μεγαλύτερης ενεργειακής στιβάδας για μικρό χρονικό διάστημα και επιστρέφει στην αρχική θέση του με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου με ενέργεια ίση με τη διαφορά ενέργειας ανάμεσα στις δύο στιβάδες.



Σχήμα 2.9-Μηχανισμός διέγερσης και αποδιέγερσης ατόμου

Στο σχήμα 2.10 που ακολουθεί παρατίθενται τα ενεργειακά επίπεδα των διαφόρων στιβάδων για μία σειρά από στοιχεία [5]. Όπως διαπιστώνεται, η στιβάδα L αποτελείται από επιμέρους τρία ενεργειακά επίπεδα (υποστιβάδες), η στιβάδα M

από 5 επιμέρους ενεργειακά επίπεδα και η στιβάδα N αντίστοιχα από 7 επιμέρους ενεργειακά επίπεδα.

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 2.10 για το βολφράμιο (W) απαιτούνται 69,525 keV, ώστε να προκληθεί ιονισμός ηλεκτρονίου από τη στιβάδα K. Εφόσον προκύψει τέτοιος ιονισμός ηλεκτρονίου από την στιβάδα K, η θέση θα καλυφθεί από ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στις επόμενες στιβάδες (L,M,N) πραγματοποιώντας μία μετάβαση. Για παράδειγμα όταν ένα ηλεκτρόνιο μετακινηθεί από τη στιβάδα L_{III} στη K εκπέμπεται ένα φωτόνιο με ενέργεια που ισούται με την διαφορά ενέργειας των δύο στιβάδων, δηλαδή:

$$69.525 \text{ keV} - 10.204 \text{ keV} = 59.321 \text{ keV}$$

Critical X ray Absorption Energies (keV)							
Shell	Oxygen Z = 8	Calcium Z = 20	Copper Z = 29	Molybdenum Z = 42	Tin Z = 50	Tungsten Z = 74	Lead Z = 82
K	.533	4.037	8.981	20.000	29.200	69.525	88.004
L _I	.024	1.438	1.096	2.867	4.465	12.098	15.861
L _{II}	.009	.350	.953	2.625	4.156	11.541	15.200
L _{III}	.009	.346	.933	2.521	3.929	10.204	13.035
M _I	—	.044	.122	.505	.884	2.820	3.851
M _{II}	not	.025	.074	.410	.756	2.575	3.554
M _{III}	filled	.025	.074	.392	.714	2.281	3.066
M _{IV}	—	—	.007	.230	.493	1.871	2.586
M _V	—	—	.007	.228	.485	1.809	2.484

From Storm and Israel (S1)

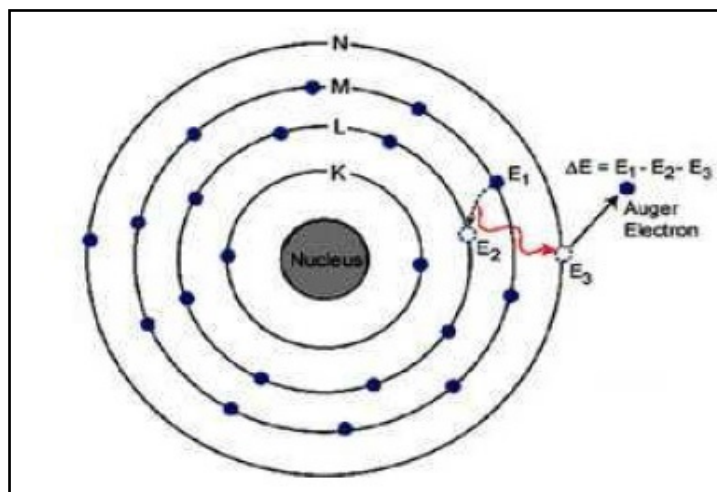
Σχήμα 2.10-Πίνακας ενεργειακής κατανομή ηλεκτρονίων σε στιβάδες για διάφορα υλικά

Αν και εκ πρώτης όψεως φαίνεται πιθανή μία οποιαδήποτε μετάβαση από τις στιβάδες L,M,N στην K ,η κβαντομηχανική εξηγεί και ουσιαστικά απαγορεύει πολλές από τις δυνατές μεταβάσεις και τελικά επιτρέπει μόνο αυτές που ακολουθούν συγκριμένους κανόνες.

Η αξιολόγηση και ο διαχωρισμός της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας σε σχέση με την ακτινοβολία πέδησης εξαρτάται από τη τάση λειτουργίας της μηχανής ακτίνων-Χ και από την εφαρμογή φίλτρων. Σε διαγνωστικές εφαρμογές η χαρακτηριστική ακτινοβολία μπορεί να αντιστοιχεί στο ~30% του συνόλου της

ακτινοβολίας, ενώ σε θεραπευτικές εφαρμογές με ονομαστική τάση λειτουργίας 200 kV αντιστοιχεί σε πολύ μικρά ποσοστά.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι ως χαρακτηριστική ακτινοβολία, η οποία εκπέμπεται κατά την αποδιέγερση διεγερμένου ατόμου των ακτίνων-Χ θεωρούνται και τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται κατά το φαινόμενο Auger. Τα ηλεκτρόνια Auger είναι περιφερειακά ηλεκτρόνια του ατόμου που ανήκουν σε στιβάδα υψηλότερη της στιβάδας, όπου δημιουργήθηκε το κενό, και τα οποία, εφόσον η ενέργεια, η οποία πρέπει να εκπνευθεί κατά την αποδιέγερση του ατόμου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια ιονισμού τους, αποδεδμεύονται από το άτομο έχοντας κινητική ενέργεια το υπόλοιπο της ενέργειας (εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Με αυτή τη διαδικασία αντί να πραγματοποιηθεί αποδιέγερση του ατόμου με εκπομπή ακτίνων-Χ έχουμε αποδιέγερση με εκπομπή ηλεκτρονίου Auger [7].



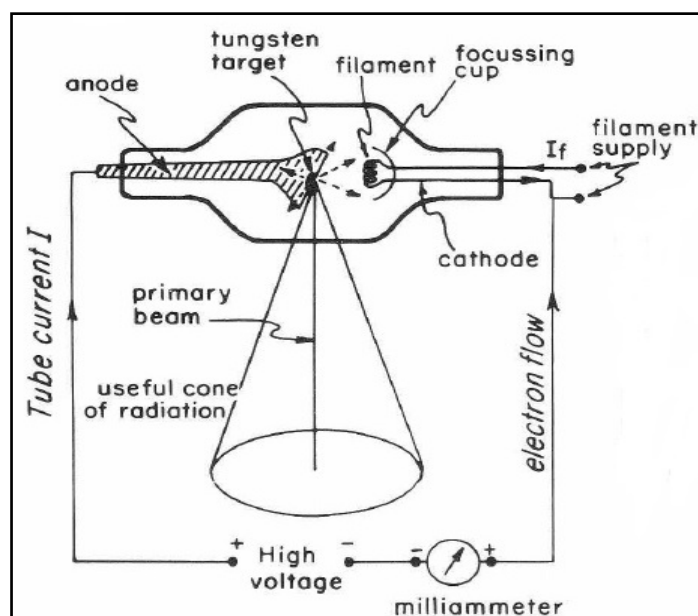
Σχήμα 2.11-Φαινόμενο Auger

2.5 Μηχανή παραγωγής ακτίνων-Χ

Οι ακτίνες-Χ είναι ακτινοβολία που παράγεται όταν ένα υλικό βομβαρδίζεται από ηλεκτρόνια υψηλής ταχύτητας. Όλες οι διατάξεις παραγωγής ακτίνων-Χ αποτελούνται από μια διάταξη καθόδου και μία ανόδου, οι οποίες τοποθετούνται μέσα σε ένα γυάλινο περίβλημα σε κενό αέρος. Χαρακτηριστικό είναι το σχήμα 2.12, όπου απεικονίζεται μια τυπική διάταξη παραγωγής ακτίνων-Χ. Σε αυτή παρατηρούμε το συγκρότημα καθόδου, το οποίο αποτελείται από ένα νήμα βολφραμίου με τη μορφή αντίστασης και τοποθετείται σε ένα ειδικά διαμορφωμένο κυάθιο. Κατά τη λειτουργία της μηχανής το νήμα βολφραμίου θερμαίνεται εξαιτίας της διέλευσης των ηλεκτρονίων και ηλεκτρόνια εκπέμπονται από το νήμα στον περιβάλλοντα χώρο λόγω θερμοϊονικής εκπομπής. Παράλληλα, η άνοδος της

μηχανής κατασκευάζεται έτσι ώστε να είναι σε θετικό δυναμικό σε σχέση με την κάθοδο. Συνεπώς τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από την κάθοδο έλκονται από την άνοδο και επιταχύνονται στο υφιστάμενο ηλεκτρικό πεδίο. Το κυάθιο εστίασης έχει σχεδιαστεί ώστε τα ηλεκτρόνια να συγκεντρώνονται σε ένα μικρό τμήμα της ανόδου, που ονομάζεται εστιακό σημείο (focal spot).

Λόγω του κενού ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο, τα ηλεκτρόνια δεν χάνουν ενέργεια και φτάνουν στην άνοδο έχοντας ενέργεια ίση με $e * kV$, όπου e το φορτίο του ηλεκτρονίου και kV η διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου. Με την άφιξη των ηλεκτρονίων στην άνοδο, αυτά αλληλεπιδρούν με το υλικό της ανόδου και παράγονται οι ακτίνες-Χ. Ένα ποσοστό των ακτίνων-Χ απορροφάται από την ίδια την άνοδο ενώ για τα επίπεδα ονομαστικής τάσης που χρησιμοποιούνται στην διαγνωστική ραδιογραφία, λιγότερο από 1% της ενέργειας των επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων μετατρέπεται τελικά σε ακτινοβολία Χ. Το υπόλοιπο 99% μετατρέπεται σε θερμότητα στην άνοδο της μηχανής, η οποία πρέπει να απομακρυνθεί. Το τμήμα της ανόδου, στο οποίο καταλήγει η εστιασμένη δέσμη των επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων κατασκευάζεται συνήθως από βολφράμιο ή από κράμα ρηνίου βολφραμίου με λόγο 1/9 (90% βολφράμιο, 10% ρήνιο).



Σχήμα 2.12-Τυπική διάταξη μηχανής ακτίνων Χ

Για την κατανόηση της λειτουργίας μίας διάταξης ακτίνων-Χ σε ένα κύκλωμα, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την εξάρτηση του ρεύματος της μηχανής ακτίνων-Χ από την διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου για δεδομένη διέγερση νήματος.

2.6 Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ακτίνων-Χ με την ύλη

Οι φωτονιακές ακτινοβολίες αλληλεπιδρούν με την ύλη μέσα από πολλούς μηχανισμούς. Ο U.FANO [1] ταξινόμησε τα είδη αλληλεπιδράσεως και τα αποτελέσματά τους όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13:

Είδος Αλληλεπιδράσεως	Αποτέλεσμα Αλληλεπιδράσεως
1. Αλληλεπίδραση με τα περιφερειακά ηλεκτρόνια των ατόμων της ύλης 2. Αλληλεπίδραση με τα νουκλεόνια των πυρήνων των ατόμων της ύλης 3. Αλληλεπίδραση με το ηλεκτρικό πεδίο που περιβάλλει τους πυρήνες ή τα ηλεκτρόνια των ατόμων της ύλης. 4. Αλληλεπίδραση με το «μεσονικό» πεδίο των νουκλεονίων των πυρήνων των ατόμων της ύλης	A. Πλήρης Απορρόφηση B. Ελαστική Σκέδαση Γ. Μη Ελαστική Σκέδαση

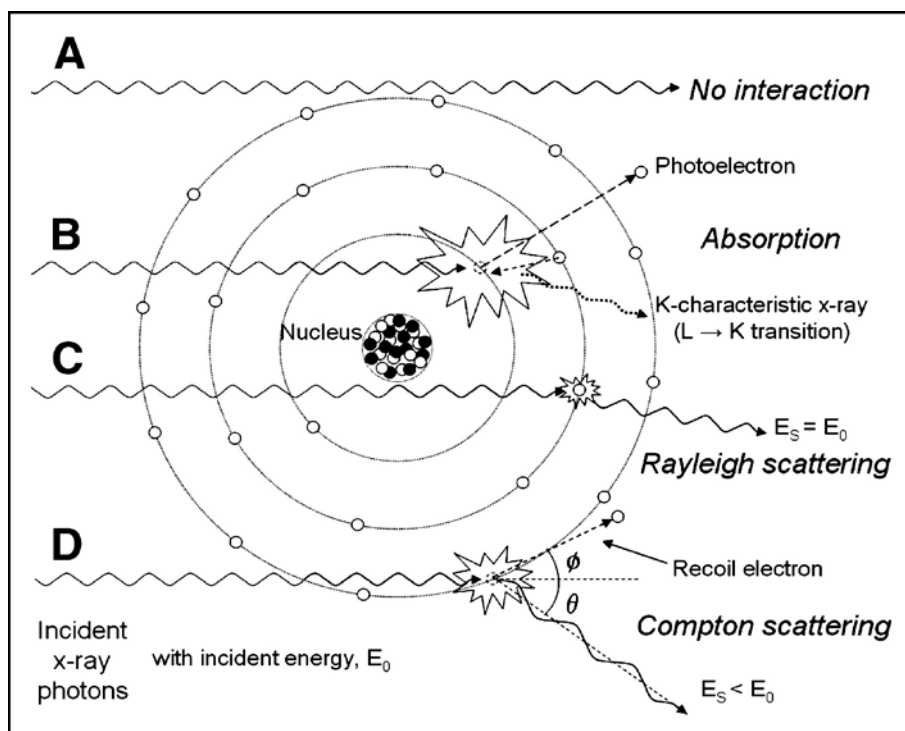
Σχήμα 2.13-Πίνακας με τα είδη αλληλεπιδράσεων φωτονίων με την ύλη κατά U.FANO

Οι δώδεκα δυνατοί συνδυασμοί των δύο στηλών του πίνακα αντιστοιχούν στα δώδεκα δυνατά φαινόμενα που μπορεί να παρατηρηθούν κατά την αλληλεπίδραση των φωτονιακών ακτινοβολιών με την ύλη. Μερικά από τα φαινόμενα αυτά δεν έχουν ακόμα παρατηρηθεί, άλλα γίνονται σπάνια αντιληπτά, και μόνο τρία απ' αυτά παρατηρούνται συχνά στην πράξη για την περιοχή ενέργειας των φωτονίων από 0,01 έως 10 MeV.

Η φύση των ακτίνων-Χ είναι ίδια με αυτή των ακτίνων-γ, συνεπώς αλληλεπιδρούν με την ύλη ακριβώς με τον ίδιο τρόπο. Οι σημαντικότερες αλληλεπιδράσεις ακτίνων-γ και ακτίνων-Χ με την ύλη είναι : [1]

- i. Ελαστική Σκέδαση
- ii. Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο
- iii. Σκέδαση Compton
- iv. Δίδυμη Γένεση

Στο ακόλουθο σχήμα 2.14 απεικονίζονται τα είδη των αλληλεπιδράσεων που πρόκειται να αποτελέσουν αντικείμενο έρευνας στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε.



Σχήμα 2.14-Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ακτίνων-X με την ύλη

Όπως παρατηρούμε το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης δεν αναφέρεται στο σχήμα 2.14. Παρ' όλο που είναι ένα πολύ ενδιαφέρον φαινόμενο και ιδιαίτερα σημαντικό για υψηλές ενέργειες, η δίδυμη γένεση παρουσιάζει κατώφλι ενέργειας, το οποίο μάλιστα είναι υψηλό (1022 keV), γεγονός που καθιστά αδύνατη την εμφάνισή της στη διαγνωστική ραδιογραφία.

Συνεπώς η αναφορά στο εν λόγω φαινόμενο θα γίνει μόνο για λόγους πληρότητας, καθώς το σύνολο των προσομοιώσεων που θα πραγματοποιηθούν στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας γίνονται σε χαμηλότερα ενεργειακά επίπεδα.

Οι αλληλεπιδράσεις λοιπόν οι οποίες προσομοιώνονται και έχουν ενδιαφέρον στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας, παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

2.6.1 Ελαστική Σκέδαση

Η ελαστική σκέδαση (σκέδαση Rayleigh) είναι η αλληλεπίδραση του φωτονίου με το άτομο συνολικά. Αυτό συμβαίνει όταν το φωτόνιο δεν έχει επαρκή ενέργεια προκειμένου να ιονίσει μία στιβάδα του ατόμου. Αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης

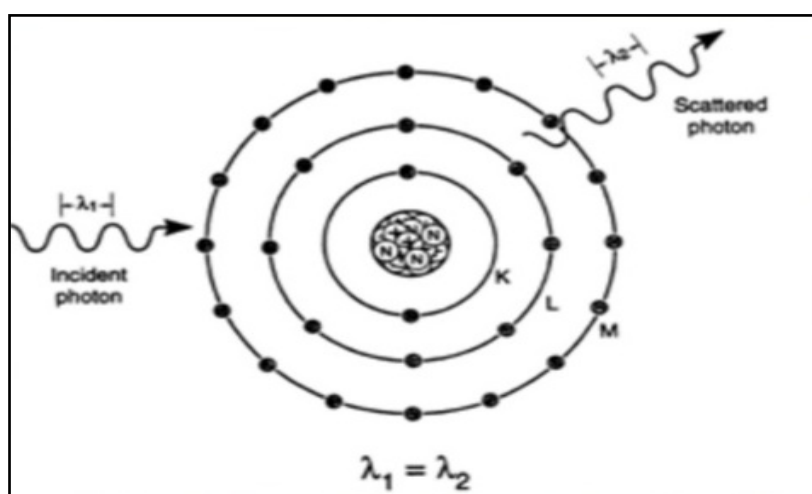
είναι η διέγερση του ατόμου, η οποία ακολουθείται από αποδιέγερση με εκπομπή φωτονίου, το οποίο έχει διεύθυνση συνήθως ίδια ή παραπλήσια με αυτήν του αρχικού φωτονίου και την ίδια ενέργεια.

Συνεπώς, η σχέση που συνδέει τις ενέργειες E_i και E_s του σκεδαζομένου και του προσπίπτοντος φωτονίου είναι:

$$E_s = E_i$$

Η αλληλεπίδραση παρουσιάζεται κυρίως για χαμηλής ενέργειας φωτόνια (κάτω από 10 keV), καθώς για υψηλότερες ενέργειες υπάρχει δυνατότητα ιονισμού του ατόμου. Το φαινόμενο αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία κατά τη μελέτη της αλληλεπίδρασης των ακτίνων-Χ με την ύλη.

Στη διαγνωστική ραδιολογία χρησιμοποιούνται φίλτρα προκειμένου να απομακρυνθούν τα φωτόνια κάτω των 10 keV, καθώς δεν προσφέρουν στη δημιουργία ραδιογραφικής εικόνας, ενώ αντίθετα συνεισφέρουν σε αύξηση της δόσης.



Σχήμα 2.15-Μηχανισμός της ελαστικής σκέδασης

2.6.2 Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Πρόκειται για το μηχανισμό αλληλεπιδράσεως φωτονίων ενέργειας E_γ (συνήθως κάτω του 0.1 MeV), με ένα από τα ισχυρώς συνδεδεμένα ηλεκτρόνια του ατόμου, μέσου ή μεγάλου ατομικού αριθμού Z . Κατά το φαινόμενο αυτό απορροφάται ολόκληρη η ενέργεια E_γ του φωτονίου από το ηλεκτρόνιο, οπότε τούτο αποσπάται από το άτομο με κινητική ενέργεια:

$$T = E_{\gamma} - E_{\sigma}$$

όπου E_{σ} είναι η ενέργεια συνδέσεως του εκλυόμενου ηλεκτρονίου στο άτομο.

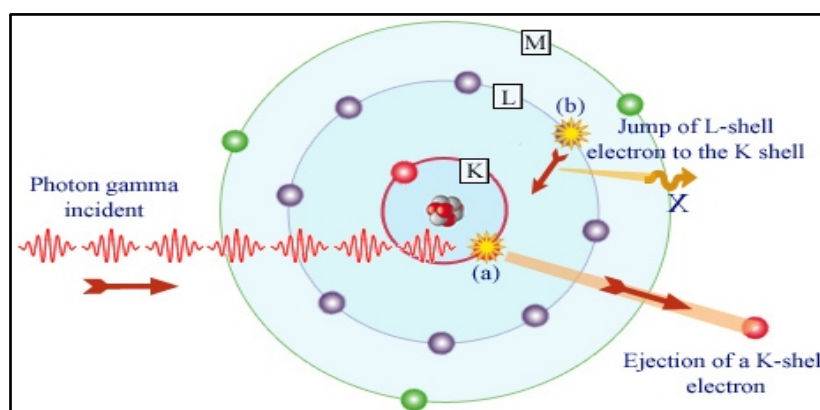
Για να συμβεί αυτού του είδους η αλληλεπίδραση, δηλαδή η απόσπαση του ηλεκτρονίου, θα πρέπει:

$$E_{\gamma} \geq E_{\sigma}$$

Αν η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια συνδέσεως ηλεκτρονίου του φλοιού K σε ένα άτομο, τότε για το άτομο αυτό είναι δυνατή η απόσπαση ηλεκτρονίου από οποιαδήποτε στιβάδα. Για φωτόνια όμως τέτοιας ενέργειας, το εκλυόμενο ηλεκτρόνιο προέρχεται συνήθως από το φλοιό K και σπανιότερα από το φλοιό L. Για ενέργεια φωτονίου μικρότερη από την ενέργεια συνδέσεως των ηλεκτρονίων του φλοιού K και μεγαλύτερη από την ενέργεια συνδέσεως των ηλεκτρονίων του φλοιού του ατόμου είναι δυνατή η απόσπαση ηλεκτρονίου μόνο από το φλοιό L ή από τους φλοιούς ανώτερης τάξεως (M,N, κ.τ.λ.)

Γενικά, όταν η ενέργεια του φωτονίου έχει τιμή παραπλήσια αλλά πάντως μεγαλύτερη ή ίση προς την ενέργεια συνδέσεως των ηλεκτρονίων μίας στιβάδας, τότε ευνοείται ιδιαίτερα η απόσπαση ηλεκτρονίων από τη στιβάδα αυτή.

Παράλληλα, όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια ενός φωτονίου από την ενέργεια συνδέσεως των ηλεκτρονίων του φλοιού K ενός ατόμου, τόσο ασθενέστερη είναι η πραγματοποίηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, έτσι ώστε, για ορισμένο άτομο, από μία τιμή της ενέργειας E_{γ} του φωτονίου και άνω, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο να έχει αμελητέα συμβολή στην εξασθένηση της ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.16-Μηχανισμός φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, για ορισμένη ενέργεια του φωτονίου, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο πραγματοποιείται κατά προτίμηση με εκείνα τα ηλεκτρόνια του ατόμου, τα οποία είναι ισχυρότερα συνδεδεμένα με τον πυρήνα του

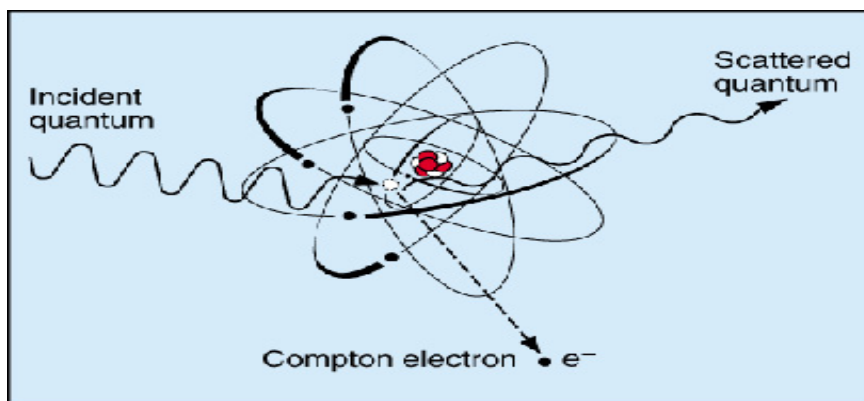
ατόμου. Ένα ηλεκτρόνιο, το οποίο είναι χαλαρά συνδεδεμένο στο άτομο και επομένως η ενέργεια συνδέσεώς του είναι πολύ μικρότερη από του φωτονίου, εμφανίζεται για το φωτόνιο ως ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Η πραγματοποίηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου με ένα τέτοιο ηλεκτρόνιο έχει μικρή πιθανότητα. Για το λόγο αυτό, επειδή σε άτομα μικρού ατομικού αριθμού ακόμα και τα ηλεκτρόνια της στιβάδας K έχουν μικρή ενέργεια συνδέσεως, η συχνότητα πραγματοποίησεως φωτοηλεκτρικού φαινομένου με αυτά είναι μικρότερη, συγκρινόμενη με αυτά των ατόμων μεγάλου ατομικού αριθμού.

Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί, ότι το κενό που δημιουργείται σε μία στιβάδα του ατόμου κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συμπληρώνεται κατά την ανακατάταξη των περιφερειακών ηλεκτρονίων, η οποία ακολουθείται από εκπομπή ενός ή περισσότερων φωτονίων (ακτίνες-X) ή ηλεκτρονίων Auger ή με συνδυασμό των δύο αυτών μηχανισμών.

2.6.3 Σκέδαση Compton

Πρόκειται για το μηχανισμό αλληλεπίδρασης φωτονίου με ένα περιφερειακό ηλεκτρόνιο του ατόμου – συνήθως ένα από τα ασθενέστερα συνδεδεμένα στο άτομο – κατά τον οποίο το αρχικό φωτόνιο ενέργειας E_γ σκεδάζεται μη ελαστικά πάνω στο «ελεύθερο ηλεκτρόνιο» με μείωση της ενέργειας του, ενώ συγχρόνως απελευθερώνεται το ηλεκτρόνιο με κινητική ενέργεια ίση με την ενέργεια που έχει χάσει το φωτόνιο. Ο μηχανισμός αυτός αλληλεπίδρασης αρχίζει να γίνεται ο κυρίαρχος μηχανισμός αλληλεπίδρασης όταν η ενέργεια του φωτονίου πλησιάζει την τιμή: 0.51 MeV.

Στο σχήμα 2.17 που ακολουθεί περιγράφεται η σκέδαση Compton. Το φωτόνιο ενέργειας E_γ και ορμής p σκεδάζεται επί του «ελευθέρου ηλεκτρονίου», το οποίο θεωρείται ότι βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας πριν από την αλληλεπίδραση.



Σχήμα 2.17-Μηχανισμός σκέδασης Compton

Το σκεδαζόμενο φωτόνιο έχει ενέργεια :

$$E_{\gamma}' = h * v' < h * v$$

και ορμή μέτρου :

$$P = \frac{h * v'}{c_0}$$

ενώ κινείται πάνω σε τροχιά, η οποία σχηματίζει γωνία θ με την τροχιά του αρχικού φωτονίου. Το ηλεκτρόνιο μετά τη σκέδαση κινείται πάνω σε τροχιά, η οποία σχηματίζει γωνία ϕ με την τροχιά του αρχικού φωτονίου, το οποίο έχει ορμή ίση με:

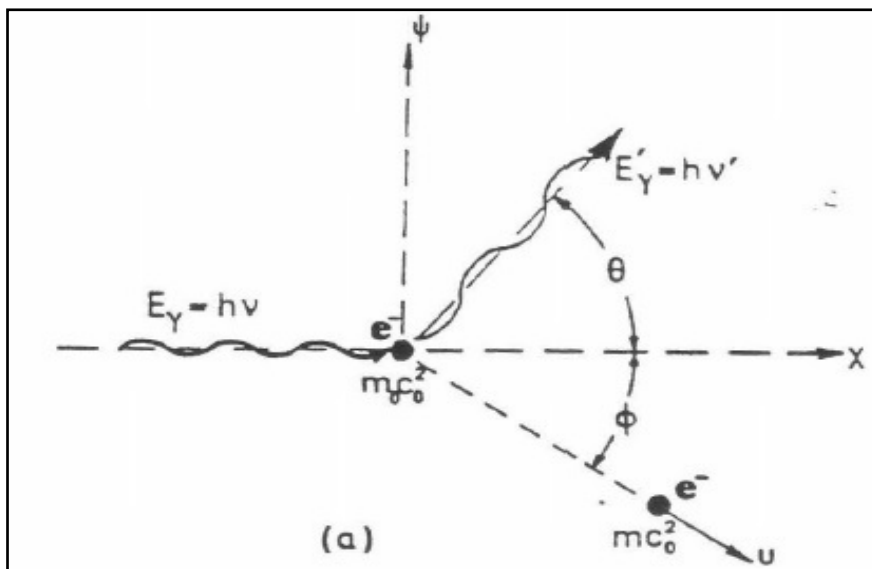
$$P = m * u$$

όπου

$$m = m_0 * \left(1 - \frac{u^2}{c_0^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

η μάζα του, όταν κινείται με ταχύτητα u (m_0 είναι η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου), ενώ η κινητική ενέργεια του είναι:

$$T = h * v - h * v'$$



Σχήμα 2.18-Εφαρμογή της Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας και Ορμής κατά τους άξονες x και y

Το φαινόμενο Compton μπορεί να μελετηθεί με τη βοήθεια των αρχών διατήρησης ενέργειας και ορμής του συστήματος ηλεκτρονίου και φωτονίου (σχήμα 2.18):

i. Αρχή Διατήρησης της Ορμής κατά τον άξονα x:

$$\frac{h * v}{c_0} = \frac{h * v'}{c_0} * \cos(\theta) + P * \cos(\varphi)$$

ii. Αρχή Διατήρησης της Ορμής κατά τον άξονα y:

$$0 = \frac{h * v'}{c_0} * \sin(\theta) - P * \sin(\varphi)$$

iii. Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας:

$$h * v + m_0 * c_0^2 = h * v' + m * c_0^2$$

Από τις παραπάνω σχέσεις με απλές αλγεβρικές πράξεις προκύπτουν τα ακόλουθα ενδιαφέροντα συμπεράσματα:

i. Μετατόπιση του μήκους κύματος:

$$\Delta\lambda - \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 * c_0} * (1 - \cos(\theta))$$

Με βάση την παραπάνω σχέση, η διαφορά μηκών κύματος $\Delta\lambda$ μεταξύ σκεδαζόμενου (λ') και προσπίπτοντος (λ) φωτονίου είναι αύξουσα συνάρτηση της γωνίας σκεδάσεως θ .

Η σταθερή ποσότητα:

$$\frac{h}{m_0 * c_0}$$

είναι γνωστή ως μήκος κύματος Compton Λ_c , έχει αριθμητική τιμή:

$$\Lambda_c = 0,02426 \text{ \AA}$$

και παριστάνει τη μετατόπιση $\Delta\lambda$ του μήκους κύματος για σκέδαση του φωτονίου υπό γωνία $\theta = 90^\circ$. Όπως παρατηρείται, η μέγιστη μετατόπιση του μήκους κύματος πραγματοποιείται για γωνία σκεδάσεως $\theta=180^\circ$, δηλαδή για οπισθοσκέδαση, οπότε $\Delta\lambda=2 \cdot \Lambda_c$.

ii. Ενέργεια σκεδαζόμενου φωτονίου

$$E'_\gamma = h * \nu' = \frac{E_\gamma}{1 + \alpha * (1 - \cos(\theta))}$$

όπου:

$$\alpha = \frac{h * \nu}{m_0 * c_0^2}$$

iii. Κινητική ενέργεια ηλεκτρονίου

$$T = E_\gamma * \frac{\alpha * (1 - \cos(\theta))}{1 + \alpha * (1 - \cos(\theta))}$$

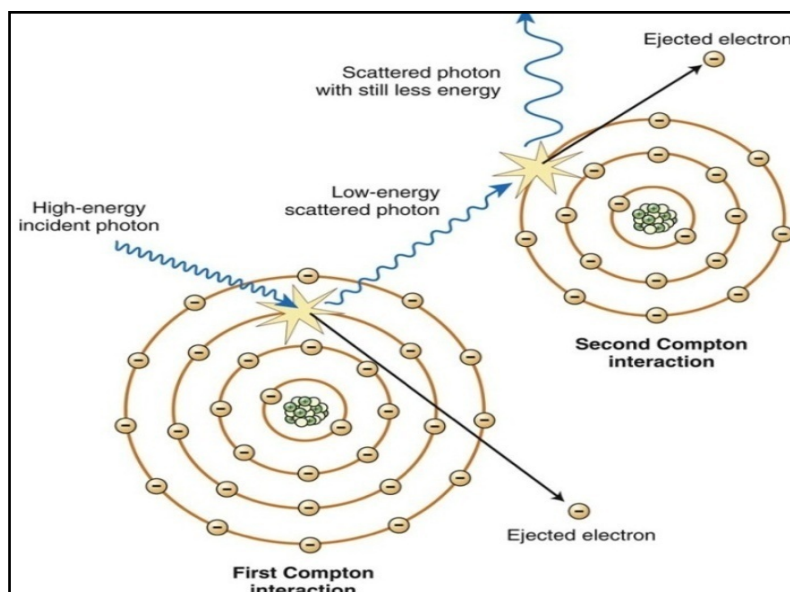
iv. Σχέση μεταξύ γωνιών θ και φ :

$$\cot(\varphi) = \frac{(1 - \cos\theta) * (1 + \alpha)}{\sin(\theta)}$$

και

$$\cot(\varphi) = (1 + \alpha) * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Τέλος είναι αρκετά σύνηθες το φαινόμενο της δημιουργίας διαδοχικών σκεδάσεων, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 2.19:



Σχήμα 2.19-Μηχανισμός δημιουργίας διαδοχικών φαινομένων Compton

2.6.4 Η δίδυμη γένεση ή υλοποίηση της ακτινοβολίας γ

Πρόκειται για το μηχανισμό αλληλεπιδράσεως φωτονίου ενέργειας E_γ μεγαλύτερης ή ίσης προς $2 \cdot m_0 \cdot c^2$ (περίπου ίσης με 1.02 MeV) με το ηλεκτρικό πεδίο πυρήνα, κατά τον οποίο εξαφανίζεται το φωτόνιο και στη θέση του εμφανίζονται δύο υλικά σωματίδια, ένα ηλεκτρόνιο ${}_{-1}^0e$ και ένα ποζιτρόνιο ${}_{+1}^0e$. Η ολική ενέργεια του ζεύγους είναι ίση προς την ενέργεια του υλοποιούμενου φωτονίου:

$$E_\gamma = h \cdot \nu = (m_0 \cdot c_0^2 + T_+) + (m_0^2 \cdot c_0^2 + T_-) \rightarrow$$
$$E_\gamma = 2 \cdot m_0 \cdot c_0^2 + 2 \cdot T_+ + T_-$$

όπου:

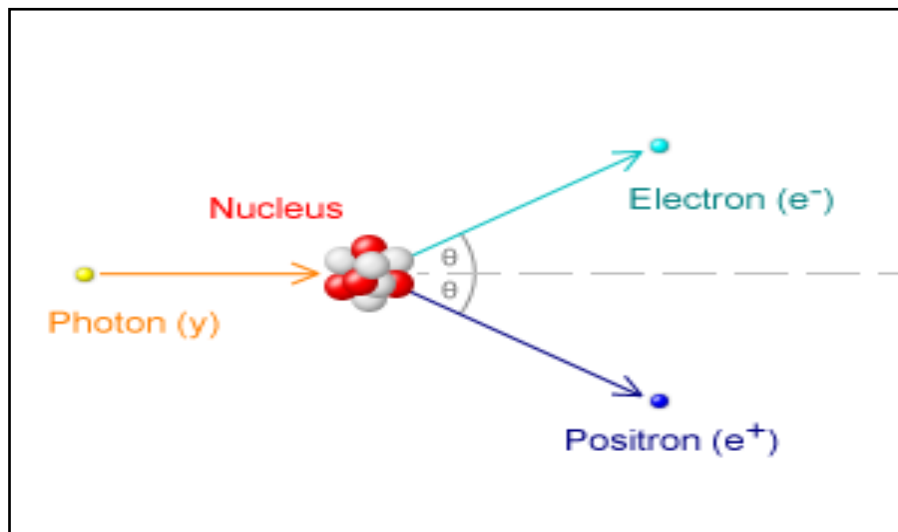
$$2 \cdot m_0 \cdot c_0^2$$

είναι η ενέργεια που αντιστοιχεί στις μάζες ηρεμίας των δύο σωματιδίων και

$$T_+, T_-$$

είναι αντιστοίχως οι κινητικές ενέργειες του ποζιτρονίου και του ηλεκτρονίου αμέσως μετά τη γένεση.

Στην παραπάνω εξίσωση δεν λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας μεταβιβάζεται στον πυρήνα, στην περιοχή του οποίου πραγματοποιείται το φαινόμενο της δίδυμης γενέσεως (η παρουσία του πυρήνα είναι αναγκαία για τη διατήρηση της ορμής του συστήματος). Το ποσοστό αυτό της ενέργειας είναι αμελητέο και γι' αυτό παραλείπεται στην πράξη.



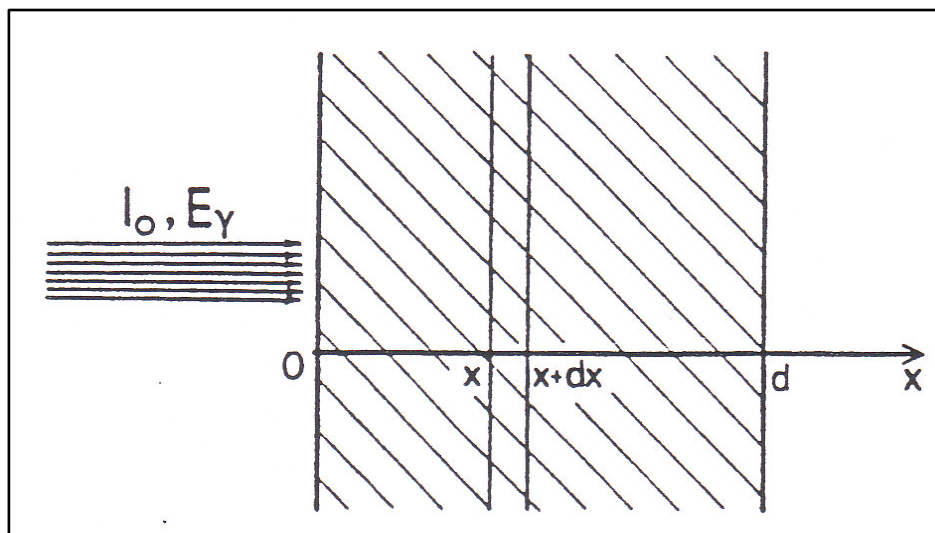
Σχήμα 2.20-Μηχανισμός δίδυμης γένεσης

Τα προϊόντα της διδυμής γενέσεως μετά την εμφάνισή τους περιπλανώνται μέσα στην ύλη, αλληλεπιδρώντας με αυτή και χάνοντας κινητική ενέργεια. Το ηλεκτρόνιο καταλήγει να γίνει μέρος του ηλεκτρονικού πληθυσμού του υλικού μέσου. Το ποζιτρόνιο, όταν αποδώσει την ενέργειά του στο μέσο, ενώνεται με ένα ηλεκτρόνιο και το υλικό σύστημα των δύο αυτών σωματιδίων εξαφανίζεται (φαινόμενο εξαύλωσης), ενώ στη θέση του εμφανίζεται συνήθως ένα ζεύγος φωτονίων που το καθένα έχει ενέργεια:

$$E_{\gamma} = m_0 * c_0^2 = 0.51 \text{ MeV}$$

2.7 Εξασθένηση ακτινοβολίας μέσα στην ύλη

Κατά την διέλευση της ακτινοβολίας μέσα από την ύλη παρατηρείται εξασθένηση της ροής της ακτινοβολίας (φωτόνια/cm²*s), με αποτέλεσμα την αρχικά τη μείωση της δυνατότητάς της να προκαλέσει κάποιον από τους μηχανισμούς αλληλεπιδράσεων και εντέλει την εξαφάνιση του αρχικού φωτονίου. Η εξασθένηση των φωτονίων μέσα από την ύλη μπορεί να περιγραφεί θεωρώντας το απλό παράδειγμα διέλευσης μονοενεργειακής φωτονιακής ακτινοβολίας από επίπεδο απορροφητή σε σχήμα πλάκας [1], όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 2.21:



Σχήμα 2.21-Διέλευση μονοενεργειακής ακτινοβολίας από επίπεδο απορροφητή

Με βάση το παραπάνω σχήμα αν $I(x)$ είναι η ένταση της δέσμης σε βάθος x , τότε η μεταβολή της εντάσεως για επιπλέον μήκος $x+dx$ θα είναι:

$$-dI(x) = \mu * I(x) * d(x)$$

όπου:

- I_0 η αρχική ένταση της μονοενεργειακής δέσμης ηλεκτρονίων ($\frac{\text{φωτ όνια}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}$)
- x το εξεταζόμενο βάθος μέσα στον απορροφητή (cm)
- $I(x)$ η ένταση της φωτονιακής δέσμης των φωτονίων που φτάνουν σε βάθος x του απορροφητή χωρίς να μεταβάλλεται η ενεργειακή κατάστασή τους ($\frac{\text{φωτ όνια}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}$)
- μ ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης που εξαρτάται από το υλικό του απορροφητή και από την ενέργεια της φωτονιακής δέσμης (cm^{-1})

Η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης με αρχική συνθήκη

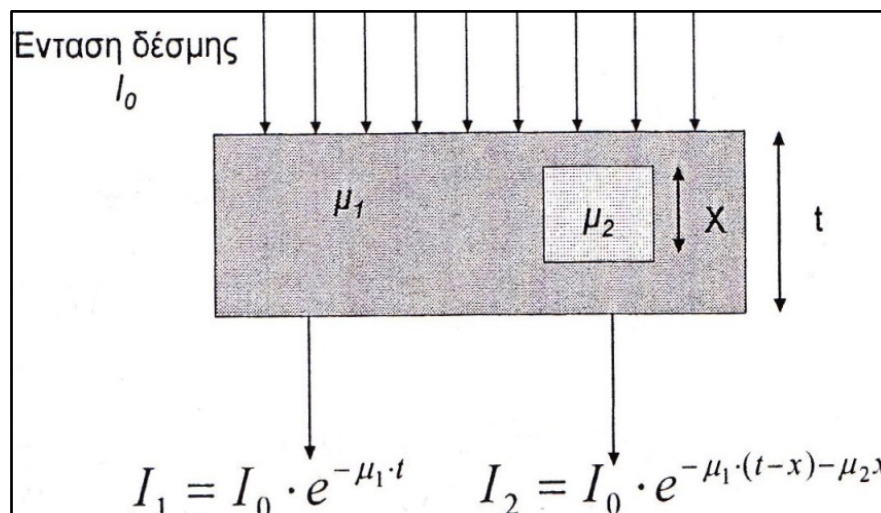
$I(0) = I_0$ για $x = 0$ θα είναι:

$$I(x) = I_0 * e^{-\mu * x}$$

Ταυτόχρονα η φωτονιακή δέσμη κατά την έξοδο της από την πλάκα πάχους d θα έχει ένταση

$$I(d) = I_0 * e^{-\mu * d}$$

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση, όπου μια ακτινοβολία περνά μέσα από διαφορετικά υλικά. Για το σκοπό αυτό θεωρούμε το σχήμα 2.22:



Σχήμα 2.22-Διέλευση μονοενεργειακής ακτινοβολίας με διαφορετικούς απορροφητές [3]

Με εφαρμογή του νόμου της εξασθένησης στις δύο περιπτώσεις υπολογίζουμε την ένταση της ακτινοβολίας στις δύο περιπτώσεις:

i. 1^η περίπτωση

$$I(x) = I_0 * e^{-\mu_1 * t}$$

ii. 2^η περίπτωση

$$I(x) = I_0 * e^{-\mu_1 * (t-x) - \mu_2 * x}$$

δηλαδή

$$I_1 \neq I_2$$

Η συγκεκριμένη διαπίστωση είναι η βάση της διαγνωστικής ραδιογραφίας. Για παράδειγμα η εφαρμογή του νόμου της εξασθένησης σε διαφορετικά υλικά του ανθρώπινου σώματος (οστά, μαλακοί ιστοί) διαμορφώνει διαφορετική αμαύρωση στο φιλμ ραδιογραφίας με αποτέλεσμα τη δημιουργία εικόνας με διαγνωστική αξία.

Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης εξαρτάται από το υλικό του απορροφητή και από την ενέργεια της φωτονιακής δέσμης. Ο εν λόγω συντελεστής ισούται με το άθροισμα των μερικών συντελεστών απορρόφησης που αντιστοιχούν στα 4 είδη πιθανών αλληλεπιδράσεων μιας φωτονιακής ακτινοβολίας με την ύλη, δηλαδή:

$$\mu = \tau + \sigma + \sigma_s + \kappa$$

όπου:

- τ ο μερικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- σ ο μερικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για τη σκέδαση Compton
- σ_s ο μερικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για την ελαστική σκέδαση
- κ ο μερικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για τη δίδυμη γένεση

Οι παραπάνω συντελεστές εκφράζουν την πιθανότητα πραγματοποίησης του αντίστοιχου φαινομένου κατά την αλληλεπίδραση της ύλης με την προσπίπτουσα φωτονιακή ακτινοβολία. Συχνά αντί του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης χρησιμοποιείται ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ_m , ο οποίος συνδέεται με τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης με την ακόλουθη σχέση :

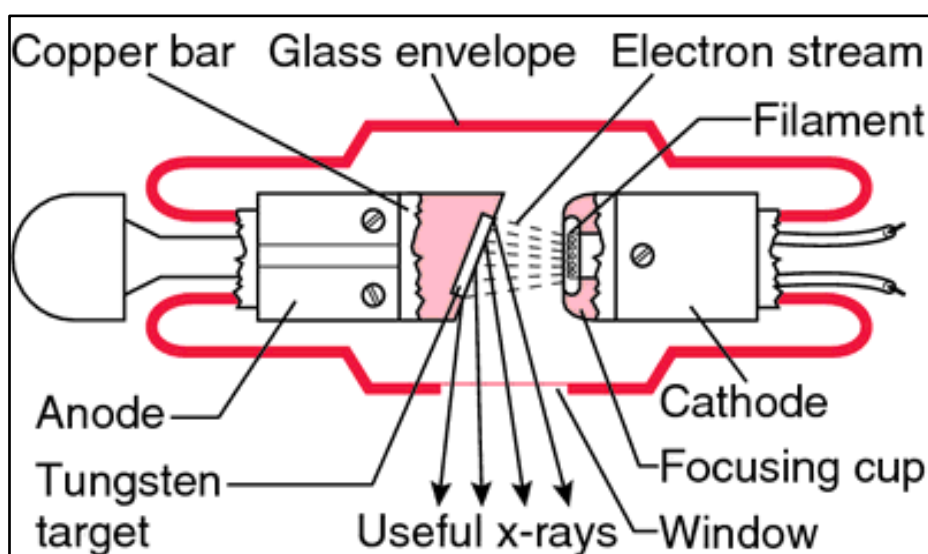
3^ο Κεφάλαιο : Η δημιουργία της ραδιογραφικής εικόνας και ο ποιοτικός έλεγχός της

3.1 Η μηχανή παραγωγής ακτίνων-Χ

Το πεδίο εφαρμογών των ακτίνων-Χ είναι μεγάλο, συνεπώς είναι φυσιολογικό να επιβάλλονται κατά πεδίο διαφορετικοί κανόνες σχεδιασμού και κατά επέκταση να υπάρχουν πολλά είδη μηχανών που μπορούν να παράγουν ακτίνες-Χ. Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας θα γίνει αναφορά στις μηχανές ακτίνων-Χ που βρίσκουν εφαρμογή στη διαγνωστική ραδιογραφία.

3.2 Γενικά χαρακτηριστικά της μηχανής ακτίνων-Χ

Οι σύγχρονες μηχανές ακτίνων-Χ περιέχουν μία κάθοδο και μία άνοδο, οι οποίες είναι τοποθετημένες μέσα σε θάλαμο υψηλού κενού ($<10^{-6}$ Torr). Οι μηχανές είναι σφραγισμένες αεροστεγώς, ενώ σε διαφορετική περίπτωση πραγματοποιείται συνεχής άντληση του αέρα με στόχο τη διατήρηση υψηλού κενού. Η κάθοδος αποτελείται από θερμαινόμενο νήμα, το οποίο είναι κατασκευασμένο συνήθως από βολφράμιο και ελέγχει την εκπομπή των ηλεκτρονίων, ενώ η άνοδος αποτελείται από μέταλλο υψηλού ατομικού αριθμού, όπως μολυβδαίνιο ή βολφράμιο. Μία εικόνα των διατάξεων που συγκροτούν μία μηχανή παραγωγής ακτίνων-Χ απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1-Μηχανή παραγωγής ακτίνων-Χ

Η εκπομπή των ηλεκτρονίων γίνεται από την κάθοδο, όπου είναι τοποθετημένο ένα ηλεκτρόδιο, γνωστό ως ηλεκτρόδιο Wehnelt (λόγω του Γερμανού φυσικού A.Wehnelt, ο οποίος το εισήγαγε το 1908), το οποίο επιτρέπει την εστίαση των ηλεκτρονίων σε ένα σημείο της ανόδου, που καλείται εστιακό σημείο (focal spot). Ο στόχος (άνοδος) είναι ένας λεπτός δίσκος από βολφράμιο ή μία πλάκα από άλλο υλικό υψηλού ατομικού αριθμού, ενσωματωμένος σε χαλκό, ο οποίος έχει πολύ καλή ικανότητα απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας. Τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από ένα ηλεκτροστατικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται μεταξύ ανόδου και καθόδου. Πρακτικά, το πεδίο αυτό συνήθως δημιουργείται, εφαρμόζοντας στην κάθοδο αρνητικό δυναμικό, με την άνοδο να διατηρείται γειωμένη. Το περίβλημα της μηχανής εξυπηρετεί στη διατήρηση του κενού αλλά και στην απομόνωση της υψηλής τάσης. Οι ακτίνες-Χ οι οποίες παράγονται κατά την προσβολή της ανόδου από τη δέσμη των ηλεκτρονίων, εκπέμπονται προς όλες τις κατευθύνσεις, ωστόσο η μηχανή επιτρέπεται την έξοδό τους μόνο δια μέσου μίας ειδικής διαμόρφωσης που καλείται παράθυρο της μηχανής.

Σήμερα οι ακτίνες-Χ παράγονται αποκλειστικά με τη βοήθεια των σωλήνων Coolidge, οι οποίες κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά το 1913 από τον W.D. Coolidge στα εργαστήρια της General Electric [7].

3.3 Κατηγορίες μηχανών παραγωγής ακτίνων-Χ

Με βάση τη θέση του παραθύρου της μπορούμε να θεωρήσουμε τις εξής κατηγορίες μηχανής ακτίνων-Χ [7]:

- Μηχανές ακτίνων-Χ με γεωμετρία πλαϊνού παραθύρου (side window)
- Μηχανές ακτίνων-Χ με γεωμετρία end window

Επιπλέον, με βάση την ύπαρξη ή όχι ρότορα στο τμήμα της ανόδου διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες:

- Μηχανές ακτίνων-Χ με σταθερό τμήμα ανόδου
- Μηχανές ακτίνων-Χ με περιστρεφόμενο τμήμα ανόδου

3.3.1 Μηχανές ακτίνων-Χ με γεωμετρία πλαϊνού παραθύρου

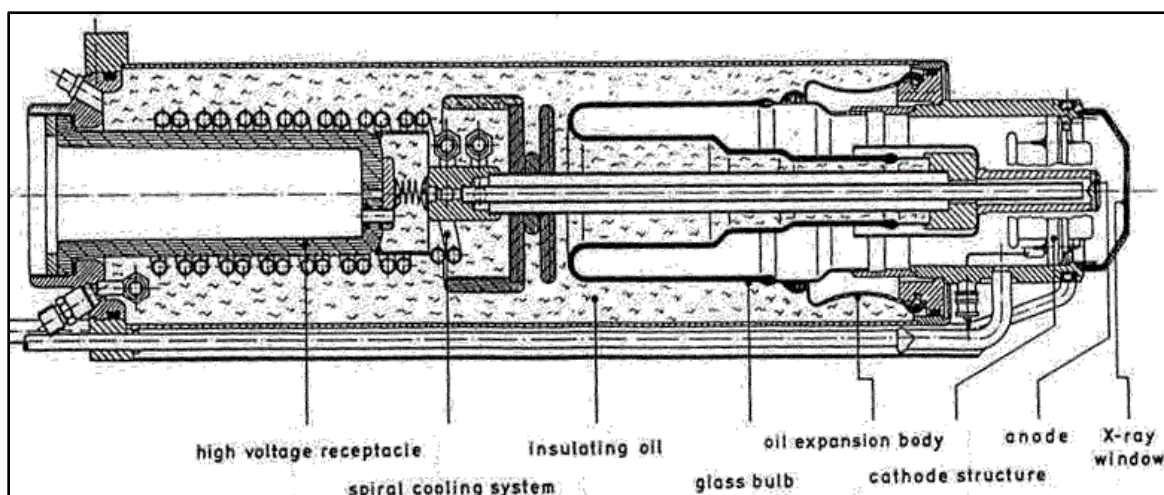
Η θέση του παραθύρου είναι τέτοια ώστε η δέσμη των ακτίνων-Χ να βγαίνει κάθετα προς τον κύριο άξονα της μηχανής (σχήμα 3.1). Ειδικά για τις ιατρικές εφαρμογές το παράθυρο εξόδου είναι μέρος του γυάλινου κελύφους. Η δέσμη των ηλεκτρονίων που προσβάλλει την άνοδο σχηματίζει με την επιφάνεια της ανόδου γωνία που κυμαίνεται από 15 μέχρι 20 μοίρες. Παράλληλα, η γωνία της

εξερχόμενης δέσμης μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 30 και 40 μοιρών.

Στις μηχανές πλαϊνού παραθύρου είναι εφικτή η κατασκευή γεωμετρίας διπλής ανόδου (dual-anode geometry). Για το σκοπό αυτό, ένα λεπτό στρώμα από ένα ελαφρύτερο υλικό, το οποίο καλύπτει το βαρύ υλικό της ανόδου (π.χ. ρήνιο πάνω σε βολφράμιο). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρούνται δύο τύποι φασμάτων. Ο πρώτος τύπος παρατηρείται όταν η τάση λειτουργίας είναι χαμηλή, επομένως τόσο η ενέργεια των ηλεκτρονίων όσο και η διεισδυτικότητά τους είναι χαμηλή. Ο δεύτερος τύπος φάσματος αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες τιμές της τάσης, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να διεισδύουν σε μεγαλύτερο βάθος και αλληλεπιδράσουν κυρίως με το δεύτερο υλικό, το οποίο κυριαρχεί έναντι του ελαφρύτερου.

3.3.2 Μηχανές ακτίνων-Χ με γεωμετρία end window

Η κάθοδος έχει σχήμα δακτυλίου και το παράθυρο εξόδου είναι παράλληλο με τον κύριο άξονα της μηχανής, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.2 Η γωνία εκπομπής των ακτίνων-Χ, ως προς την επιφάνεια της ανόδου είναι περίπου 90° . Γενικά, η συγκεκριμένη γεωμετρία επιτρέπει μικρότερες αποστάσεις μεταξύ ανόδου και παραθύρου και μεταξύ ανόδου και δείγματος.



Σχήμα 3.2-Μηχανή παραγωγής ακτίνων-Χ με γεωμετρία end window

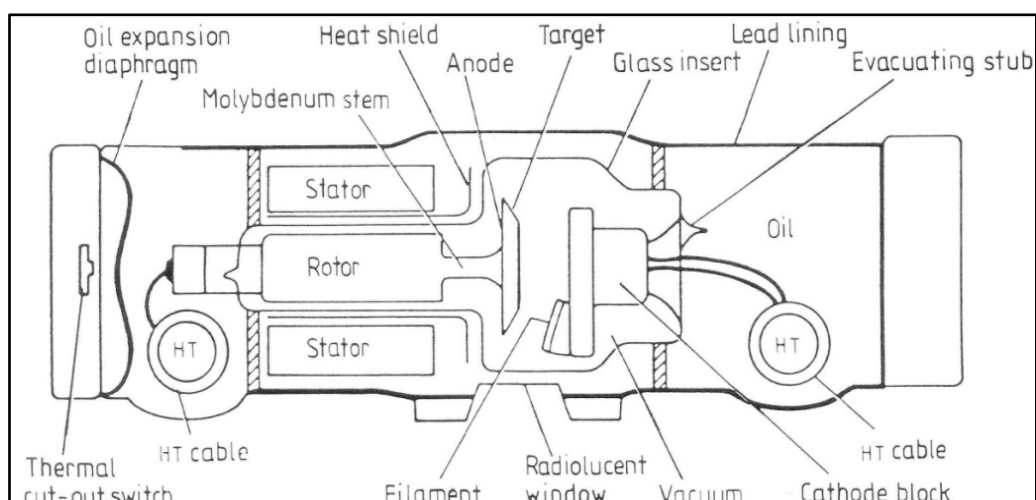
Εκτός αυτού, η κάθοδος και το παράθυρο είναι συνήθως γειωμένα, ενώ στην άνοδο δημιουργείται ένα υψηλό θετικό δυναμικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζεται ο βομβαρδισμός του παραθύρου από σκεδαζόμενα στην άνοδο ηλεκτρόνια. Πλεονέκτημα της γεωμετρίας αυτής είναι ότι η αυτοαπορρόφηση των εκπεμπόμενων ακτίνων-Χ μειώνεται λόγω της μεγάλης γωνίας εκπομπής (σχεδόν

κάθετα προς την άνοδο). Αυτός ο παράγοντας καθιστά αυτού του τύπου τις μηχανές εξαιρετικά ελκυστικές για εφαρμογές χαμηλών ενεργειών. Επιπλέον οι μικρές αποστάσεις μεταξύ ανόδου και καθόδου περιορίζουν τη χρήση τους σε μία οριακή τιμή υψηλής τάσης, που συνήθως δεν ξεπερνάει τα 60kV.

Σε μία παραλλαγή της παραπάνω γεωμετρίας της μηχανής, ο στόχος είναι ένα λεπτό στρώμα υλικού που βρίσκεται επί της εσωτερικής πλευράς του παραθύρου, το οποίο είναι κατασκευασμένο από βηρύλλιο. Η δέσμη ηλεκτρονίων προσβάλλει το στόχο με κατάλληλη γωνία και τα εκπεμπόμενα φωτόνια διαπερνούν το στόχο και το παράθυρο και εξέρχονται από τη μηχανή. Συνήθως, το συνεχές φάσμα από μία τέτοια άνοδο παρουσιάζεται αρκετά φιλτραρισμένο, λόγω της απορρόφησης της ακτινοβολίας πέδησης μέσα στο στόχο. Το συγκεκριμένο φαινόμενο εμφανίζεται ειδικότερα σε χαμηλές ενέργειες, αλλά και πάνω από την αιχμή απορρόφησης. Ως εκ τούτου οι μηχανές αυτού του τύπου θεωρείται πως έχουν φυσικό φιλτράρισμα. Τέτοιες μηχανές ανήκουν στην κατηγορία μηχανών χαμηλής ισχύος, καθώς η πολύ λεπτή άνοδος δεν αντέχει σε μεγάλα θερμικά φορτία.

3.3.3 Μηχανές ακτίνων Χ με περιστρεφόμενο τμήμα ανόδου

Για να επιτευχθεί καλύτερη διάχυση της θερμότητας μέσα στη μηχανή, κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιούνται μηχανές περιστρεφόμενης ανόδου (rotate anode). Ένα τέτοιο είδος μηχανής απεικονίζεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3-Μηχανή παραγωγής ακτίνων Χ με περιστρεφόμενη άνοδο

Σε αυτή την περίπτωση, η άνοδος είναι ένας δίσκος, ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω σε ένα ρότορα με ένα σύστημα εδράνων, ώστε να καθίσταται δυνατή η περιστροφή του. Ο στάτορας βρίσκεται έξω από το κέλυφος της μηχανής και οδηγεί το ρότορα μέσω ενός περιστρεφόμενου πεδίου. Ο στόχος περιστρέφεται και βομβαρδίζεται από τη δέσμη ηλεκτρονίων, ωστόσο λόγω της περιστροφής, κάθε στιγμή τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν σε διαφορετικό σημείο της ανόδου, με αποτέλεσμα τα θερμικά φορτία να διαχέονται σε μεγαλύτερη περιοχή. Μηχανές με περιστρεφόμενη άνοδο και με επιπλέον ψύξη (με λάδι ή νερό) μπορούν να φτάσουν σε υψηλές τιμές ισχύος.

3.3.4 Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της καθόδου

Η εκπομπή των ηλεκτρονίων εξαρτάται από τη θερμοκρασία της καθόδου, η οποία εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που τη διαρρέει. Όπως προαναφέρθηκε, η κάθοδος είναι συνήθως ένα νήμα, για την κατασκευή του οποίου χρησιμοποιείται συνήθως σύρμα ή έλασμα βολφραμίου. Ανάλογα με το επιθυμητό σχήμα του σημείου εστίασης χρησιμοποιούνται σύρματα με διάφορες μορφές όπως σπειροειδή, κυκλικά, ελικοειδή ή απλά ελάσματα.

Η τροφοδοσία του νήματος γίνεται μέσα σε συγκεκριμένα όρια ρεύματος. Για χαμηλές τιμές της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος στο νήμα δεν υπάρχει θερμονική εκπομπή ηλεκτρονίων, ενώ για υψηλές τιμές παρατηρείται κορεσμός. Το σημείο κορεσμού εξαρτάται από την τιμή της τάσης που εφαρμόζεται, καθώς αυτή επιδρά στο φαινόμενο του σχηματισμού φορτίου χώρου γύρω από το νήμα (space charge). Σε ακραία σενάρια φόρτισης, η θερμοκρασία στην κάθοδο μπορεί να φτάσει τους 2500° C. Σε αυτή τη θερμοκρασία ο ωφέλιμος χρόνος λειτουργίας της είναι συνήθως περιορισμένος. Για τον έλεγχο και την εστίαση της δέσμης ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την κάθοδο και για το σχηματισμό του κατάλληλου εστιακού σημείου χρησιμοποιείται το ηλεκτρόδιο Wehnelt.

3.3.5 Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της ανόδου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως μία τυπική άνοδος απαρτίζεται συνήθως από ένα λεπτό στόχο μέσα σε έναν ογκώδη χάλκινο φορέα. Τα πιο συνηθισμένα υλικά του στόχου είναι ο χαλκός, το μολυβδαίνιο και το βολφράμιο. Επίσης χρησιμοποιούνται και υλικά όπως ο σίδηρος, το μαγνήσιο, το αλουμίνιο, το χρώμιο, το νικέλιο, το ρόδιο και ο άργυρος. Η κατασκευή των περιστρεφόμενων ανόδων είναι πιο πολύπλοκη, καθώς κατασκευάζονται με τεχνικές κονιομεταλλουργίας (powder

metallurgy). Ένα πρόβλημα που μπορεί να παρουσιάζεται στην άνοδο είναι η φθορά που παρουσιάζεται στην επιφάνεια του υλικού λόγω υψηλών θερμικών και μηχανικών καταπονήσεων. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του πλήθους των ακτίνων-Χ που εκπέμπονται από τη μηχανή, καθώς και σε μηχανικές παραμορφώσεις, οι οποίες μπορούν να καταστρέψουν την άνοδο. Αυτό συμβαίνει, διότι η θερμοχωρητικότητα των υλικών, από τα οποία κατασκευάζεται η άνοδος, έχει σχετικά μικρή τιμή και αυτό συνεπάγεται υψηλές θερμοκρασίες ακόμα και για σχετικά μικρά θερμικά φορτία.

Μία βελτιωμένη τεχνολογία κατασκευής της ανόδου βασίζεται σε ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από τρία (3) υλικά: Ρήνιο, Βολφράμιο, Μολυβδαίνιο (Rhenium, Tungsten, Molybdenum-RTM). Αυτό βελτιώνει αποτελεσματικά τις ελαστικές ιδιότητες της ανόδου και μειώνει σημαντικά τη φθορά. Επιπλέον, με προσμίξεις μικρού ποσοστού τιτανίου και ζirkονίου μέσα στο σώμα από μολυβδαίνιο ή βολφράμιο, επιτυγχάνεται ο διπλασιασμός της θερμοχωρητικότητας της ανόδου.

Μία σύγχρονη λύση για τον έλεγχο της απαγωγής θερμικής ακτινοβολίας συνιστά η χρήση ανόδου περιβαλλόμενη από σώμα γραφίτη. Με αυτές τις ανόδους (Calorexanodes), παράγονται μηχανές, οι οποίες λειτουργούν σε μία μέση θερμική ισχύ των 4kW.

3.3.6 Το κέλυφος της μηχανής παραγωγής ακτίνων-Χ

Οι επιμέρους συνιστώσες της μηχανής ακτίνων-Χ τοποθετούνται μέσα σε ένα κέλυφος, το οποίο εξυπηρετεί δύο σκοπούς, αφενός μεν τη διατήρηση του κενού, αφετέρου δε την ηλεκτρική μόνωση. Τα συνηθέστερα υλικά για την κατασκευή του κελύφους είναι το γυαλί, τα μέταλλα και τα κεραμικά. Εξωτερικά του κελύφους υπάρχει προστατευτικό περίβλημα, ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία της συνολικής διάταξης. Το εξωτερικό περίβλημα αποτελεί προστασία από την υψηλή τάση που εφαρμόζεται στη μηχανή και από την παραγόμενη ακτινοβολία.

3.3.6.1 Μηχανή με γυάλινο κέλυφος

Το πιο διαδεδομένο από τα παραπάνω υλικά είναι το γυαλί. Οι κύριες απαιτήσεις για τον τύπο γυαλιού είναι η υψηλή αντίσταση, η καλή διηλεκτρική αντοχή και η ικανότητα αντοχής σε αλλαγές της θερμοκρασίας. Αυτές οι απαιτήσεις απαντώνται σε γυαλιά από βόριο-πυριτικά άλατα, που επιπλέον επιτρέπουν τη διέλευση των κατάλληλων ηλεκτρικών επαφών. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα αυτού

του τύπου κελύφους είναι ότι είναι λείο και εύκολο να καθαριστεί. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται με ευκολία η μόνωση μεταξύ ανόδου και καθόδου.

3.3.6.2 Μηχανή με μεταλλικό-γυάλινο κέλυφος

Συχνά κατασκευάζονται μηχανές παραγωγής ακτίνων-Χ με πολυστρωματικό κέλυφος. Σε αυτό κάποιες στρώσεις αποτελούνται από γυαλί και κάποιες από μέταλλο. Με αυτό το τρόπο το κέλυφος παρουσιάζει υψηλότερες αντοχές στις θερμικές καταπονήσεις που παρουσιάζονται στην άνοδο και στην κάθοδο της μηχανής. Επίσης, ένα μέρος των δευτερογενών ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την άνοδο μπορεί να απορροφηθεί δια μέσου αυτού του μεταλλικού τμήματος, ώστε να μειώνεται το πλήθος των ηλεκτρονίων τα οποία προσβάλλουν την άνοδο σε σημεία εκτός σημείου εστίασης.

3.3.6.3 Μηχανή με μεταλλικό-κεραμικό κέλυφος

Οι μεταλλικές-κεραμικές μηχανές χρησιμοποιούνται από τη δεκαετία του 1960. Το χαρακτηριστικό τους έγκειται στη χρησιμοποίηση κεραμικού υλικού έναντι του γυαλιού, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη ηλεκτρική μόνωση της μηχανής. Αυτές οι μηχανές έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των τυπικών μηχανών με κάλυμμα από γυαλί. Καταρχάς η επεξεργασία των κεραμικών είναι ευκολότερη, ενώ μπορούν να κατασκευασθούν με μεγάλη ακρίβεια γεγονός που επιτρέπει μεγαλύτερη ελευθερία στο σχεδιασμό του θαλάμου κενού. Επιπλέον τα μεταλλικά μέρη μπορούν να συνδεθούν εύκολα με τον κεραμικό μονωτή ενώ η επιφανειακή αγωγιμότητα των κεραμικών είναι μικρή. Τέλος η σχετικά μικρή μάζα και η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής αποτελούν επιπλέον πλεονεκτήματα αυτού του τύπου μηχανών.

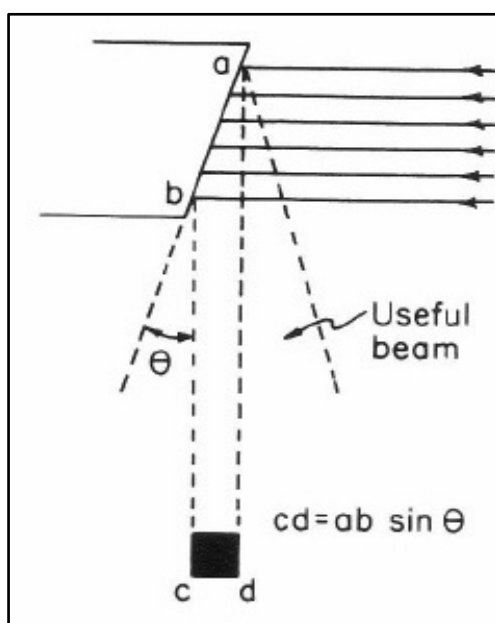
3.4 Η μηχανή ακτίνων-Χ στη διαγνωστική ραδιογραφία

Οι μηχανές ακτίνων-Χ που βρίσκουν εφαρμογή στη διαγνωστική ραδιογραφία σχεδιάζονται με στόχο να παράγουν μία ευκρινή εικόνα ενός τμήματος ενός ασθενούς. Ακόμα και εάν ο ασθενής είναι πλήρως ακινητοποιημένος, πάντα υπάρχουν κινήσεις στο σώμα ενός ασθενούς (π.χ. αναπνοή, καρδιακή λειτουργία) που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά το αποτέλεσμα. Με στόχο λοιπόν να μην χαθούν πληροφορίες από τη διαγνωστική απεικόνιση, οι ακτίνες-Χ πρέπει να εκπέμπονται από μία σημειακή πηγή και η διάρκεια έκθεσης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή. Ωστόσο, τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι μη συμβατά

μεταξύ τους δεδομένου ότι ισοδυναμεί σε μία πολύ μεγάλη ροή ηλεκτρονίων που εστιάζει σε έναν πολύ μικρό στόχο. Εν τούτοις η βελτιστοποίηση σχεδιασμού των μηχανών-Χ έχει άρει τέτοιου είδους δυσκολίες.

Στη διαγνωστική ραδιογραφία συναντάμε τόσο μηχανές σταθερής ανόδου όσο και – συνηθέστερα – μηχανές περιστρεφόμενης ανόδου. Σε μία μηχανή ακτίνων-Χ γραμμικής εστίασης με σταθερή άνοδο, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.1, τα ηλεκτρόνια χτυπούν μια συγκεκριμένη επιφάνεια του κεκλιμένου στόχου.

Στις μηχανές περιστρεφόμενης ανόδου επιτυγχάνεται η αύξηση του φορτίου εφόσον τα ηλεκτρόνια βομβαρδίζουν διαφορετικό τμήμα του κυκλικού δίσκου. Χαρακτηριστικό είναι το σχήμα 3.4. Η περιστροφή πραγματοποιείται σε συνθήκες κενού στηριζόμενη σε τριβείς ολίσθησης χωρίς λίπανση [5].

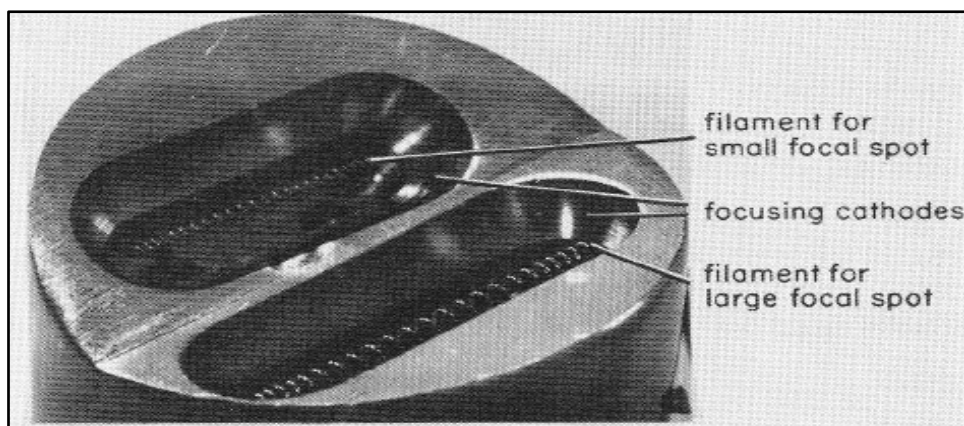


Σχήμα 3.4-Περιστρεφόμενη άνοδος μηχανής ακτίνων-Χ

Η άνοδος συνδέεται με έναν επαγωγικό κινητήρα, οποίος ελέγχεται από πηνία που έχουν τοποθετηθεί εξωτερικά του γυάλινου περιβλήματος της μηχανής. Όταν μια μονάδα ακτίνων-Χ με περιστρεφόμενη άνοδο εκκινεί, ο κινητήρας αρχίζει να λειτουργεί για λίγα δευτερόλεπτα μέχρι ο ρότορας να φτάσει τις ονομαστικές στροφές λειτουργίας του και να εφαρμοστεί στη μηχανή η κατάλληλη τάση για την απαιτούμενη έκθεση. Κατόπιν ο ρότορας επιβραδύνεται γρήγορα με δυναμική πέδηση για αποφευχθεί φθορά στους τριβείς ολίσθησης.

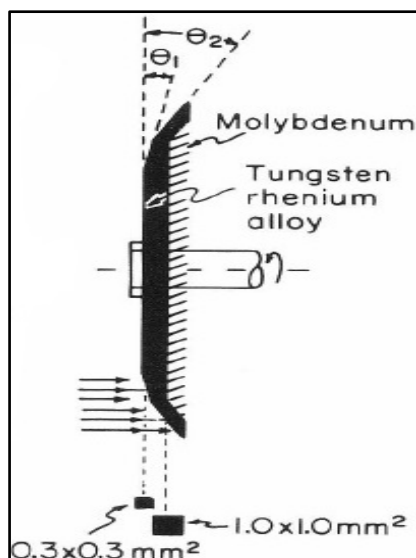
Με στόχο την ευελιξία της μηχανής, συχνά προσαρμόζονται δύο νήματα στην κάθοδο της μηχανής όπως φαίνονται στο σχήμα 3.5 [5]. Το πρώτο νήμα έχει

σχεδιαστεί, ώστε να εστιάζει τα ηλεκτρόνια σε μια μεγάλη επιφάνεια της ανόδου και χρησιμοποιείται όταν χρειάζεται μεγάλη ισχύς. Παράλληλα, όταν υπάρχει ανάγκη για μεγάλη ανάλυση, τότε χρησιμοποιείται το δεύτερο νήμα που μπορεί να εστιάσει ηλεκτρόνια σε ένα πολύ μικρό τμήμα του στόχου.



Σχήμα 3.5- Κάθοδος μηχανής ακτίνων-Χ με δύο νήματα [5]

Με παρόμοιο τρόπο, ορισμένοι κατασκευαστές παράγουν μηχανές ακτίνων-Χ με περιστρεφόμενη άνοδο με δύο γωνίες, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 3.6. Η μικρότερη γωνία θ_1 αντιστοιχεί στο μικρότερο σημείο εστίασης το οποίο έχει διαστάσεις $0.3 \times 0.3 \text{ mm}^2$. Αντίστοιχα η γωνία θ_2 αντιστοιχεί στο σημείο εστίασης $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. Το υλικό που δεσπόζει στην κατασκευή της ανόδου είναι ένα κράμα αποτελούμενο από ρήνιο και βολφράμιο μαζί με μολυβδένιο. Ένα τέτοιο κράμα παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στη ροή των ηλεκτρονίων σε σχέση με το βολφράμιο με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του στόχου.

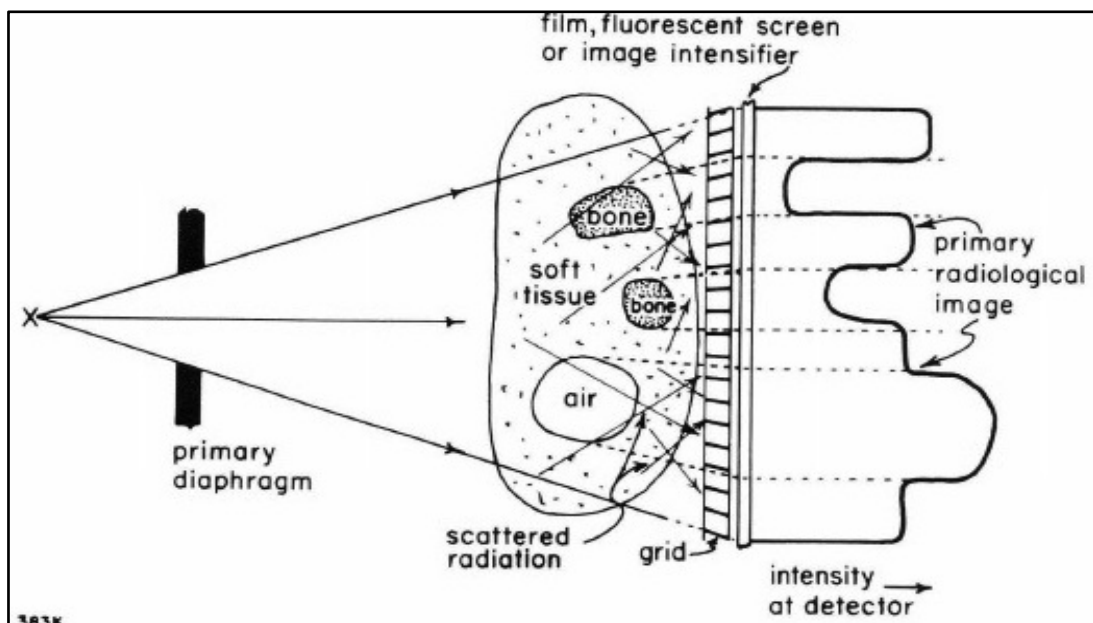


Σχήμα 3.6-Περιστρεφόμενη άνοδος με δύο γωνίες πρόσκρουσης

Μακροχρόνια η απόδοση των μηχανών ακτίνων-Χ επιβαρύνεται καθώς ο βομβαρδισμός των ηλεκτρονίων δημιουργεί φθορές στο νήμα αλλά και στην άνοδο με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται τόσο το εύρος όσο και η μορφή του φάσματος των ακτίνων-Χ. Η ισχύς εξόδου της μηχανής ακτίνων-Χ μπορεί εξαιτίας των διάφορων προβλημάτων, όπως η γήρανση του νήματος και η δημιουργία εσωτερικών σπινθήρων, να μειωθεί κατά 50% της αρχικής τιμής, μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού πεδίου και το μέγεθος του σημείου εστίασης.

3.5 Η δημιουργία εικόνας στη διαγνωστική ραδιογραφία

Το σχήμα 3.7 απεικονίζει την εξασθένηση μιας δέσμης ακτίνων-Χ από έναν ασθενή που αποτελείται από διαφορετικούς ιστούς, με αποτέλεσμα την μεταβολή στην ακτινοβολία που καταγράφεται. Αυτή η μεταβαλλόμενη πληροφορία που καταγράφεται αναφέρεται ως η πρωτογενής ακτινολογική εικόνα. Το μοτίβο της μεταβολής που μεταδίδεται μπορεί να εκφράζεται σε μεταβολή ροής φωτονίων, ενέργειας, ή έκθεσης. Δεδομένου ότι το μάτι δεν είναι ευαίσθητο σε ακτίνες-Χ, η πληροφορία μετατρέπεται σε μια ορατή εικόνα με μια φθορίζουσα οθόνη, σε έναν ενισχυτή ή σε ένα φιλμ. Η δέσμη που καταγράφεται μετά τον ασθενή περιέχει πρωτογενή ακτινοβολία που προέρχεται από την μηχανή των ακτίνων-Χ και δευτερογενή ακτινοβολία, ως αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων της πρωτογενούς ακτινοβολίας με τον εξεταζόμενο.



Σχήμα 3.7-Διαδικασία δημιουργίας ραδιογραφικής εικόνας

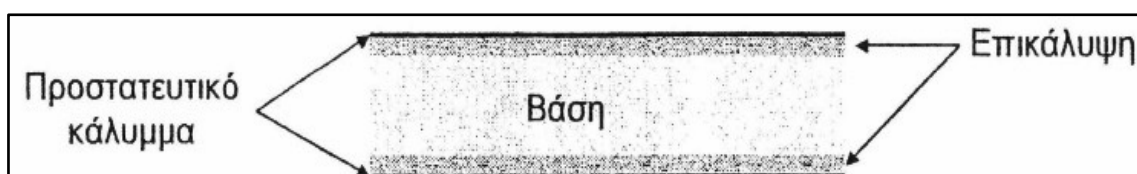
Δεδομένου ότι μόνο η πρωτογενής ακτινοβολία περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με το αντικείμενο που εξετάζεται, είναι επιθυμητό να μειωθεί όσο το δυνατόν η δευτερογενής ακτινοβολία που φθάνει στην οθόνη ή στο φιλμ. Η μείωση υλοποιείται με τη βοήθεια ενός πλέγματος, το οποίο τοποθετείται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Αυτό το πλέγμα επιτρέπει μόνο την ακτινοβολία που προέρχεται απευθείας από την πηγή να φτάσει το σύστημα απεικόνισης. Η δευτερογενής ακτινοβολία μπορεί επίσης να μειωθεί με τον περιορισμό των διαστάσεων της πρωτογενούς δέσμης, όσο αυτό είναι εφικτό.

Στη σύγχρονη διαγνωστική ραδιογραφία χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές για τη δημιουργία της εικόνας, οι οποίες όμως έχουν κοινό χαρακτηριστικό ότι μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων που απορροφάται πάνω σε ορισμένο μέσο σε οπτική πληροφορία. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της εικόνας είναι:

- Απευθείας έκθεση φιλμ που πραγματοποιείται σε ελάχιστες περιπτώσεις, ένεκα της πολύ χαμηλής απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων
- Συνδυασμός ενισχυτικής οθόνης και φιλμ
- Ενισχυτής εικόνας
- Άλλες τεχνικές (π.χ. ξηροραδιογραφία)

3.5.1. Η χρήση του φιλμ στην εκτέλεση διαγνωστικής ραδιογραφίας

Το φιλμ αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι στην εκτέλεση της ακτινογραφίας. Αποτελείται από την πολυεστερική βάση, πάχους 150-200 μm , την επικάλυψη πάχους 10-20 μm και το προστατευτικό κάλυμμα (Σχήμα 3.8). Η επικάλυψη περιέχει μικροκρυστάλλους από (AgI ή AgBr), όπου τα ιόντα Br αποτελούν το 90-99% των ιόντων. Το μέγεθος των μικροκρυστάλλων είναι μικρότερο του 1 μm [3].



Σχήμα 3.8-Περιγραφή φιλμ ραδιογραφίας

Εξαιτίας ατελειών στο κρυσταλλικό πλέγμα θετικά ιόντα Ag έχουν τη δυνατότητα μετακίνησης μέσα στον κόκκο. Παράλληλα η προσπίπτουσα ακτινοβολία επιδρά με ανιόν Br με αποτέλεσμα την απελευθέρωση ενός

ηλεκτρονίου, το οποίο παγιδεύεται μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα όπου συναντά το κατιόν Ag.

Με αυτό το τρόπο το κατιόν Ag εξουδετερώνεται και παραμένει στη θέση του ενώ ο αντίστοιχος κόκκος έχει ευαισθητοποιηθεί. Με την εμφάνιση του φιλμ οι ευαισθητοποιημένοι κόκκοι μετατρέπονται σε Ag, ενώ οι υπόλοιποι απομακρύνονται με αποτέλεσμα τη χαρακτηριστική αμαύρωση του φιλμ. Λόγω του μικρού πάχους του φιλμ το πλήθος των ακτίνων-Χ που επιδρούν και συνεπώς των κόκκων που ευαισθητοποιούνται, είναι μικρό με συνέπεια μικρή απόδοση ανίχνευσης ακτίνων-Χ.

Συνεπώς χρειάζονται υψηλότερες ροές φωτονίων για δημιουργία της εικόνας. Παρόλα αυτά σε ορισμένες περιπτώσεις εξετάσεων χρησιμοποιείται η τεχνική αυτή, κυρίως διότι επιτυγχάνεται μικρότερη ασάφεια των ορίων των απεικονιζόμενων αντικειμένων και καλύτερη διακριτική ικανότητα.

Η αμαύρωση του φιλμ εκφράζεται συνήθως με το μέγεθος οπτική πυκνότητα (optical density), η οποία δίδεται από τη σχέση:

$$D = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

όπου I_0 και I είναι η ένταση δέσμης φωτός πριν και μετά τη διέλευση από το φιλμ. Αποδεικνύεται επιπλέον ότι η οπτική πυκνότητα D εκτιμάται από την παρακάτω σχέση:

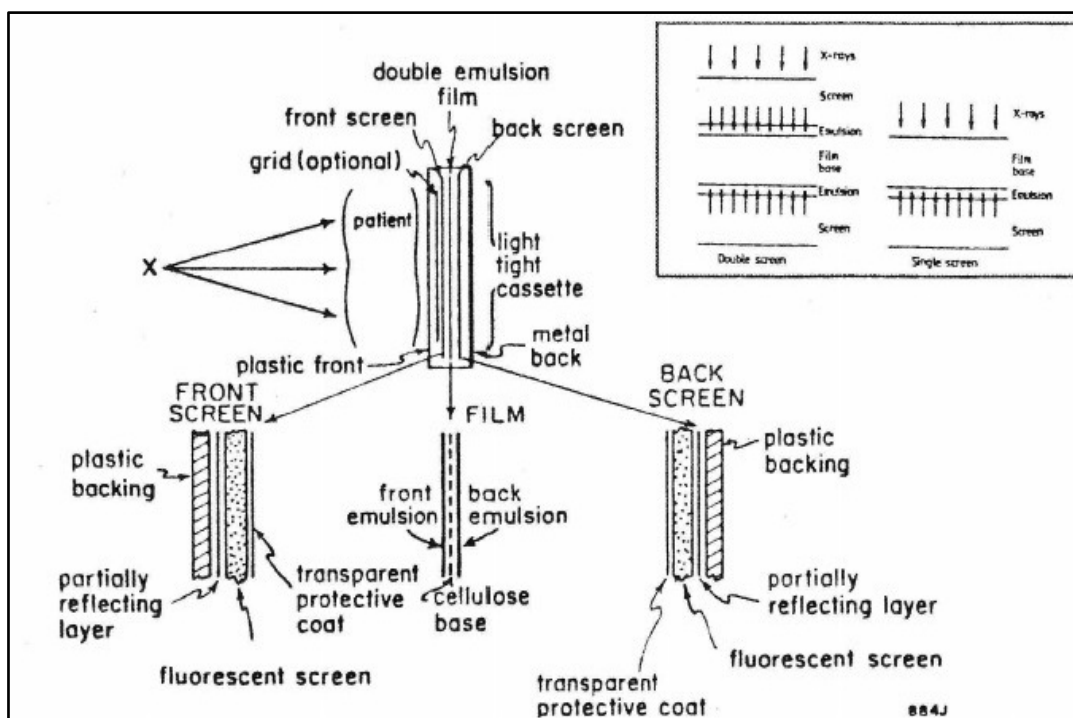
$$D = D_{MAX} * [1 - e^{-kx}]$$

όπου X , η έκθεση του φιλμ, k σταθερά και D_{max} η μέγιστη οπτική πυκνότητα όταν όλοι οι κόκκοι έχουν ενεργοποιηθεί

3.5.2. Η χρήση του ενισχυτικών οθονών στην εκτέλεση διαγνωστικής ραδιογραφίας

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών υπήρξε μεγάλη ανάπτυξη των ενισχυτών εικόνας και των συστημάτων απεικόνισης όπως αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 3.9. Οι ακτίνες-Χ που διέρχονται μέσα από τον ασθενή προσκρούουν σε μια φθορίζουσα οθόνη στο εσωτερικό του ενισχυτή εικόνας. Το φως από την οθόνη αυτή απελευθερώνει ηλεκτρόνια από τη φωτοκάθοδο, τα οποία επιταχύνονται από διαφορά δυναμικού περίπου 25 kV και προσπίπτουν πάνω σε φθορίζουσα οθόνη,

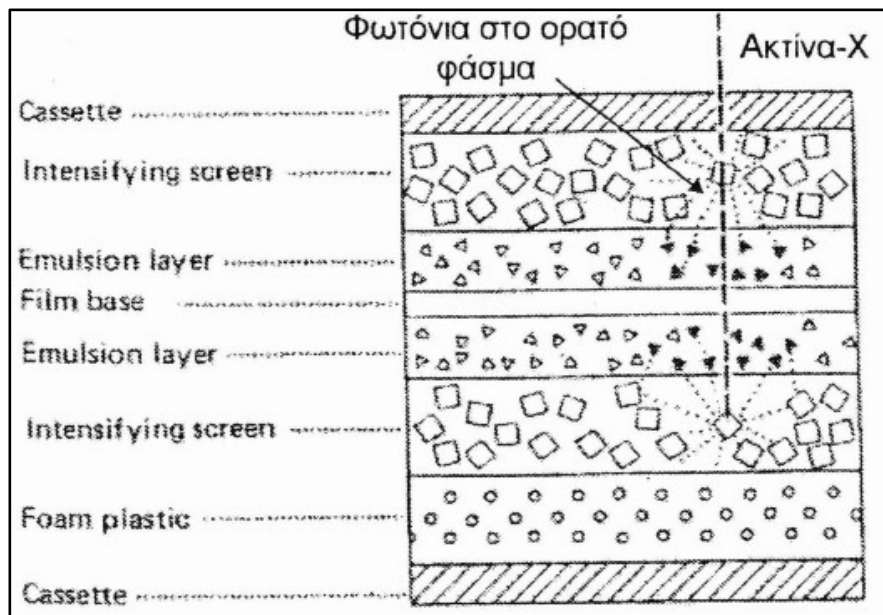
όπου παράγεται ορατή ακτινοβολία. Στην ενισχυτική οθόνη οι ακτίνες-Χ επιδρούν με τους κόκκους ενός υλικού που καλείται «φωσφόρος» και ως συνέπεια της αλληλεπίδρασης παράγονται πολλά φωτόνια στο ορατό φάσμα. Ως «φώσφορος» χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά, όπως: CaWO_4 , GdO_2S , LaOBr κτλ. Τα φωτόνια του ορατού φάσματος που παράγονται αλληλεπιδρούν με τους κόκκους AgBr που περιέχει το φιλμ με συνέπεια την αμαύρωση του, δηλαδή με τη μεταβολή της οπτικής πυκνότητας του. Η απόδοση της οθόνης εξαρτάται από το πάχος της και το υλικό του φωσφόρου.



Σχήμα 3.9-Χρήση ενισχυτικών οθονών στη ραδιογραφία [5]

Η χρήση συνδυασμού φιλμ και ενισχυτικής οθόνης οδηγεί σε πολύ μικρότερες εκθέσεις, ωστόσο έχει ως συνέπεια τη μείωση της διακριτικής ικανότητας. Επιπλέον, έχει ως συνέπεια την αύξηση του θορύβου, λόγω κυρίως της ανομοιογένειας της κάλυψης της οθόνης με φώσφορο και της κύμανσης του πλήθους φωτονίων του ορατού φάσματος, τα οποία παράγονται κατά την απορρόφηση της ενέργειας μίας ακτίνας-Χ από τον φώσφορο.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις, στις οποίες παίζει σημαντικό ρόλο η μειωμένη δόση έναντι της χειρότερης διακριτικής ικανότητας, ενώ πολλές φορές είναι δυνατή η χρήση μίας ή δύο οθονών που περιβάλλουν το φιλμ.



Σχήμα 3.10-Ταυτόχρονη χρήση ενισχυτικών οθονών και φιλμ [5]

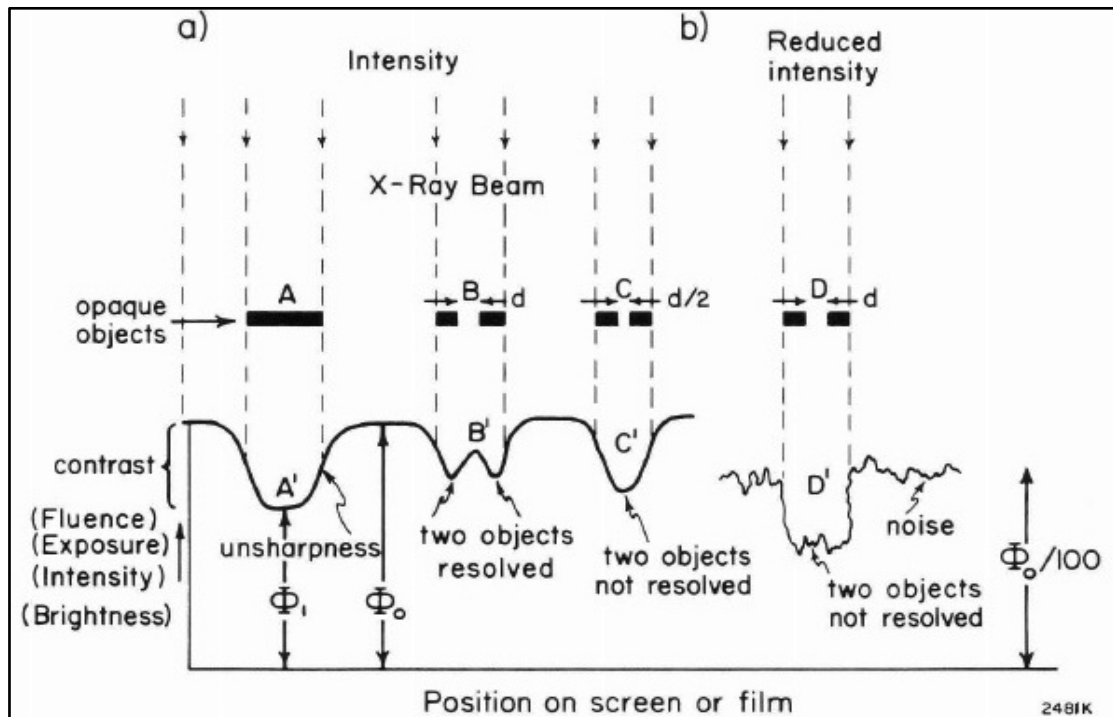
3.6 Ποιότητα στην εκτέλεση της διαγνωστικής ραδιογραφίας

Η ποιότητα της εικόνας στη διαγνωστική ραδιογραφία είναι πολύ σημαντική για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σε συνάρτηση πάντα με τη δόση που δέχεται ο ασθενής. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα επιχειρηθεί ή παρουσίαση σειράς θεμάτων που άπτονται της απόδοσης μίας διάταξης απεικόνισης ακτίνων-Χ και θα γίνει αναφορά σε ορισμένες παραμέτρους, στις οποίες θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να διασφαλίζεται ότι μία καλά σχεδιασμένη μηχανή, λειτουργεί καλά στην πράξη.

Η διασφάλιση της ποιότητας στη διαγνωστική ακτινολογία είναι ένα μέσο διατήρησης υψηλών προτύπων απεικόνισης και εργασίας με στόχο την ελαχιστοποίηση της δόσης που λαμβάνουν οι ασθενείς και το ιατρικό προσωπικό. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, μια σειρά φυσικών παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος απεικόνισης ακτίνων-Χ πρέπει να είναι βρίσκονται υπό διαρκή έλεγχο. Τα χαρακτηριστικά αυτών των παραμέτρων μπορεί να μεταβάλλονται με το χρόνο, για αυτό το λόγο πρέπει να διεξάγονται δοκιμές και μετρήσεις σε τακτά χρονικά διαστήματα με τη χρήση των κατάλληλων δοκιμών ελέγχου.

3.7 Ποιότητα στο αποτέλεσμα της διαγνωστικής ραδιογραφίας

Η ποιότητα μιας εικόνας μπορεί να περιγραφεί από εκφράσεις όπως πυκνότητα (density), φωτεινότητα (brightness), ασάφεια (unsharpness), ανάλυση (resolution), αντίθεση (contrast), ομίχλη (fog), και θόρυβος (noise) [5]. Πολλές από αυτές τις εκφράσεις έχουν ακριβείς έννοιες, οι οποίες μπορούν να ποσοτικοποιηθούν. Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί το ακόλουθο σχήμα 3.11.

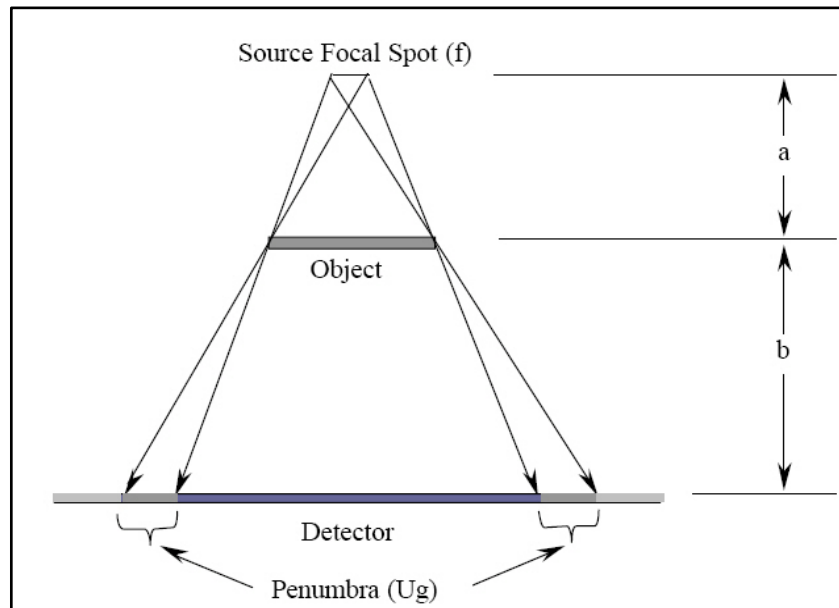


Σχήμα 3.11-Μεγέθη καθορισμού ποιότητας της ραδιογραφικής εικόνας [5]

Με βάση λοιπόν το παραπάνω σχήμα εξετάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά που καθορίζουν κάθε φορά το αποτέλεσμα της ραδιογραφίας.

3.7.1 Ασάφεια ορίων ραδιογραφίας

Ένα αντικείμενο A με αιχμηρές άκρες θα παράγει συνήθως μια εικόνα με θολά άκρα A' όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11. Αυτή η αλλαγή των χαρακτηριστικών του αντικειμένου μπορεί να οφείλεται στο μέγεθος του εστιακού σημείου ή στη μη ευθυγράμμιση των ακμών του αντικειμένου με την κατεύθυνση της δέσμης, στην κίνηση του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της έκθεσης, ή σε κάποιου είδους «θολούρας» που οφείλεται είτε στο σύστημα οθόνης είτε στο φιλμ ή ακόμη και σε άλλους παράγοντες. Στο σχήμα 3.12 απεικονίζεται η δημιουργία της ασάφειας των ορίων εξαιτίας των πεπερασμένων διαστάσεων του εστιακού σημείου.



Σχήμα 3.12-Η δημιουργία ασάφειας των ορίων εξαιτίας των πεπερασμένων διαστάσεων του σημείου εστίασης

Όλα τα παραπάνω στοιχεία σχετίζονται με την έννοια της οξύτητας ή της ασάφειας των ορίων, η οποία αποτελεί ένα μέτρο της ευκρίνειας των ορίων μεταξύ δύο περιοχών που έχουν διαφορετική σύσταση και πυκνότητα. Αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέγεθος για τη διαγνωστική ραδιολογία και είναι εξαιρετικά επιθυμητή η βελτίωση του. Για παράδειγμα είναι ιδιαίτερος σημαντικός ο διαχωρισμός του περιγράμματος ενός οστού μέσα σε ένα μαλακό ιστό.

Η οξύτητα εξαρτάται από τις διάφορες συνιστώσες της διάταξης όπως η μηχανή των ακτίνων-Χ, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι αποστάσεις πηγής-αντικειμένου-φίλμ και ο ανιχνευτής ακτινοβολίας.

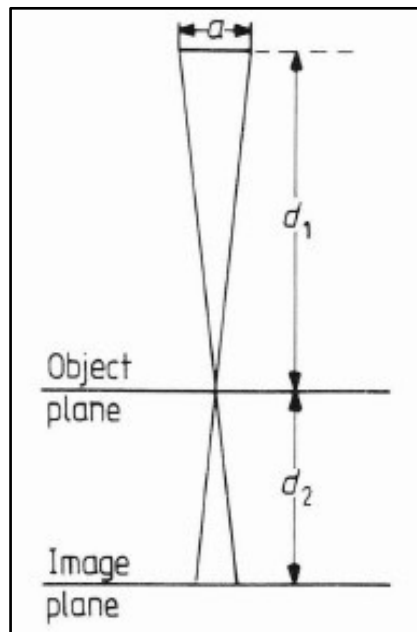
Η συνιστώσα της ασάφειας που σχετίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε διάταξης ονομάζεται γεωμετρική ασάφεια U_g και η παρουσία της οφείλεται στο ότι το εστιακό σημείο της μηχανής (focal spot) έχει μη μηδενικές διαστάσεις, ενώ εξαρτάται και από τις αποστάσεις μεταξύ πηγής ακτινοβολίας αντικειμένου και επιπέδου εικόνας [3]. Χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία και τους συμβολισμούς του σχήματος 3.12 η γεωμετρική ασάφεια υπολογίζεται ως εξής:

$$U_g = k * \left(1 - \frac{1}{m}\right)$$

όπου k είναι το πλάτος του σημείου εστίασης και m η μεγέθυνση της εικόνας. Η μεγέθυνση αποτελεί σημαντικό μέγεθος στην αξιολόγηση του αποτελέσματος της διαγνωστικής ραδιολογίας και μπορεί να οριστεί με βάση το σχήμα 3.13 ως εξής [4]:

$$m = \frac{d_2 + d_1}{d_1}$$

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα πραγματοποιηθεί εκτενής ανάλυση της μεγέθυνσης.



Σχήμα 3.13-Υπολογισμός γεωμετρικής ασάφειας και μεγέθυνσης [4]

Η συνολική ασάφεια ενός συστήματος, αν αγνοηθεί η ασάφεια εξαιτίας της κίνησης δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$U = (U_r^2 + U_g^2)^{\frac{1}{2}} = F * \left[\frac{1}{m} + \left(1 - \frac{1}{m} \right)^2 * a^2 * F^{-2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

όπου ο όρος U_r είναι η ασάφεια εξαιτίας της διάταξης ανίχνευσης φωτονίων (φιλμ) και F η εσωτερική ασάφεια της διάταξης, στην περίπτωση που το αντικείμενο έχει μηδενικό πάχος και είναι σε επαφή με το επίπεδο όπου γίνεται η απεικόνιση. Όπως προκύπτει:

$$U_r = \frac{F}{m}$$

3.7.2 Διακριτική ικανότητα μεταξύ δύο αντικειμένων

Τα δύο αντικείμενα στο παράδειγμα Β του σχήματος 3.11, βρίσκονται σε απόσταση d μεταξύ τους και παράγουν δύο εικόνες (B') με μη ευδιάκριτα άκρα. Δεδομένου ότι οι εικόνες μπορούν να θεωρηθούν ως ξεχωριστές τα αντικείμενα διακρίνονται σε ικανοποιητικό βαθμό. Ωστόσο, όταν τα αντικείμενα μετακινούνται πιο κοντά όπως στο παράδειγμα C, τα δύο αντικείμενα πλέον δε διακρίνονται. Η χωρική διακριτική ικανότητα ορίζεται ως το μέγεθος, το οποίο εκφράζει την ικανότητα μιας διάταξης να διακρίνει αντικείμενα, τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά. Η ελάχιστη απόσταση που μπορούν να βρίσκονται τα αντικείμενα και να διακρίνονται μεταξύ τους αποτελεί τη χωρική διακριτική ικανότητα.

Συχνά ορίζεται σε «γραμμές ανά mm», δηλαδή μέχρι πόσες γραμμές (διαφορετικά αντικείμενα) ανά μονάδα μήκους είναι δυνατό να διακρίνονται σε μία ραδιογραφία. Τυπική ανάλυση σε ένα διαγνωστικό τμήμα είναι από 30 Lpmm για υψηλή λεπτομέρεια, έως 1 Lpmm για συστήματα βίντεο [5]. Αυτό σημαίνει πως σε ένα τηλεοπτικό σύστημα αντικείμενα σε απόσταση 1 mm αναλύονται οριακά. Η συγκεκριμένη προδιαγραφή της ανάλυσης σε ζεύγη γραμμής ανά mm δεν είναι τόσο ακριβής, επειδή η ανάλυση θα εξαρτηθεί από την εξασθένηση του αντικειμένου της δοκιμής ενώ επιπλέον θα επηρεάζεται από τις συνθήκες της προβολής.

3.7.3 Αντίθεση

Έστω ότι η ροή των φωτονίων σε ένα σημείο αναφοράς είναι Φ_0 και σε ένα γειτονικό σημείο είναι Φ_1 εξαιτίας του αντικειμένου A. Η αντίθεση που παράγεται από το αντικείμενο A μπορεί να οριστεί ως:

$$C(\Phi) = \frac{\Phi_1 - \Phi_0}{\Phi_0}$$

Η αντίθεση μπορεί επίσης να εκφραστεί κατά αντιστοιχία με την έννοια της ενεργειακής ροής ή της έκθεσης. Παρά το γεγονός ότι αυτοί οι τρεις ορισμοί δεν θα δώσουν ακριβώς την ίδια αριθμητική τιμή, οι διαφορές είναι συνήθως μικρές. Η ικανότητα του ματιού να διαπιστώσει μια δεδομένη αντίθεση εξαρτάται από πολλούς

παράγοντες. Για παράδειγμα, μία δεδομένη αντίθεση σε μια φωτεινή οθόνη μπορεί να είναι ανιχνεύσιμη, ενώ η ίδια αντίθεση σε μία σκοτεινή οθόνη μπορεί να μην είναι. Επίσης υπάρχει εξάρτηση από το πόσο γρήγορα η αντίθεση μεταβάλλεται σε σχέση με την απόσταση από το φιλμ ή την οθόνη. Η αντίθεση που παρατηρείται σε μια οθόνη βίντεο για μια συγκεκριμένη εξέταση εξαρτάται και από την συγκεκριμένη ρύθμιση του βίντεο.

3.7.4 Θόρυβος και κβαντικός θόρυβος

Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού τονίζεται η σημασία της μείωσης της δόσης στον ασθενή. Υπάρχει μια θεμελιώδης αρχή που εμποδίζει τη μείωση της δόσης χωρίς όριο. Κατά τη διάρκεια μιας έκθεσης με ακτίνες-Χ το φιλμ βομβαρδίζεται από μεμονωμένα φωτόνια, τα οποία θα παράγουν την εικόνα με στίγματα όπως για παράδειγμα λίγες σταγόνες στο πεζοδρόμιο όταν ξεκινάει μια βροχή. Καθώς συνεχίζεται ο βομβαρδισμός αρχίζουν οι επικαλύψεις και στο τέλος τα στίγματα εξαφανίζονται. Το γεγονός ότι η εικόνα δημιουργείται από την καταγραφή μεμονωμένων φωτονίων αποτελεί πηγή ενός τύπου θορύβου (noise), που ονομάζεται κβαντικός θόρυβος και ενδεχομένως εισάγει περιορισμούς στην ανίχνευση της πραγματικής πληροφορίας, που αποτελεί το σήμα.

Η κύρια πηγή δημιουργίας κβαντικού θορύβου είναι η στατιστική κύμανση του πλήθους των φωτονίων που ανιχνεύονται και της αντίστοιχης ενέργειας που αποθηκεύεται ανά μονάδα επιφάνειας. Εκτός αυτού δημιουργία θορύβου μπορεί να υπάρξει εξαιτίας ανομοιογένειας του ανιχνευτή ακτινοβολίας και γενικότερα του συστήματος απεικόνισης. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να μειωθεί με αύξηση του πλήθους των ανιχνεύσιμων φωτονίων, γεγονός που αναμφίβολα μεγαλώνει τη δόση που απορροφά ο εκάστοτε ασθενής. Για αυτό και συνήθως ενδιαφέρει η επίτευξη ενός συγκεκριμένου επιπέδου ποιότητας εικόνας επιτυγχάνοντας όσον το δυνατόν χαμηλότερη δόση στον ασθενή και τηρώντας τη βασική αρχή της βελτιστοποίησης που ισχύει στην ακτινοπροστασία – As Low as Reasonably Achievable - ALARA [2].

Όπως είναι γνωστό από τη στατιστική, η τυπική απόκλιση που συνοδεύει το πλήθος των γεγονότων, όπως τα φωτόνια που φτάνουν στον ανιχνευτή ισούται με την τετραγωνική ρίζα του πλήθους των γεγονότων. Έτσι αν ανιχνεύθηκαν σε μια δεδομένη χρονική στιγμή N φωτόνια, το στατιστικό σφάλμα θα ισούται με:

$$\sqrt{N}$$

Κατά συνέπεια, προκειμένου να βελτιωθεί η διακύμανση του πλήθους των φωτονίων που ανιχνεύονται κατά δύο φορές θα πρέπει να φτάσουν στον ανιχνευτή τέσσερις φορές περισσότερα φωτόνια, με προφανείς επιπτώσεις στη δόση.

Σε κάθε περίπτωση βασική επιδίωξη για το βέλτιστο αποτέλεσμα είναι η μείωση του θορύβου. Παρατηρώντας εκ νέου το σχήμα 3.11, στο δεξί γράφημα όπου η ροή είναι περίπου το 1/100 της αρχικής τιμής σε σχέση με το αριστερό μέρος του διαγράμματος (η ευαισθησία είναι αυξημένη κατά 100 φορές, έτσι ώστε να διακρίνεται το σήμα). Ο θόρυβος είναι τώρα 10 φορές μεγαλύτερος σε σχέση με το σήμα για αυτό και το αποτέλεσμα που λαμβάνεται δεν είναι ικανοποιητικό. Τα αποτελέσματα του θορύβου απεικονίζονται επίσης στο σχήμα 3.11, στις περιπτώσεις B, B και D και D', όπου ενώ αρχικά παρατηρούνται δύο αντικείμενα σε απόσταση d, στη συνέχεια δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτά λόγω ακριβώς της αύξησης του θορύβου σε σχέση με το σήμα.

3.8 Βασικές παράμετροι για τη διασφάλιση της ποιότητας των ακτίνων-Χ

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα πραγματοποιηθεί καταγραφή και ανάλυση των παραμέτρων που διαμορφώνουν και διασφαλίζουν την ποιότητα στη διαγνωστική ραδιογραφία [4]. Η επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων για μια δεδομένη εξέταση με ακτίνες-Χ δεν είναι εύκολη διαδικασία.

Συνήθως, επιλέγεται πρώτα η τάση λειτουργίας ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ασθενούς και το είδος της εξέτασης, και στη συνέχεια το ρεύμα λειτουργίας, ώστε το ραδιογραφικό αποτέλεσμα να δώσει τη σωστή αμαύρωση στο φιλμ. Σε κάθε περίπτωση γίνεται προσπάθεια για την επιλογή των παραμέτρων που θα δώσουν την καλύτερη δυνατή εικόνα, με ελαχιστοποίηση της δόσης που λαμβάνει ο ασθενής.

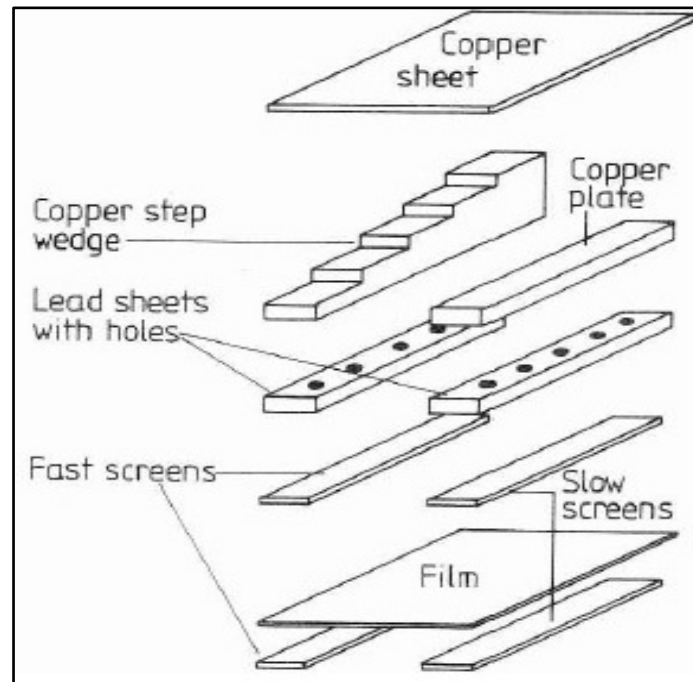
3.8.1 Η ορθή λειτουργία της μηχανής ακτίνων-Χ

Το δυναμικό διέγερσης κατά μήκος ενός σωλήνα ακτίνων-Χ επηρεάζει τόσο το πλήθος των φωτονίων που εκπέμπονται και συνεπώς διέρχονται μέσω του ασθενούς, όσο και την αντίθεση που εμφανίζεται στην επιφάνεια απορρόφησης του φιλμ. Ραδιολογικές εξετάσεις απαιτούν ειδικά χαρακτηριστικά στις μηχανές ακτίνων-Χ σε σχέση με τα ανθρώπινα όργανα που πρέπει να εξεταστούν. Για παράδειγμα, τάση σε εύρος (120-140 kV) χρησιμοποιείται για εξετάσεις στο θώρακα, ενώ στη

μαστογραφία όπου απαιτείται μέγιστη αντίθεση χρησιμοποιούνται χαμηλά δυναμικά της τάξεως των 30 kV.

Η ονομαστική τάση που αναγράφεται στη μηχανή παραγωγής ακτίνων-Χ συνήθως δείχνει τη μέγιστη τιμή της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται στη μηχανή. Η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια 1 kV άμεσα χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικό βολτόμετρο είτε έμμεσα παρατηρώντας τη διείσδυση της ακτινοβολίας σε διάταξη που περιγράφεται ακολούθως και απεικονίζεται στο σχήμα 3.14. Η διάταξη περιλαμβάνει ένα σύστημα γρήγορων και αργών οθονών προσαρμοσμένες σε φιλμ ραδιογραφίας και πραγματοποιεί σύγκριση στην οπτική πυκνότητα (αμαύρωση) του φιλμ που προκύπτει από τη διείσδυση των ακτίνων-Χ.

Στην πρώτη περίπτωση η ακτινοβολία διεισδύει μέσα από ένα φίλτρο χαλκού, που χρησιμεύει στη σκλήρυνση της ακτινοβολίας, σε ένα δοκίμιο μολύβδου με οπές και τελικά αλληλεπιδρά με το σύστημα αργών οθονών-φιλμ παράγοντας μία οπτική πυκνότητα «αναφοράς» για την συγκεκριμένη τάση λειτουργίας που λειτούργησε η μηχανή των ακτίνων-Χ [4]. Ταυτόχρονα όμως η ίδια ακτινοβολία διεισδύει, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.14, και μέσα από το δοκίμιο χαλκού με μεταβλητό πάχος (copper step wedge), ένα δοκίμιο μολύβδου με οπές όμοιο με την πρώτη περίπτωση και αλληλεπιδρά με το σύστημα γρήγορων οθονών-φιλμ. Σε αυτή την περίπτωση παράγονται ανόμοιες τιμές της οπτικής πυκνότητας στο φιλμ, εξαιτίας της μεταβολής του πάχους το δοκιμίου χαλκού κατά μήκος του. Ωστόσο η δεύτερη διάταξη είναι εκ των προτέρων βαθμονομημένη υπολογίζοντας τον αριθμό του βήματος και την αντίστοιχη οπτική πυκνότητα του φιλμ με την ονομαστική τιμή λειτουργίας της διαφοράς δυναμικού. Συνεπώς η τιμή της τάσης λειτουργίας της μηχανής θα βρεθεί με την ακριβή αντιστοίχιση την οπτικής πυκνότητας «αναφοράς» με κάποια από τις τιμές της οπτικής πυκνότητας της βαθμονομημένης διάταξης.



Σχήμα 3.14-Ανάλυση διάταξης για την εκτίμηση διείδυσης της ακτινοβολίας [4]

Ένας εναλλακτικός τρόπος μέτρησης της τάσης λειτουργίας της μηχανής σχετίζεται με τη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών ανιχνευτών στερεάς κατάστασης. Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός συνήθως αποτελείται από δύο πλάκες χαλκού διαφορετικών διαστάσεων και δύο φωτοδιόδους που τοποθετούνται πίσω από κάθε πλάκα και μετατρέπουν τις ακτίνες-Χ που διαπερνούν τις πλάκες σε δύο σήματα χαμηλών τάσεων. Η αναλογία των τάσεων οδηγεί στην τάση λειτουργίας της μηχανής. Επιπροσθέτως με τη χρήση βολτόμετρων εκτιμάται η αιχμή τάσης λειτουργίας της μηχανής ενώ με τη χρήση παλμογράφου υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης της κυματομορφής της τάσης λειτουργίας της μηχανής. Οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται τουλάχιστον κάθε 10 kV σε όλη την κανονική περιοχή λειτουργίας του συστήματος. Δεν υπάρχει εθνικό πρότυπο για τα όρια αποδοχής, ωστόσο μία απόκλιση έως 5 kV θεωρείται αποδεκτή. Για μεταβολές από 5 μέχρι 10 kV πρέπει να ενημερώνεται ο υπεύθυνος τεχνολόγος/μηχανικός. Για μεγαλύτερες μεταβολές πρέπει να σταματά η λειτουργία της μηχανής, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία ελέγχου και επίλυσης του προβλήματος.

3.8.2 Χρόνος έκθεσης κατά την εκτέλεση της ραδιογραφίας

Ο χρόνος έκθεσης στην ακτινοβολία θα πρέπει να ελέγχεται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με μηχανικό είτε με ηλεκτρονικό τρόπο. Στην πρώτη περίπτωση, όταν πραγματοποιείται έλεγχος σε τριφασική μηχανή ακτίνων-Χ, χρησιμοποιείται

ένας δίσκος που περιστρέφεται από έναν κινητήρα με σταθερή συχνότητα. Ο δίσκος έχει διαμορφώσεις στην επιφάνεια του, έτσι ώστε να επιτρέπει την αντιστοίχιση των τόξων που καταγράφονται στο φιλμ σε δευτερόλεπτα έκθεσης στη δέσμη των ακτίνων-Χ. Με αυτή τη διαδικασία ελέγχεται κατά το πόσο το χρονικό διάστημα της έκθεσης ήταν το κατάλληλο για να διαμορφωθεί ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα στην επιφάνεια του φιλμ. Ταυτόχρονα, η μέθοδος αυτή επιτρέπει μέσω της παρατήρησης της διαμόρφωσης της πυκνότητας του φιλμ το χρόνο που χρειάζεται η μηχανή των ακτίνων-Χ για να φτάσει στο μέγιστο της τάσης λειτουργίας της.

Για τις μονοφασικές μηχανές ακτίνων-Χ χρησιμοποιείται μια απλούστερη μέθοδος που επίσης περιλαμβάνει και μετρήσεις συχνότητας ενός δίσκου. Θεωρώντας συχνότητα 50 Hz, η έκθεση για ένα δευτερόλεπτο σε ακτινοβολία ακτίνων-Χ θα παράγει 50 διακριτά ανοίγματα. Αν μία διάταξη με μία οπή περιστρέφεται πάνω από το επίπεδο του φιλμ, τότε υπολογίζεται ο χρόνος έκθεσης διαιρώντας τον αριθμό των σημείων που αποτύπωσε η οπή της περιστρεφόμενης διάταξης με τη συχνότητα.

Ένα ηλεκτρονικό χρονόμετρο χρησιμοποιεί για τη μέτρηση του χρόνου έκθεσης φωτοδιόδους που συνδέονται σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα χρονισμού. Τα περισσότερα ηλεκτρονικά χρονόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν μια άμεση ένδειξη του χρόνου έκθεσης για τριφασικές μονάδες και ταυτόχρονα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των παλμών όσον αφορά μονοφασικές μονάδες. Αυτές οι μονάδες παρέχουν μια άμεση μέτρηση του χρόνου έκθεσης. Ωστόσο το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως δε μπορεί να πραγματοποιηθεί εκτίμηση της μέγιστης τάσης λειτουργίας της μηχανής.

Στα πλαίσια των ελέγχων, οι χρόνοι έκθεσης θα πρέπει ιδανικά να μετρούνται σε όλο το κανονικό εύρος λειτουργίας της μονάδας. Για αυτό το λόγο είναι συνηθέστερες οι ηλεκτρονικές μέθοδοι ελέγχου.

3.8.3 Η μέτρηση του Half Value Layer (HVL)

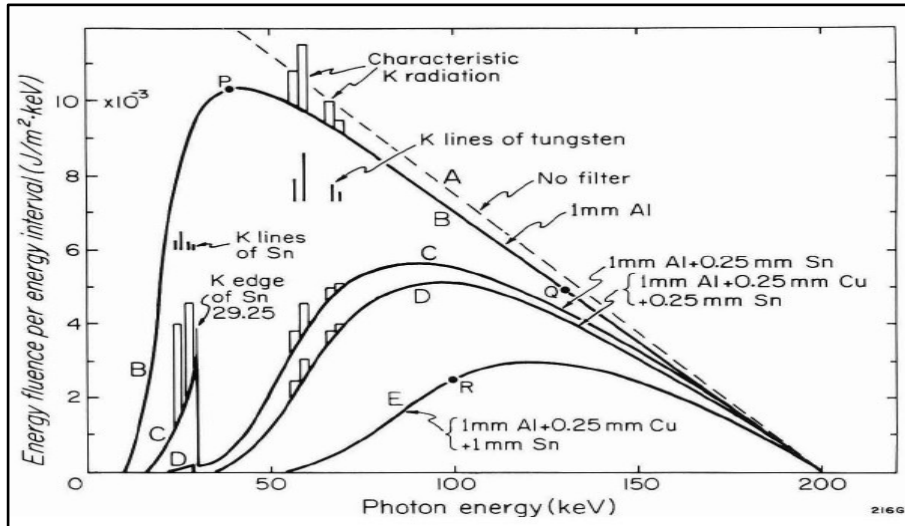
Δεδομένου ότι στην ιατρική απεικόνιση το βασικό αντικείμενο είναι η διείδυση της δέσμης μέσω του ασθενούς, είναι λογικό να αναλυθεί σε βάθος η ικανότητά της να διεισδύει σε υλικά γνωστής σύνθεσης [5]. Μία έννοια που βοηθάει στην προσέγγιση του όρου «ποιότητα» στη διαγνωστική ραδιογραφία είναι το μέγεθος Half Value Layer (πάχος υποδιπλασιασμού). Το μέγεθος Half Value Layer (HVL) είναι το πάχος του υλικού που απαιτείται για να μειωθεί η ένταση της ακτινοβολίας

στο ήμισυ της αρχικής της τιμής. Όταν εξετάζονται μηχανές ακτίνων-Χ σε εύρος τάσεως λειτουργίας 120-400 kV, το μέγεθος HVL δίνεται συνήθως σε mm χαλκού, ενώ κάτω από 120 kV δίνεται σε mm αλουμινίου. Η γνώση του HVL για να έχει κάποια αξία πρέπει να συνδυάζεται με το φάσμα της ακτινοβολίας Χ.

Ταυτόχρονα η χρήση κατάλληλων φίλτρων μπορεί να μειώσει τη δόση που λαμβάνει ο εξεταζόμενος χωρίς να επιφέρει μεταβολές στο ραδιογραφικό αποτέλεσμα. Γενικά, τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για να σκληρύνουν την ακτινοβολία και να απομακρύνουν τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών, αφού αυτά κυρίως απορροφούνται από τον ασθενή. Όλες οι μηχανές ακτίνων-Χ που χρησιμοποιούνται σε εξετάσεις ρουτίνας πρέπει να διαθέτουν έναν απορροφητή Al πάχους 3 mm, εξαιτίας του οποίου η ακτινοβολία που προκύπτει έχει μία τιμή του HVL από 1 έως με 3 mm Al, ανάλογα με την τάση λειτουργίας της μηχανής.

3.8.3.1 Η χρήση φίλτρων σε μία δέσμη ακτίνων-Χ

Όταν η μονοενεργειακή δέσμη ηλεκτρονίων προσβάλει την άνοδο μέσα στη μηχανή, το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας-Χ λόγω πέδησης που παράγεται και εκπέμπεται, αν αγνοηθεί το φιλτράρισμα της ακτινοβολίας, το οποίο υπάρχει και μέσα στην άνοδο, είναι μια ευθεία γραμμή, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.15 (διακεκομμένη ευθεία Α). Αυτή η ενεργειακή κατανομή δεν θα ήταν κατάλληλη για θεραπεία σε βάθος, επειδή τα χαμηλής ενέργειας φωτόνια δεν θα διεισδύσουν όσο χρειάζεται στο στόχο και απλώς θα αυξήσουν τη δόση στα επιφανειακά στρώματα του. Αντίστοιχα στη διαγνωστική ραδιογραφία δεν θα υπήρχε κάποιο ουσιαστικό αποτέλεσμα, επειδή τα χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια δεν θα μπορέσουν να φτάσουν με το φιλμ για να αλληλεπιδράσουν με αυτό και απλώς θα συμβάλουν στη αύξηση της δόσης που λαμβάνει ο ασθενής. Για αυτό, με τη χρήση κατάλληλου φίλτρου είναι αναγκαία η σκλήρυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή η αποκοπή των φωτονίων χαμηλών ενεργειών και η αύξηση της μέσης τιμής της ενέργειας των ακτίνων-Χ. Ενδεικτικά, στο παρακάτω σχήμα αν χρησιμοποιηθεί ένα φίλτρο αλουμινίου πάχους 1 mm προκύπτει η καμπύλη Β, ενώ αν προστεθεί και ένα φίλτρο από κασσίτερο πάχους 0.25 mm προκύπτει η καμπύλη C.

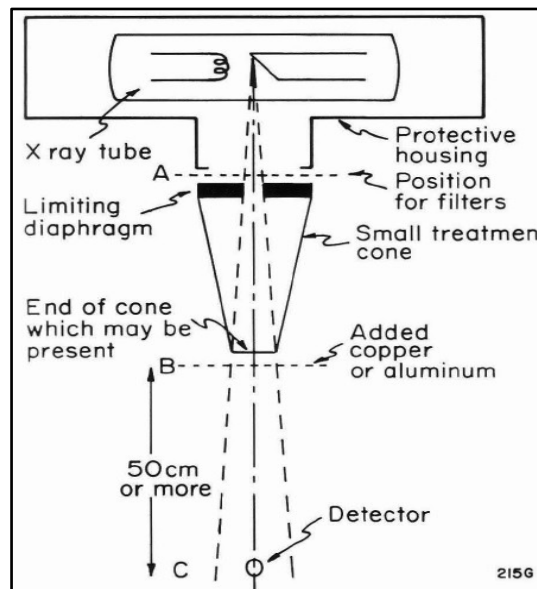


Σχήμα 3.15-Φάσμα ακτινοβολίας-X με τη χρήση φίλτρων [5]

3.8.3.2 Μέτρηση του Half Value Layer

Το HVL μιας δέσμης ακτίνων-X μπορεί να εκτιμηθεί με μέτρηση του ρυθμού έκθεσης μιας δέσμης ακτίνων-X για μια σειρά διαφορετικών απορροφητών που τοποθετούνται μπροστά στη δέσμη. Στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται μία διάταξη για την πραγματοποίηση των σχετικών μετρήσεων.

Ο ανιχνευτής θα πρέπει να είναι σε τέτοια απόσταση έτσι ώστε η ακτινοβολία που σκεδάζεται από το φίλτρο B είναι αμελητέα. Επιπλέον, η δέσμη ακτίνων-X θα πρέπει να κατευθύνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε ο ανιχνευτής C να μην επηρεάζεται από τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία που προέρχεται από αντικείμενα που βρίσκονται κοντά του.

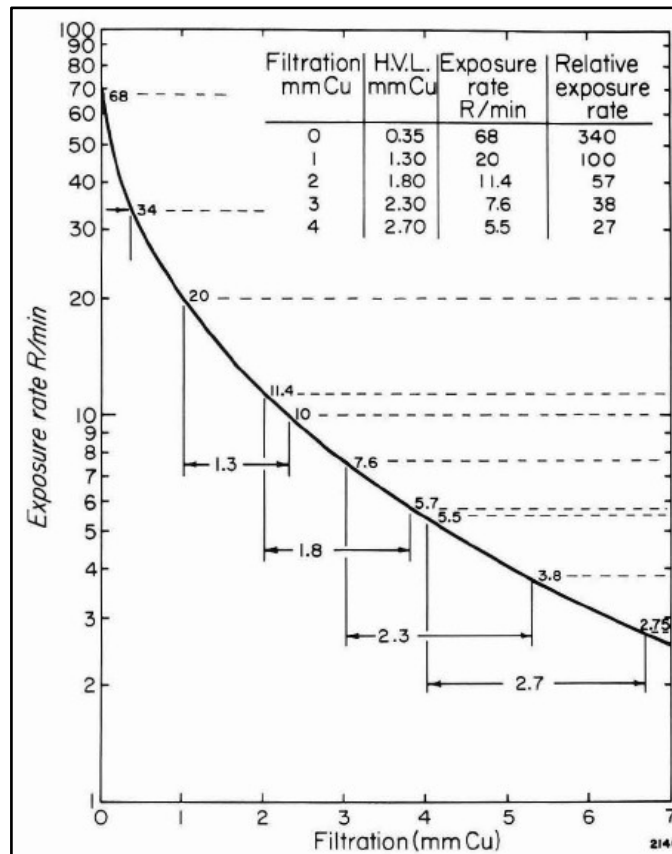


Σχήμα 3.16-Διάταξη μέτρησης HVL

Η δέσμη θα πρέπει να έχει διαστάσεις περίπου $5 \times 5 \text{ cm}^2$ στη θέση του ανιχνευτή και να ληφθεί μέριμνα, ώστε ο ανιχνευτής να βρίσκεται στο κέντρο αυτού του πεδίου των $5 \times 5 \text{ cm}^2$.

Ένας τρόπος για να ελεγχθεί η σωστή ευθυγράμμιση της δέσμης είναι να τοποθετηθεί μία φθορίζουσα οθόνη ακριβώς πίσω από τον ανιχνευτή και να λειτουργήσει η μηχανή για λίγο. Με αυτό το τρόπο μπορεί να διαπιστωθεί κατά πόσο ο ανιχνευτής είναι σωστά ευθυγραμμισμένος, δηλαδή το ίχνος του πρέπει να συμπίπτει με τις διαστάσεις της οθόνης. Η μηχανή ακτίνων-Χ διαθέτει μία σχισμή Α όπου μπορούν να τοποθετηθούν φίλτρα. Επιπλέον φίλτρα μπορούν να τοποθετηθούν στη θέση Β. Ωστόσο, με τη χρήση φίλτρων θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην καθαρότητα του υλικού του φίλτρου, καθώς η παρουσία προσμείξεων μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη αξιολόγηση της λειτουργίας της μηχανής.

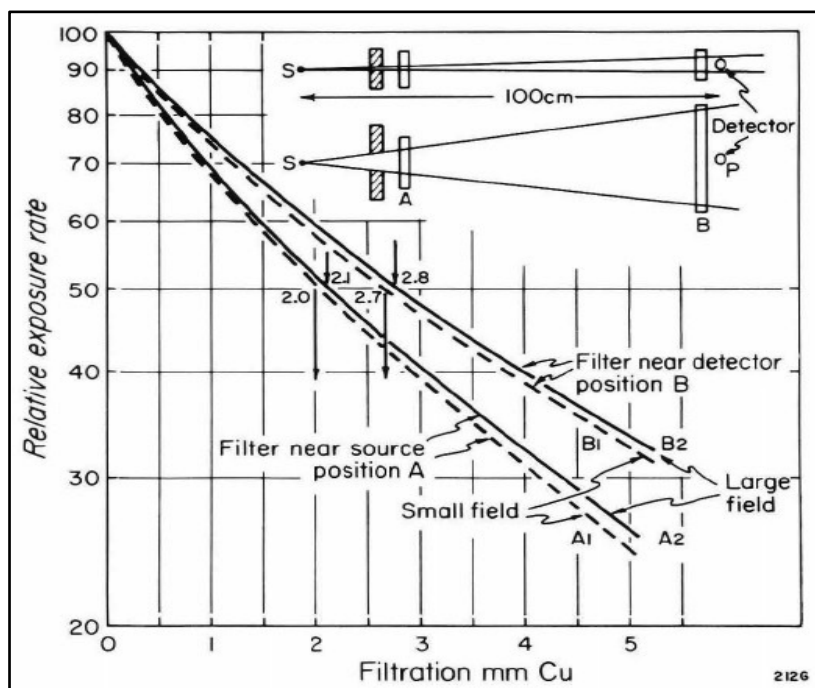
Το ποσοστό έκθεσης σε R/min θα πρέπει να καθορίζεται για μια σειρά από απορροφητές που τοποθετούνται στη σχισμή Β, ενώ τα χαρακτηριστικά λειτουργίας (τάση και ρεύμα) της μηχανής πρέπει να διατηρούνται σταθερά. Τα αποτελέσματα ενός τυπικού πειράματος δίδονται στο σχήμα 3.17 [5]. Παρατηρείται ότι το HVL μιας δέσμης χωρίς φίλτρο είναι 0.35 mm Cu, δηλαδή το φίλτρο πάχους 0.35 mm μειώνει το ρυθμό έκθεσης από 68 R/min σε 34 R/min. Εάν χρησιμοποιηθεί φίλτρο Cu πάχους 1.0 mm, τότε απαιτούνται 1.3 mm να μειωθεί η έκθεση στο μισό, δηλαδή από 20 R/min σε 10 R/min. Τελικά, το HVL έχει αυξηθεί και 1.3 mm Cu. Με τη χρήση επιπλέον φίλτρων το HVL μπορεί να αυξηθεί ακόμη περισσότερο. Στο σχήμα 3.17 για κάθε φίλτρο δίνεται ο ρυθμός έκθεσης σε σχέση με εκείνη που λαμβάνεται με τη χρήση φίλτρου Cu πάχους 1.0 mm.



Σχήμα 3.17-Μεταβολή του ρυθμού δόσης σχέση με τη χρήση φίλτρων [5]

3.8.3.3 Ο ρόλος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στις μετρήσεις HVL

Η ύπαρξη σκεδαζόμενης ακτινοβολίας μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες εκτιμήσεις του HVL [5]. Αυτό απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 3.18 όπου εξετάζεται μία μονάδα με τάση λειτουργίας 250 kV. Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε στον άξονα της δέσμης σε απόσταση ίση με 100 cm (A) από την πηγή, ενώ μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τμηματικά στον ανιχνευτή σε ένα τμήμα 5 x 5 cm² με δύο απορροφητές πρώτα στη θέση A και στη συνέχεια στη θέση B, όπου μεγάλο ποσοστό της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο φίλτρο φτάνει στον ανιχνευτή. Με βάση τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν τα διαγράμματα A₁ και B₁, τα οποία διαφέρουν σημαντικά. Συνεπώς η παρουσία σκεδαζόμενης ακτινοβολίας οδηγεί σε εσφαλμένες εκτιμήσεις.



Σχήμα 3.18-Ο ρόλος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στον καθορισμό του HVL

3.8.4 Τα χαρακτηριστικά του εστιακού σημείου

Τα χαρακτηριστικά του εστιακού σημείου (focal spot) της μηχανής καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της απεικόνισης στη διαγνωστική ραδιογραφία. Οι πεπερασμένες διαστάσεις του εστιακού σημείου αποτελούν αιτία για την ύπαρξη γεωμετρικής ασάφειας στα όρια του στόχου. Το μέγεθος του εστιακού σημείου σχετίζεται με τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής των ακτίνων-Χ, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός πως η παραγωγή θερμότητας θέτει όριο στο μέγεθος του νήματος που έχει τοποθετηθεί στην κάθοδο. Οι περισσότερες σύγχρονες μονάδες ακτίνων-Χ σχεδιάζονται για να έχουν δύο εστιακά σημεία, με διαφορετικές διαστάσεις, τα οποία αναφέρονται όπως ως «board foci». Το δεύτερο εστιακό σημείο χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ανάγκη για ραδιογραφία με μικρότερη ασάφεια. Ο έλεγχος σωστής λειτουργίας του εστιακού σημείου πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

- Με τη λήψη εικόνας του εστιακού σημείου χρησιμοποιώντας ένα δίσκο, οποίος στο κέντρο του έχει μία πολύ μικρή οπή (pinhole picture)
- Με τη χρήση δοκιμαστικών δοκιμίων (test objects)

3.8.4.1 Λήψη εικόνας του εστιακού σημείου

Το πραγματικό μέγεθος του σημείου εστίασης μπορεί να μετρηθεί, όπως αναφέρθηκε, με τη λήψη εικόνας του εστιακού σημείου, του οποίου η ακτινοβολία περνά μέσα από μία πολύ μικρή οπή στο κέντρο ενός δίσκου [5]. Στο σχήμα 3.19a περιγράφεται η σχετική διαδικασία. Χρησιμοποιείται ένα δοκίμιο με οπή, το οποίο έχει τοποθετηθεί στον άξονα της δέσμης ακτίνων-Χ, σε μια απόσταση F από το εστιακό σημείο. Ένα φιλμ ή συνδυασμός ενισχυτικής οθόνης και φιλμ τοποθετείται σε μια απόσταση $(F+d)$ και λαμβάνεται μία εικόνα. Στη συνέχεια αναλύεται η εικόνα που έχει σχηματιστεί. Εμφανίζεται ένα αντικείμενο με διαστάσεις W' και L' , οι οποίες συνδέονται με τις πραγματικές διαστάσεις του εστιακού σημείου L , W με τις παρακάτω σχέσεις:

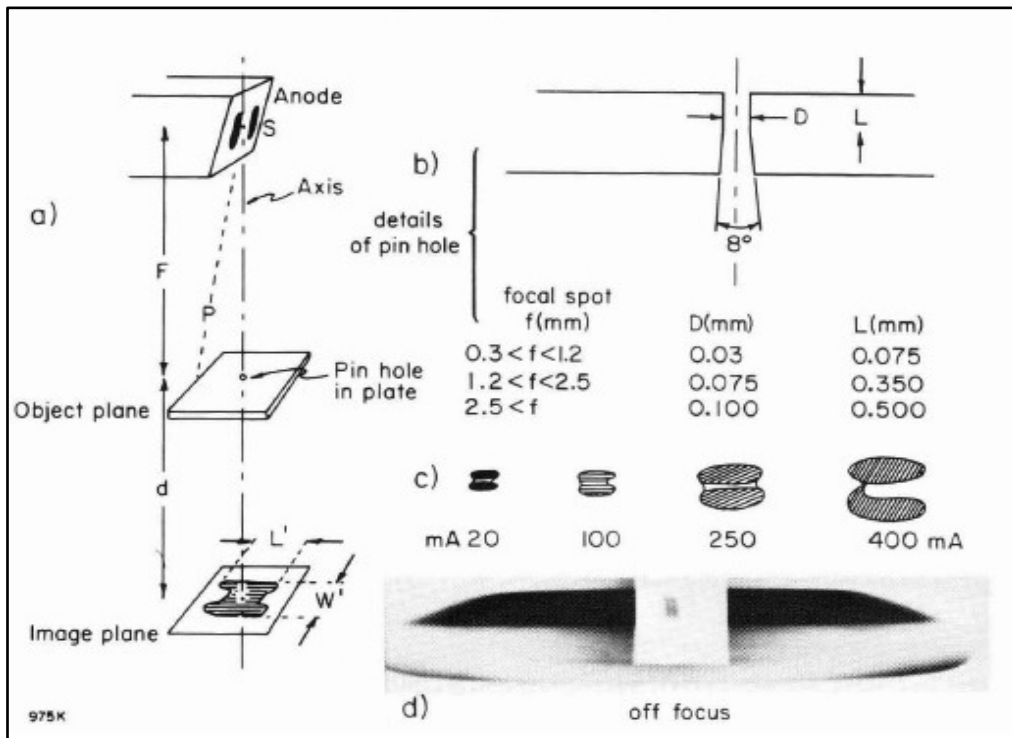
$$W = \frac{W'}{m}$$

$$L = \frac{L'}{m}$$

$$m = \frac{d}{F}$$

Το μέγεθος m ονομάζεται μεγέθυνση της εικόνας του σημείου εστίασης, όπως έχει αναφερθεί ήδη στην παράγραφο 3.7.1. Για να είναι καλή η εικόνα του εστιακού σημείου πρέπει η οπή να είναι μικρή σε σύγκριση με το εστιακό σημείο, συγκεκριμένα πολύ μικρότερη του ενός χιλιοστού. Επιπλέον το σχήμα 3.19b απεικονίζονται οι διαστάσεις που πρέπει να έχει μία οπή για διάφορες διαστάσεις του σημείου εστίασης που θέλουμε να μελετήσουμε.

Ακόμη το υλικό της πλάκας, πάνω στην οποία βρίσκεται η οπή πρέπει να είναι έχει υψηλή πυκνότητα και ατομικό αριθμό, όπως π.χ. ένα κράμα χρυσού και λευκόχρυσου.



Σχήμα 3.19-Έλεγχος σωστής λειτουργίας εστιακού σημείου με λήψη εικόνας οπής [5]

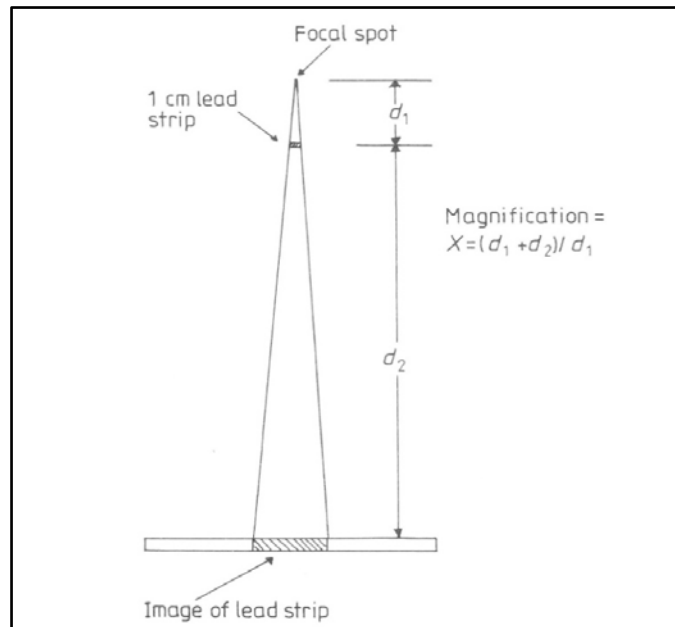
Το μέγεθος και το σχήμα του εστιακού σημείου εξαρτάται από τη διεύθυνση που παρατηρείται. Στο σχήμα 3.19a το μέγεθος και στο σχήμα του εστιακού σημείου, όταν το εξετάσουμε κατά τον άξονα SP θα είναι πολύ μικρότερο από το L'.

Πρέπει πάντως να επισημανθεί ότι το μέγεθος του εστιακού σημείου εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους, όπως το ρεύμα λειτουργίας της μηχανής, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.19c. Ειδικά για την εξάρτηση από το ρεύμα λειτουργίας πρέπει να αναφερθεί ότι όσο υψηλότερη είναι η τιμή του, τόσο μεγαλύτερη κινητική ενέργεια έχουν τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερώνονται λόγω της θερμοϊονικής εκπομπής από την άνοδο, με συνέπεια να αυξάνει και το πλάτος της δέσμης ηλεκτρονίων που κινείται προς την άνοδο και προσπίπτει στο εστιακό σημείο.

Για τη λήψη μιας εικόνας μπορεί να απαιτηθούν μεγάλες τιμές της έκθεσης, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει βλάβη στη μηχανή των ακτίνων-X, ειδικά αν δεν χρησιμοποιείται συνδυασμός ενισχυτικής οθόνης και φιλμ. Με εξαίρεση τον έλεγχο για το μικρότερο εστιακό σημείο, ένας συνδυασμός φιλμ οθόνης έχει επαρκή ανάλυση για να δώσει μία αποδεκτή εικόνα, ενώ παράλληλα η πιθανότητα υπερθέρμανσης και βλάβης της ανόδου αποφεύγεται.

Από τα ανωτέρω προκύπτει πως υπάρχουν δυσκολίες στη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου για εκτίμηση του μεγέθους το εστιακού σημείου. Επιπλέον, σε ορισμένες μηχανές υπάρχει περίπτωση να μην είναι γνωστά όλα τα απαραίτητα

γεωμετρικά χαρακτηριστικά ώστε να εφαρμοσθεί η παραπάνω μέθοδος. Για την περίπτωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μέγεθος της μεγέθυνσης, μέσω της χρήσης μίας πλάκας Pb με πλάτος 1 cm, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.20 [4].



Σχήμα 3.20-Έλεγχος σωστής λειτουργίας εστιακού σημείου με χρήση πλάκας Pb [4]

Από την ανάλυση του σχήματος 3.17 προκύπτει ο αντίστοιχος τύπος για τη μεγέθυνση m :

$$m = \frac{d_1 + d_2}{d_1}$$

Στην πλειοψηφία των μηχανών αναπόφευκτα υπάρχουν περιοχές της ανόδου εκτός του εστιακού σημείου που βομβαρδίζονται από ηλεκτρόνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εκπέμπονται ακτίνες-Χ από σχεδόν το σύνολο της περιστρεφόμενης ανόδου και όχι μόνο από το σημείο εστίασης. Αυτό το φαινόμενο δημιουργεί προβλήματα καθώς επηρεάζει το αποτέλεσμα της ραδιογραφίας και αυξάνει τη δόση που λαμβάνει ο εκάστοτε ασθενής. Με βάση τα διεθνή πρότυπα IEC (Geldner and Schnitger-1982) οι προτεινόμενες ανοχές για τις διαστάσεις των σημείων εστίασης είναι μεγάλες και συγκεκριμένα 50% για σημεία εστίασης με επιφάνεια μικρότερη από 1 mm^2 και 30-40% για αυτά με ενεργή επιφάνεια μεγαλύτερη από 1 mm^2 .

3.8.4.2 Έλεγχος του εστιακού σημείου με χρήση δοκιμίων δοκιμής (test objects)

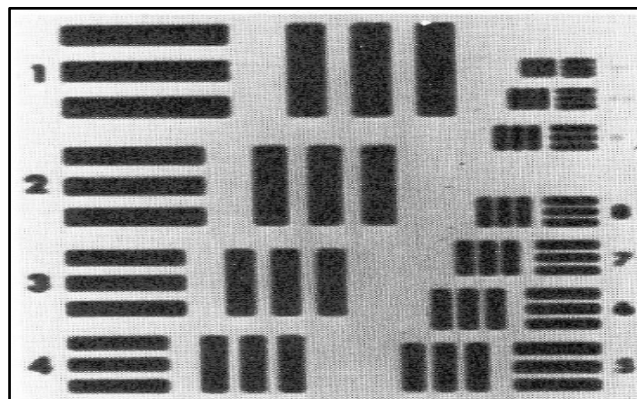
Από την παραπάνω ανάλυση γίνεται αντιληπτό ότι η αξιολόγηση του εστιακού σημείου παρουσιάζει δυσκολίες και είναι αρκετά χρονοβόρα. Μια απλούστερη μέθοδος είναι ο καθορισμός του μεγέθους του εστιακού σημείου έμμεσα, μέσω της αξιολόγησης των χαρακτηριστικών του ραδιογραφικού αποτελέσματος μιας σειράς δοκιμίων δοκιμής (test objects) [4].

Τα test objects αποτελούνται συνήθως από πλακίδια Pb ή Al κατάλληλου πάχους, τοποθετημένα παράλληλα ή κάθετα μεταξύ τους σε κατάλληλες μεταξύ τους αποστάσεις, δηλαδή με καθορισμένη τη χωρική πυκνότητα. Ο ποιοτικός έλεγχος του focal spot θα εκτιμηθεί έμμεσα πραγματοποιώντας ραδιογραφία με τα tests objects. Με την εκτίμηση της οξύτητας και την συνολική αξιολόγηση της ραδιογραφικής εικόνας.

Με αυτή τη διαδικασία και γνωρίζοντας τη μεγέθυνση και τη χωρική συχνότητα μπορούν να υπολογιστούν οι διαστάσεις του σημείου εστίασης με βάση τις διαστάσεις του μικρότερου πλακιδίου. Στο σχήμα 3.21 παρουσιάζεται η ραδιογραφική απεικόνιση μίας διάταξης test object.

Η χρήση των test objects παρέχει αρκετές ευκολίες καθώς δεν απαιτεί συγκεκριμένες προδιαγραφές μεγέθυνσης, ενώ ταυτόχρονα δεν απαιτείται να τοποθετούνται ακριβώς στον κατακόρυφο άξονα του σημείου εστίασης. Για αυτό και η χρήση τους περιλαμβάνεται αρκετά συχνά στα προγράμματα διασφάλισης ποιότητας μηχανών ακτίνων-Χ που χρησιμοποιούνται στη διαγνωστική ραδιογραφία.

Το υπολογιστικό τμήμα της παρούσας Δ.Ε. το οποίο παρουσιάζεται σε επόμενα κεφάλια αφορά ακριβώς στην προσομοίωση της χρήσης δοκιμίων δοκιμών κατά τον ποιοτικό έλεγχο ραδιογραφίας.



Σχήμα 3.21-Δοκίμια δοκιμών ραδιογραφίας [4]

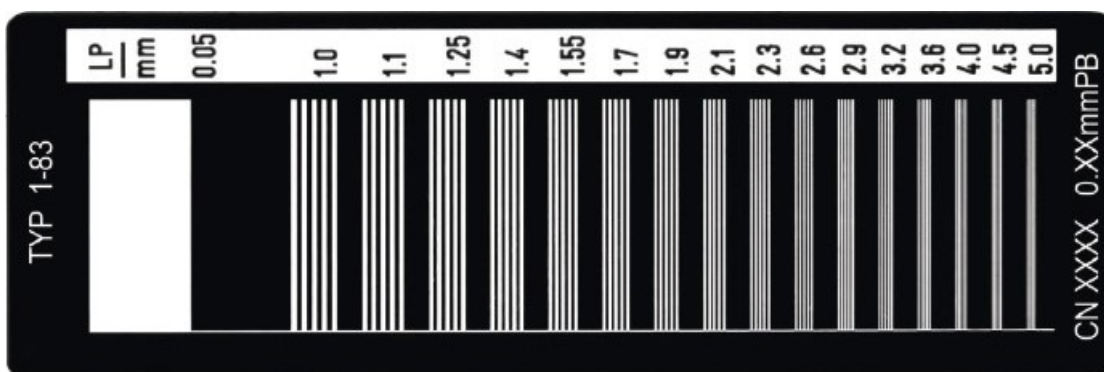
Στη πλειοψηφία των προσομοιώσεων επιλέχθηκε τύπος δοκιμών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (υλικό, διαστάσεις, χωρική συχνότητα) με στόχο την εκτέλεση προσομοιώσεων, προκειμένου να διερευνηθεί η μεταβολή της διακριτικής ικανότητας της μηχανής των ακτίνων-Χ, ως συνέπεια της μεταβολή μίας σειράς παραμέτρων του συστήματος. Πέρα από το μέγεθος του εστιακού σημείου θα εξεταστούν η ενέργεια της ακτινοβολίας που εκπέμπει η μηχανή των ακτίνων-Χ, η απόσταση μεταξύ των test objects καθώς και η μεταβολή της θέσης των test objects ως προς το φιλμ ραδιογραφίας και τη θέση της πηγής.

Στα ακόλουθα σχήματα απεικονίζονται διάφοροι τύποι δοκιμών δοκιμών που διατίθενται στο εμπόριο. Τέλος στο σχήμα 3.25 παρουσιάζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά τυπικών test objects.

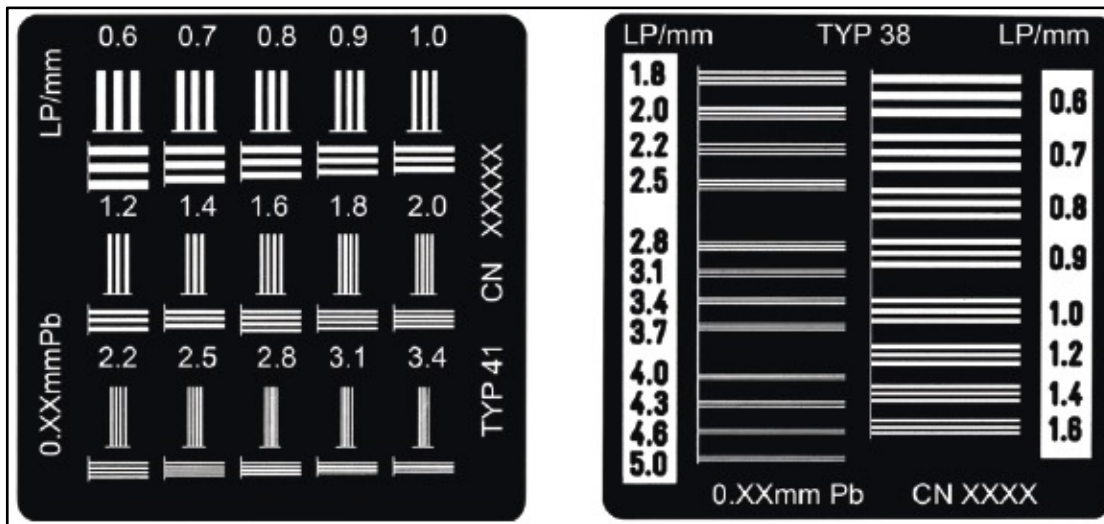


Σχήμα 3.22-Δοκίμια δοκιμών ραδιογραφίας

Από το σχήμα 3.25 επιλέχθηκαν τα χαρακτηριστικά των test objects που θα χρησιμοποιηθούν στις προσομοιώσεις και συγκεκριμένα χωρική πυκνότητα 1 Lpmm και πάχος 0.05 mm.



Σχήμα 3.23-Δοκίμια δοκιμών



Σχήμα 3.24-Δοκίμια δοκιμών

#	Min.	Resolution [lp/mm ¹]	Max.	Pb Thickness [mm]	Size [mm]
L659040	0.5	/ 0.7 1 1.4 / 2 / 2.8 /	4.0	0.05	120 x 40
L659051	0.5	/ 1 / 1.11 / 1.23 / 1.37 / 1.52 / 1.69 / 1.88 / 2.09 / 2.32 / 2.58 / 2.87 / 3.19 / 3.54 / 3.93 / 4.37 /	4.86	0.10	110 x 42
L659054	0.5	/ 0.56 / 0.63 / 0.71 / 0.8 / 0.9 / 1 / 1.12 / 1.25 / 1.4 / 1.6 / 1.8 / 2 / 2.24 / 2.5 / 2.8 / 3.15 / 3.55 / 4 / 4.5 /	5.0	0.10	55 x 45
L659101	0.5	/ 0.56 / 0.63 / 0.71 / 0.8 / 0.9 / 1 / 1.12 / 1.25 / 1.4 / 1.6 / 1.8 / 2 / 2.24 / 2.5 / 2.8 / 3.15 / 3.55 / 4 / 4.5 /	5.0	0.02	55 x 45
L659102	0.5	/ 0.56 / 0.63 / 0.71 / 0.8 / 0.9 / 1 / 1.12 / 1.25 / 1.4 / 1.6 / 1.8 / 2 / 2.24 / 2.5 / 2.8 / 3.15 / 3.55 / 4 / 4.5 /	5.0	0.05	55 x 45
L659036	0.6	/ 0.7 / 0.8 / 0.9 / 1 / 1.2 / 1.4 / 1.6 / 1.8 / 2 / 2.2 / 2.5 / 2.8 / 3.1 /	3.4	0.05	50 x 50
L659005	0.6	/ 0.7 / 0.8 / 0.9 / 1 / 1.2 / 1.4 / 1.6 / 1.8 / 2 / 2.2 / 2.5 / 2.8 / 3.1 / 3.4 / 3.7 / 4 / 4.3 / 4.6 /	5.0	0.05	50 x 50
L659066	0.6	/ 0.7 / 0.8 / 0.9 / 1 / 1.2 / 1.4 / 1.6 / 1.8 / 2 / 2.2 / 2.5 / 2.8 / 3.1 / 3.4 / 3.7 / 4 / 4.3 / 4.6 /	5.0	0.10	50 x 50
L659050	0.6	/ 0.7 / 0.8 / 0.9 / 1 / 1.2 / 1.4 / 1.6 / 1.8 / 2 / 2.2 / 2.5 / 2.8 / 3.1 / 3.4 / 3.7 / 4 / 4.3 / 4.6 / 5 / 5.5 / 6 / 7 / 8 / 9 /	10.0	0.05	65 x 55
L659061	0.6	/ 0.7 / 0.8 / 0.9 / 1 / 1.2 / 1.4 / 1.6 / 1.8 / 2 / 2.2 / 2.5 / 2.8 / 3.1 / 3.4 / 3.7 / 4 / 4.3 / 4.6 / 5 / 5.5 / 6 / 7 / 8 / 9 /	10.0	0.10	65 x 55
L659062	0.6	/ 0.7 / 0.8 / 0.9 / 1 / 1.2 / 1.4 / 1.6 / 1.8 / 2 / 2.2 / 2.5 / 2.8 / 3.1 / 3.4 / 3.7 / 4 / 4.3 / 4.6 /	5.0	0.01	50 x 50
L659064	0.6	/ 0.7 / 0.8 / 0.9 / 1 / 1.2 / 1.4 / 1.6 / 1.8 / 2 / 2.2 / 2.5 / 2.8 / 3.1 /	3.4	0.10	50 x 50
L659066	0.6	/ 0.7 / 0.8 / 0.9 / 1 / 1.2 / 1.4 / 1.6 / 1.8 / 2 / 2.2 / 2.5 / 2.8 / 3.1 / 3.4 / 3.7 / 4 / 4.3 / 4.6 /	5.0	0.10	50 x 50
L659007	0.8	/ 1 / 1.2 / 1.4 / 1.7 / 2 / 2.4 / 2.8 / 3.4 / 4 / 4.8 / 5.7 / 6.7 / 8 /	9.5	0.05	50 x 50
L659037	2.0	/ 2.2 / 2.5 / 2.8 / 3.1 / 3.4 / 3.7 / 4 / 4.3 / 4.6 / 5 / 5.3 / 5.6 /	6.0	0.08	50 x 50
L659055	2.0	/ 2.25 / 2.5 / 2.8 / 3.15 / 3.55 / 4 / 4.5 / 5 / 5.6 / 6.3 / 7.1 / 8 / 9 /	10.0	0.05	94 x 50
L659065	2.0	/ 2.2 / 2.5 / 2.8 / 3.1 / 3.4 / 3.7 / 4 / 4.3 / 4.6 / 5 / 5.3 / 5.6 /	6.0	0.08	50 x 50
L659038	3.4	/ 3.7 / 4.0 / 4.3 / 4.6 / 5.0 / 5.3 / 5.6 / 6 / 6.5 / 7.1 / 7.7 / 8.4 / 9.2 /	10.0	0.05	50 x 50
L659092	10.0	/ 11.0 / 12.0 / 13.0 / 14.0 / 15.0 / 16.0 / 17.0 / 18.0 / 19.0 /	20.0	0.03	24 x 12

Σχήμα 3.25-Πίνακας χαρακτηριστικών δοκιμών

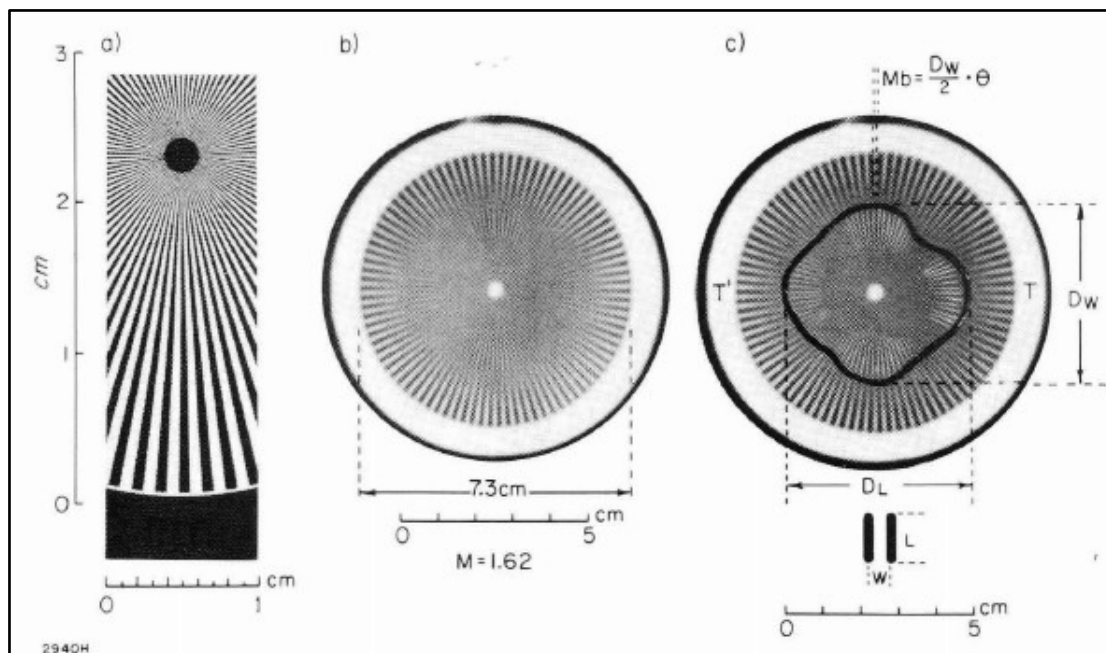
Συχνά για τον ποιοτικό έλεγχο μιας μηχανής ακτίνων-Χ χρησιμοποιείται ως test object ένας δίσκος, ο οποίος αποτελείται από πλακίδια μολύβδου πάχους 0,03 mm σε ένα μοτίβο 360°, καθένα στραμμένο κατά 2° σε σχέση με το προηγούμενό του [4]. Ένας δίσκος με αυτά τα χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο σχήμα 3.26. Ο χώρος μεταξύ των πλακιδίων πληρούται με ειδικό πλαστικό, ώστε τελικά το test object να περιλαμβάνει 90 δοκίμια Pb και ενδιάμεσα πλαστικά δοκίμια, σε ένα κύκλο διαμέτρου συνήθως 45 mm.



Σχήμα 3.26-Test object σε μορφή δίσκου

Ως αποτέλεσμα, για την περιφέρεια του δίσκου που είναι ίση με 45π (σε mm) θα υπάρχουν $90/45\pi = 0,637$ γραμμές ανά mm. Αντίστοιχα, σε απόσταση D από το κέντρο του κύκλου θα προκύπτουν $0,637 \times 45/D$ γραμμές ανά mm.

Η δοκιμή αποτελείται από δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα το test object τοποθετείται σε επαφή με το φιλμ και πραγματοποιείται ραδιογραφία. Το αποτέλεσμα που θα προκύψει είναι αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 3.27a. Προκειμένου η εικόνα να προβληθεί σωστά, η εικόνα έχει μεγεθυνθεί όπως υποδεικνύεται από την κάθετη κλίμακα δίπλα στην εικόνα. Έτσι ενώ στην περιφέρεια η χωρική συχνότητα είναι $0,64 \text{ Lp/mm}$ στο κέντρο προκύπτει συχνότητα $12,7 \text{ Lp/mm}$.



Σχήμα 3.27-Δοκίμιο σε μορφή δίσκου για δοκιμές ραδιογραφίας [4]

Στο δεύτερο βήμα πραγματοποιείται ραδιογραφία με το test object σε απόσταση 50 cm από την μηχανή ακτίνων-Χ και το φιλμ σε απόσταση 81 cm (σχήμα 3.27b). Η μεγέθυνση που προκύπτει είναι $81/50 = 1.62$. Σε αυτή την περίπτωση η εικόνα που προκύπτει είναι ασαφής και ελλιπής σε πληροφορίες εξαιτίας του πεπερασμένου μεγέθους του σημείου εστίασης.

Προσεκτικότερη εξέταση του σχήματος 3.27 δείχνει ότι υπάρχει απώλεια πληροφορίας από την περιφέρεια προς το κέντρο του δοκιμίου. Σε ένα συγκεκριμένο σημείο μάλιστα η πληροφορία χάνεται εντελώς. Προχωρώντας προς το κέντρο η πληροφορία επανεμφανίζεται με ανάστροφο χρωματισμό, γίνεται μαύρη στα σημεία που ήταν άσπρη. Συνεχίζοντας προς το κέντρο η πληροφορία χάνεται πάλι ώσπου εμφανίζεται πάλι με σωστό χρωματισμό λίγο πριν το κέντρο. Οι διάμετροι που αφορούν την πρώτη εξαφάνιση D_w και D_L μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των διαστάσεων του σημείου εστίασης, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.27c.

3.8.5 Η επίδραση του θορύβου στη διαγνωστική εικόνα

Η στατιστική διακύμανση του αριθμού των φωτονίων των ακτίνων-Χ που αλληλεπιδρούν και αμαυρώνουν κάθε σημείο στο φιλμ είναι ένα φαινόμενο που συνδέεται με την έννοια του θορύβου. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι η δημιουργία στιγμάτων στην εικόνα. Ουσιαστικά, ως θόρυβος χαρακτηρίζεται το σύνολο της πληροφορίας πάνω σε μία απεικόνιση, η οποία δεν έχει διαγνωστική αξία, αλλά αντίθετα εμποδίζει την ανίχνευση της πραγματικής πληροφορίας.

Όταν η έκθεση της ακτινοβολίας είναι πολύ χαμηλή η εμφάνιση των στιγμάτων γίνεται ορατή στο μάτι και μπορεί να επηρεάσει την ικανότητα του ακτινολόγου να παρατηρήσει στοιχεία που έχουν μικρές διαστάσεις ή έχουν χαμηλή αντίθεση. Τα στίγματα δεν μπορούν να εξαλειφθούν εντελώς, εντούτοις, μπορούν να μειωθούν κυρίως με την αύξηση του πλήθους των φωτονίων που διαμορφώνουν την εικόνα. Επιπλέον τα στίγματα μπορούν να γίνουν αόρατα με μεταβολή των συνθηκών κάτω από τις οποίες αξιολογείται το φιλμ.

Ωστόσο υπάρχουν και άλλες πηγές θορύβου που μπορούν να επηρεάσουν το ραδιογραφικό αποτέλεσμα. Το ίδιο το φιλμ μπορεί να εισάγει θόρυβο λόγω του πεπερασμένου μεγέθους του μεμονωμένων κόκκων του AgBr. Αυτό ονομάζεται διακριτότητα του φιλμ. Επιπροσθέτως ο θόρυβος μπορεί να εισαχθεί από τυχαίες διακυμάνσεις της ευαισθησίας από σημείο σε σημείο του φιλμ. Αυτό ονομάζεται διαρθρωτικός θόρυβος (structural noise) [5]. Επιπλέον, ο θόρυβος σε έναν ενισχυτή

εικόνας μπορεί να προκληθεί από τυχαίες διακυμάνσεις στο πλήθος των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων που δημιουργείται κατά την απορρόφηση των ακτίνων-Χ από την επιφάνεια της φθορίζουσας οθόνης.

Η χρήση της τυπικής απόκλισης του πλήθους των φωτονίων, τα οποία καταγράφονται σε ένα σημείο του φιλμ δίνει μια ελλιπή περιγραφή του θορύβου της εικόνας. Η πληρέστερη περιγραφή επιτυγχάνεται όταν περιγράφεται ο θόρυβος αναλύοντας τη συχνότητα των συνιστωσών του. Η σχετική διαδικασία περιλαμβάνει χρήση μετασχηματισμών Fourier.

Σε ένα σύστημα ραδιογραφίας η μέτρηση του θορύβου δεν είναι εύκολη διαδικασία και απαιτεί τη χρήση ενός μικροπυκνόμετρου για τη μέτρηση της οπτικής πυκνότητας της εικόνας, το οποίο είναι συνδεδεμένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η αξιολόγηση του θορύβου περιλαμβάνει την προσεκτική παρακολούθηση ενός ομοιόμορφα εκτιθέμενου φιλμ και την σάρωση του από το μικροπυκνόμετρο. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ψηφιοποίηση του σήματος καθώς και μετασχηματισμός του μέσω Fourier, ώστε να γίνει δυνατή η απεικόνιση και η αξιολόγηση του.

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι χρήσιμος, δεδομένου ότι δείχνει τις συνιστώσες του θορύβου που έχουν διαφορετική συχνότητα, δίνοντας ενδείξεις ως προς το πώς μπορεί να μειωθεί ο θόρυβος. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το μέγεθος Συνάρτηση Μεταφοράς Διαμόρφωσης (MTF) του συστήματος απεικόνισης για τον υπολογισμό της αναλογίας σήματος και θορύβου για διάφορες απεικονίσεις. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση του σήματος.

3.9 Η Συνάρτηση Μεταφοράς Διαμόρφωσης (Modulation Transfer Function -MTF)

Η δημιουργία της διαγνωστικής εικόνας περιλαμβάνει μια ολόκληρη σειρά υποσυστημάτων που διαμορφώνουν την απεικόνιση, όπως το εστιακό σημείο, η φθορίζουσα οθόνη, το φιλμ ή τον ενισχυτή εικόνας και, τέλος το σύστημα απεικόνισης συμπεριλαμβανομένου του οφθαλμού και του εγκεφάλου του ακτινολόγου. Κάθε μία από αυτές τις διατάξεις μεταβάλλει λιγότερο ή περισσότερο την τελική εικόνα. Η διαμόρφωση συνάρτηση μεταφοράς (Modulation Transfer Function - MTF) εισήχθη στην διαγνωστική ραδιολογία για να βοηθήσει στη μελέτη αυτού του πολύπλοκου προβλήματος, με ποσοτικό τρόπο [5].

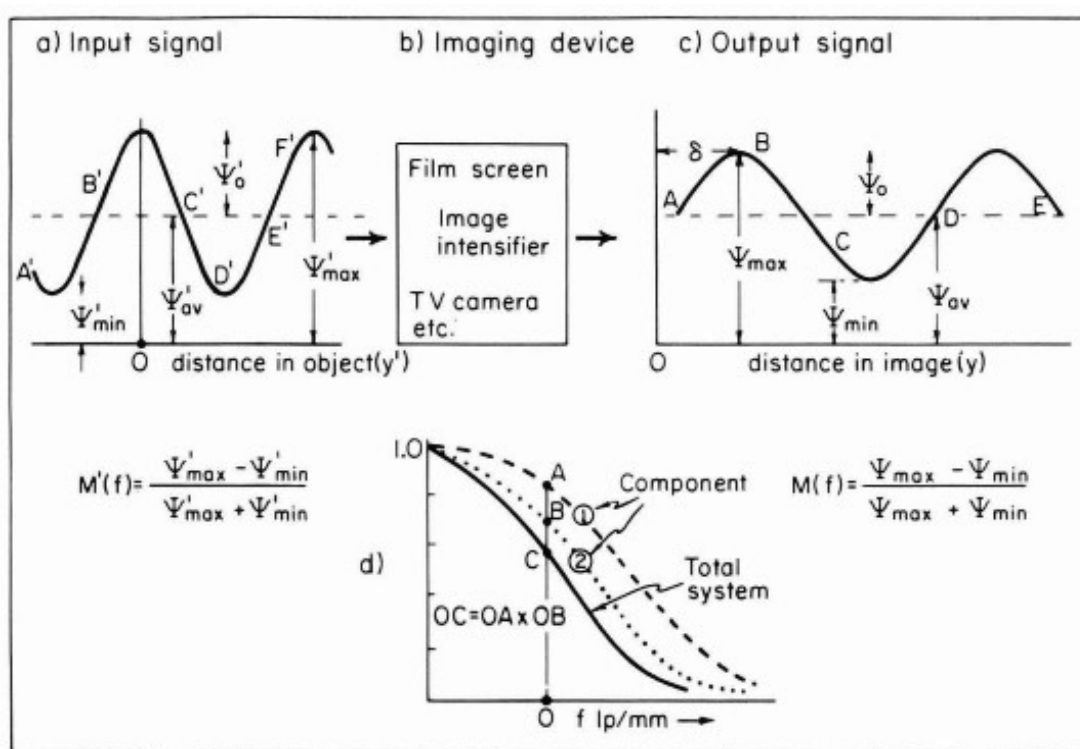
Στο σχήμα 3.28 απεικονίζεται ένα σήμα εισόδου που θα μπορούσε να είναι η κύμανση της έντασης της αρχικής ακτινολογικής εικόνας. Αυτό που ενδιαφέρει είναι

πως κάθε ένα από τα υποσυστήματα που συγκροτούν το απεικονιστικό σύστημα μπορεί να μεταβάλλει το σήμα εισόδου και να δώσει ένα σήμα εξόδου, όπως απεικονίζεται στο του σχήμα 3.28c.

Προς απλοποίηση του προβλήματος θεωρείται ότι το σήμα εισόδου είναι μια ημιτονοειδής μεταβολή της έντασης των ακτίνων-Χ που περιγράφεται από την παρακάτω συνάρτηση:

$$\Psi' = \Psi'_{av} + \Psi'_0 * \cos(2\pi f y')$$

όπου: Ψ' είναι η ροή ακτινοβολίας σε κάθε σημείο, f η χωρική συχνότητα που εκφράζεται ως το αντίστροφο της απόστασης μεταξύ των κορυφών του ημιτονοειδούς κύματος και μετριέται σε ζεύγη γραμμών ανά χιλιοστό, και $2\pi f y'$ η γωνία σε ακτίνια. Όταν αυτή η ροή ακτινοβολίας $A'B'C'D'E'$ εισάγεται στο σύστημα απεικόνισης, το σήμα εξόδου είναι $ABCDE$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.28c.



Σχήμα 3.28-Ανάλυση και απεικόνιση MTF [5]

Γενικά το πρότυπο εξόδου σχετικά με μια γραμμική συσκευή απεικόνισης θα είναι ημιτονοειδής μεταβολή στη συχνότητα κατά τον παράγοντα $1/M$, όπου M είναι η μεγέθυνση της συσκευής. Μεγαλύτερη σημασία έχει το γεγονός ότι το πλάτος της ημιτονοειδούς εξόδου συνήθως αλλάζει. Όταν το σήμα εισόδου είναι ένα

ημιτονοειδές κύμα που μεταβάλλεται γύρω από μία μέση τιμή, ορίζεται η διαμόρφωση $M'(f)$ του σήματος στην έξοδο από την παρακάτω σχέση:

$$M'(f) = \frac{\psi'_0}{\psi'_{av}} = \frac{\psi'_{max} - \psi'_{min}}{\psi'_{max} - \psi'_{min}}$$

Όταν ισχύει $\psi_0 = \psi_{av}$ τότε η διαμόρφωση λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή της, δηλαδή τη μονάδα. Αντίστοιχα, στην περίπτωση που $\psi_0 = 0$ τότε η διαμόρφωση θα είναι ίση με το 0, συνεπώς δεν υπάρχει μεταφορά σήματος. Αντίστοιχα υπολογίζεται και η διαμόρφωση για το σήμα εξόδου:

$$M(f) = \frac{\psi_0}{\psi_{av}} = \frac{\psi_{max} - \psi_{min}}{\psi_{max} - \psi_{min}}$$

Η διαμόρφωση εξόδου είναι πάντα μικρότερη ή οριακά ίση με την τιμή εισόδου, δηλαδή υπάρχει πάντα απώλεια πληροφορίας. Μεγαλύτερη σημασία από τις M και M' έχει ο λόγος τους, ο οποίος ονομάζεται μεταφορά διαμόρφωσης (MT), δεδομένου ότι αυτή καθορίζει τη πληροφορία που μεταφέρεται από το σύστημα [5]:

$$ModulationTransfer(MT) = \frac{Modulation\ of\ Output\ Signal}{Modulation\ of\ Input\ Signal} = \frac{M}{M'}$$

Η έκφραση αυτή έχει συνήθως τη μέγιστη τιμή της, όταν f είναι μικρό. Συνηθέστερα χρησιμοποιείται η κανονικοποιημένη μορφή της συνάρτησης, MTF_N , η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο [5]:

$$MTF_N(f) = \frac{M(f)}{M'(f)} * \frac{M'(0)}{M(0)}$$

όπου $M(0)$ είναι η διαμόρφωση για $f=0$. Συνήθως για τις δοκιμές ενός συστήματος χρησιμοποιείται μία ολόκληρη σειρά από test objects διαφορετικών χωρικών συχνοτήτων αλλά της ίδιας διαμόρφωσης.

Εάν αυτό συμβαίνει, τότε $M'(f) = M'(0)$ και το MTF_N μειώνεται σε:

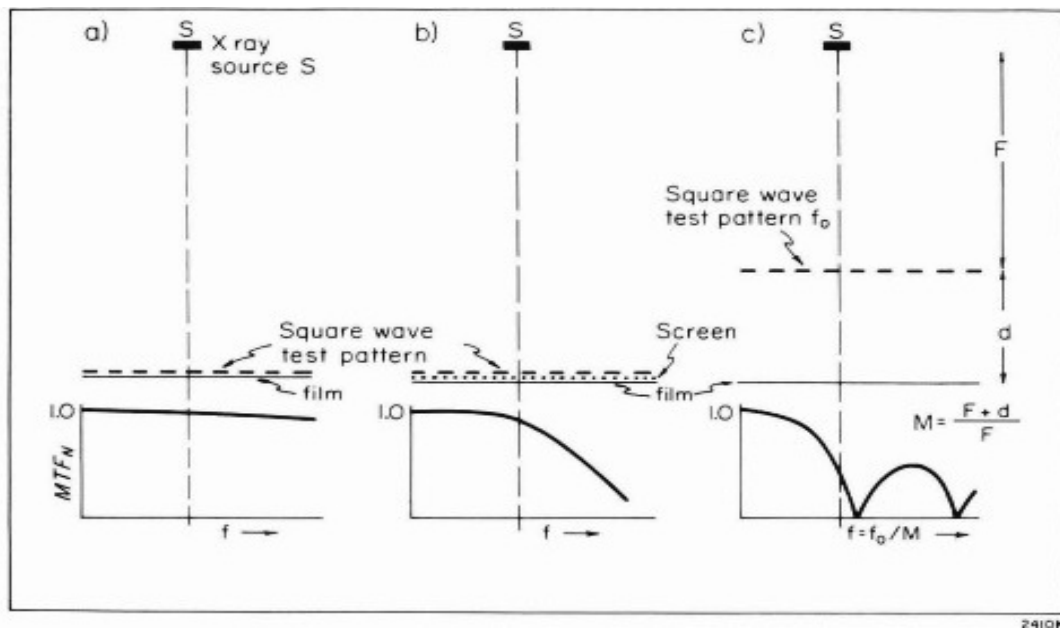
$$MTF_N(f) = \frac{M(f)}{M(0)}$$

Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μετρηθεί το MTF κοιτάζοντας τη διαφοροποίηση της εξόδου σε μια σειρά από συχνότητες και δεν χρειάζεται να εξετασθεί το σήμα εισόδου. Το μέγεθος MTF είναι χρήσιμο γιατί αν προσδιορίζεται για κάθε υποσύστημα του συστήματος απεικόνισης, το προκύπτον MTF για όλο το σύστημα βρίσκεται πολλαπλασιάζοντας τα επιμέρους MTF. Αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 3.28d όπου θεωρείται πως το σύστημα έχει δύο συνιστώσες.

3.9.1 Πειραματικός προσδιορισμός της Συνάρτησης Μεταφοράς Διαμόρφωσης

Ο προσδιορισμός της συνάρτησης MTF πειραματικά δεν είναι εύκολη υπόθεση, καθώς δεν είναι εύκολη η παραγωγή μεταβαλλόμενης ροής ακτίνων-Χ σε ένα εύρος χωρικών συχνοτήτων. Για το λόγο αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται έμμεσες μέθοδοι για τον προσδιορισμό της συνάρτησης MTF. Μία προσέγγιση προς αυτή την κατεύθυνση είναι να προσδιορισθεί η MTF για μία συσκευή απεικόνισης χρησιμοποιώντας test objects συγκεκριμένης χωρικής συχνότητας και στη συνέχεια να γίνει κατάλληλη διόρθωση με βάση το σήμα εξόδου που λαμβάνεται, όταν το σήμα εισόδου είναι μια ημιτονοειδής συνάρτηση. Η σχετική διαδικασία απαιτεί χρήση μετασχηματισμών Fourier. Μια άλλη προσέγγιση είναι να εξεταστεί η διάταξη απεικόνισης δημιουργώντας συνθήκες ακτινοβολίας ακτίνων-Χ μέσα από μια πολύ στενή σχισμή μερικών δεκάδων μm. Και στην περίπτωση αυτή για την περαιτέρω επεξεργασία απαιτείται η χρήση μετασχηματισμών Fourier.

Στη συνέχεια θα παρουσιασθεί η διαδικασία προσδιορισμού της συνάρτησης MTF χρησιμοποιώντας τη διάταξη του σχήματος 3.29. Η διάταξη αυτή βασίζεται στη δημιουργία στην είσοδο της συσκευής απεικόνισης ενός σήματος και στην εξέταση του σήματος εξόδου. Για την διεξαγωγή του πειράματος τοποθετούνται δοκίμια συγκεκριμένης χωρικής συχνότητας [5].



Σχήμα 3.29-Διαδικασία πειραματικού προσδιορισμού της συνάρτησης MTF [5]

Στην πρώτη περίπτωση τοποθετούνται ακριβώς πάνω από το φιλμ, στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται η ίδια γεωμετρία και ενισχυτική οθόνη, ενώ στην τρίτη περίπτωση το φιλμ τοποθετείται σε απόσταση d από τα δοκίμια.

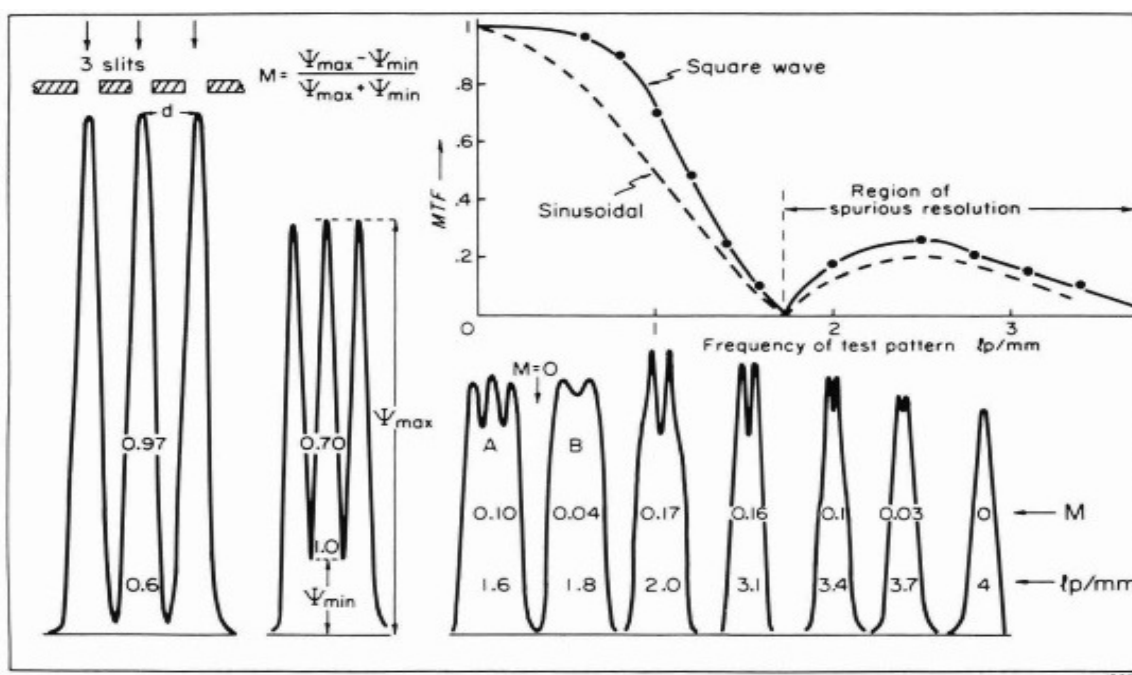
Για τις τρεις περιπτώσεις πραγματοποιείται προσδιορισμός του MTF. Στην πρώτη περίπτωση η MTF είναι σχεδόν σταθερή και περίπου ίση με τη μονάδα, ανεξάρτητα της τιμής της συχνότητας. Στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει απώλεια της διαμόρφωσης σε υψηλότερες συχνότητες, λόγω της διασποράς του φωτός που παράγεται στην ενισχυτική οθόνη, ενώ η εικόνα της εξόδου χάνεται για υψηλές τιμές του f . Τέλος στην τρίτη περίπτωση καθώς η συχνότητα αυξάνεται η MTF τείνει στο μηδέν, για να αυξηθεί πάλι σε υψηλότερες συχνότητες. Επιπροσθέτως το MTF εξαρτάται από τη μεγέθυνση M , καθώς και από τις διαστάσεις του σημείου εστίασης.

Ως εφαρμογή στο σχήμα 3.30 παρατίθενται τα αποτελέσματα πειράματος, το οποίο πραγματοποιήθηκε με την παραπάνω διάταξη χρησιμοποιώντας τρία δοκίμια από Pb, που απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με το πλάτος τους [5]. Έτσι σχηματίζονται συγκεκριμένες χωρικές συχνότητες μεταξύ 0.6 Lpmm και 5.0 Lpmm. Τα δοκίμια απεικονίστηκαν με εκτέλεση ραδιογραφίας και στη συνέχεια έγιναν μετρήσεις πάνω στο φιλμ προκειμένου να προσδιορισθεί σε κάθε περίπτωση η οπτική πυκνότητα, η οποία μετατράπηκε στη συνέχεια σε μονάδες έκθεσης. Προκειμένου να μειωθούν οι τυχαίες διακυμάνσεις λόγω θορύβου έγιναν αρκετές

μετρήσεις και υπολογισμός των μέσων τιμών. Στη συνέχεια, υπολογίσθηκε η διαμόρφωση για κάθε ένα από τα σήματα εξόδου από τη γνωστή πλέον σχέση:

$$M(f) = \frac{\psi_0}{\psi_{av}} = \frac{\psi_{max} - \psi_{min}}{\psi_{max} + \psi_{min}}$$

Για παράδειγμα, η διαμόρφωση για 1.0 Lp/mm μπορεί να ληφθεί από το σχήμα 3.30 υπολογίζοντας το Ψ_{max} και Ψ_{min} . Τελικά προκύπτει $MT = 0.70$



Σχήμα 3.30-Παράδειγμα υπολογισμού της MTF [5]

Για τη χωρική συχνότητα 0.6 Lp/mm, $\Psi_{min} = 0$ συνεπώς $MT = 1.0$. Το γεγονός ότι η Ψ_{min} είναι κοντά στο μηδέν δείχνει ότι τα δοκίμια από μόλυβδο έχουν επαρκές πάχος, ώστε να τα διαπεράσει απευθείας η ακτινοβολία.

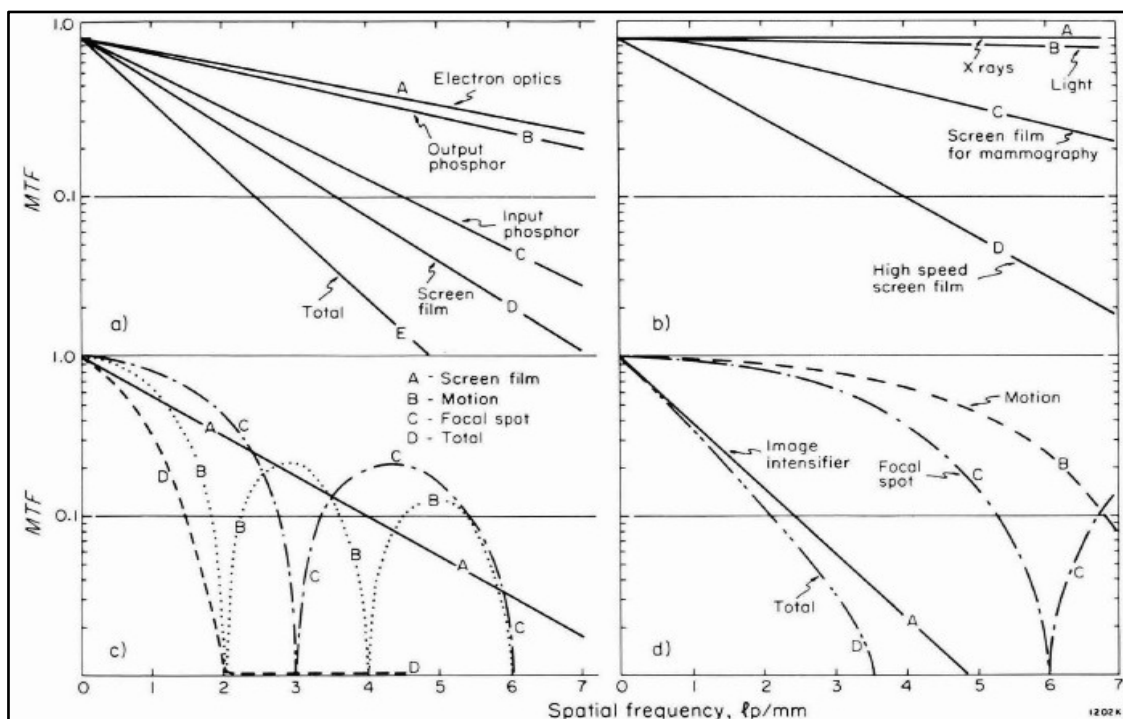
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, καθώς η συχνότητα αυξάνεται η διαμόρφωση μειώνεται ταχέως και φθάνει το μηδέν σε μία συχνότητα περίπου 1.7 Lp/mm. Από εκεί αυξάνει σε ένα και λαμβάνει μέγιστη τιμή για $f = 2.8$ Lp/mm και μειώνεται πάλι στο μηδέν για $f = 4$ Lp/mm. Για τιμές της χωρικής συχνότητας μεγαλύτερες από 4 Lp/mm η διαμόρφωση είναι μηδέν. Η περιοχή μεταξύ $f = 1.7$ Lp/mm και $f = 4$ Lp/mm είναι η περιοχή, όπου η απεικόνιση δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, αφού τα ίχνη δείχνουν δύο κορυφές, ενώ θα έπρεπε να εμφανίζονται τρεις. Οι τιμές της μεταφοράς διαμόρφωσης προσδιορίζονται με αυτόν τον τρόπο και εισάγονται στο σχήμα 3.30. Η κλίμακα συχνότητας είναι η χωρική συχνότητα του δοκιμίου ελέγχου.

3.10 Η συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης για τα συστήματα απεικόνισης

Όπως αναφέρθηκε και στην παρουσίαση του σχήματος 3.28 η απόκριση του κάθε υποσυστήματος σε ένα σύστημα απεικόνισης δίνεται από την κανονικοποιημένη συνάρτηση διαμόρφωσης $(MTF)_N$, ενώ η απόκριση ενός πλήρους συστήματος μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας τις τεταγμένες των κανονικοποιημένων τιμών της MTF για κάθε υποσύστημα. Στις παραγράφους που ακολουθούν εξετάζονται από την άποψη της συνάρτησης MTF οι βασικές συνιστώσες ενός απεικονιστικού συστήματος καθώς και ολοκληρωμένα συστήματα απεικόνισης [5].

3.10.1. Ενισχυτής εικόνας

Η μορφή της συνάρτησης MTF σε ένα ενισχυτή εικόνας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.31a. Οι παράγοντες, οι οποίοι προκαλούν εν δυνάμει μεταβολή της MTF είναι το σύστημα εστίασης των ηλεκτρονίων, καθώς και ο φώσφορος στην είσοδο και στην έξοδο της συνιστώσας.



Σχήμα 3.31-Η μεταβολή της MTF για συνδυασμούς συστημάτων απεικόνισης [5]

Ο φώσφορος στην είσοδο, ο οποίος απορροφά τις ακτίνες-Χ, παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της συνάρτησης του MTF του ενισχυτή, αν και η βελτίωση

της τεχνολογίας συμβάλλει όλο και περισσότερο στον περιορισμό της επίδρασής του. Οι βελτιώσεις που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια στον τομέα αυτό έχουν φέρει τη συνάρτηση MTF του ενισχυτή πιο κοντά στη συνάρτηση MTF του συνδυασμού οθόνης και φιλμ υψηλής ταχύτητας, η οποία παρουσιάζεται ως καμπύλη D στο σχήμα 3.31a. Η προκύπτουσα συνάρτηση MTF του ενισχυτή (καμπύλη E) αν και καθορίζεται κυρίως από την MTF του φωσφόρου στην είσοδο, επηρεάζεται επίσης σημαντικά από τις συνδυασμένες MTF λόγω της εστίασης ηλεκτρονίων και του φωσφόρου εξόδου.

3.10.2. Οθόνες και φιλμ

Η συνάρτηση MTF για φιλμ και συνδυασμούς οθόνης και φιλμ απεικονίζεται στο σχήμα 3.31b. Όταν οι «μαλακές» ακτίνες-X απορροφώνται σε ένα φιλμ, δεν υπάρχει σημαντική απώλεια της πληροφορίας, έτσι ώστε η τιμή του MTF να παραμένει κοντά στο 1.0 ακόμη και σε υψηλές συχνότητες. Το γεγονός αυτό έχει αξιοποιηθεί σε φιλμ που χρησιμοποιούνται για μαστογραφία. Αντιθέτως, όταν το φιλμ εκτίθεται στο φως, η σκέδαση που δημιουργείται οδηγεί σε μείωση του MTF, η τιμή του οποίου καθορίζεται τελικά από το πάχος του βρωμιούχου αργύρου και από το πάχος της βάσης του φιλμ.

Η Καμπύλη C δείχνει τη συνάρτηση MTF για ένα συνδυασμό οθόνης-φιλμ για μαστογραφία. Η ενιαία οθόνη τοποθετείται πίσω από την φιλμ έτσι ώστε οι ακτίνες-X περνούν πρώτα μέσα από το φιλμ. Οι ακτίνες-X απορροφούνται από την επιφάνεια της οθόνης, η οποία είναι πλησιέστερα προς το φιλμ, μειώνοντας έτσι τη διάδοση του φωτός που φθάνει στο φιλμ. Αυτό μεγιστοποιεί την τιμή της MTF του συνδυασμού της οθόνης φιλμ.

Η Καμπύλη D δείχνει τις τιμές του MTF για συνδυασμό οθόνης φιλμ με τυπική ταχύτητα που χρησιμοποιείται στις περισσότερες ακτινογραφίες που πραγματοποιούνται σήμερα. Η μείωση της τιμής του MTF οφείλεται στη χρήση των διπλών οθονών, στο πάχος του στρώματος του φωσφόρου, στο ποσοστό του φωτός που ανακλάται στη βάση της οθόνης, και στη διάχυση του φωτός από το ένα στρώμα στο άλλο. Επιπλέον η τιμή της MTF μπορεί να βελτιωθεί με επιλεκτική απορρόφηση της σκεδαζόμενης ορατής ακτινοβολίας, η οποία επιτυγχάνεται με ενσωμάτωση στο φώσφορο κατάλληλης χρωστικής ουσίας. Οι επιμέρους τιμές της MTF για τα υποσυστήματα που συγκροτούν το σύστημα προβολής σπάνια δημοσιεύονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή, δεδομένου ότι η συνδρομή των επιμέρους συστημάτων για να παραχθεί ένα τέτοιο σύστημα με καλή απόδοση και

ταχύτητα αποτελεί εμπορικό μυστικό. Ωστόσο πρέπει να μελετηθούν, εφόσον χρειάζεται μια πλήρης κατανόηση του συστήματος απεικόνισης οθόνης προκειμένου να προταθούν τρόποι για βελτιστοποίησης τους.

3.10.3. Συστήματα απεικόνισης

Όπως έχει αναφερθεί η συνάρτηση MTF ενός πλήρους συστήματος απεικόνισης, περιλαμβάνει όλα τα υποσυστήματα που μπορούν να μεταβάλουν τη τιμή της MTF. Τυπικά, τα πιο σημαντικά στοιχεία είναι το focal spot, η κίνηση του ασθενούς κατά τη διάρκεια της εξέτασης και ο ανιχνευτής εικόνας. Εντούτοις μια πλήρης ανάλυση θα πρέπει να περιλαμβάνει την πιθανή κίνηση της μηχανής των ακτίνων-Χ, την κίνηση του ανιχνευτή εικόνας και τα αποτελέσματα ενός σταθερού ή κινούμενου πλέγματος.

Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η επίδραση του εστιακού σημείου, της κίνησης του ασθενούς, και του ανιχνευτή οθόνης και μάλιστα μόνο για τον άξονα της δέσμης [5]. Η καμπύλη A του σχήματος 3.31c δίνει την τιμή της MTF για ένα τυπικό συνδυασμό οθόνης και φιλμ υψηλής ταχύτητας. Παράλληλα, η καμπύλη B δίνει τη μεταβολή της MTF που προκύπτει από την ασάφεια που προκαλείται όταν ένα αντικείμενο με διακριτή άκρη κινείται με ταχύτητα 1.33 cm/s κατά τη διάρκεια έκθεσης 25 ms σε μεγέθυνση 1.5. Για την έκθεση αυτή η εικόνα του αντικειμένου έχει μετακινηθεί 0.5 mm.

Η Καμπύλη C απεικονίζει την MTF που οφείλεται στο εστιακό σημείο. Η καμπύλη C είναι παρόμοια με τη καμπύλη B, αλλά τα σημεία με μηδενική τιμή κατανέμονται σε μεγαλύτερο πλάτος. Τέλος η καμπύλη D είναι η MTF για το πλήρες σύστημα απεικόνισης ενός σημείου του ασθενούς που εμφανίζεται με τιμή μεγέθυνσης ίση με 1.5, η οποία αποτελεί τυπική τιμή για ακτινογραφία στήθους.

Τέλος στο σχήμα 3.31d παρουσιάζεται ένα παρόμοιο σύνολο των καμπυλών για το ίδιο σημείο του ασθενούς αλλά τώρα χρησιμοποιώντας ένα σύστημα ενίσχυσης εικόνας. Η MTF του ενισχυτή που παρουσιάζεται στην καμπύλη A, δεν είναι τόσο καλή όσο εκείνη που προκύπτει από το συνδυασμό οθόνης και φιλμ. Ωστόσο, επειδή χρησιμοποιείται ενισχυτής υψηλότερης ευαισθησίας η μεταβολή της MTF λόγω της κίνησης, που παρουσιάζεται στην καμπύλη B, είναι βελτιωμένη και η μεταβολή της MTF λόγω του σημείου εστίασης, όπως φαίνεται στην καμπύλη C, είναι σημαντικά βελτιωμένη έναντι εκείνων που αντιστοιχούν σε συνδυασμό οθόνης φιλμ. Συνεπώς, η καμπύλη D παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά για τον ενισχυτή οθόνης σε σχέση με το συνδυασμό οθόνης φιλμ για χωρικές συχνότητες

από 1 έως 3.5 Lrmm, επειδή η κίνηση και το θόλωμα από το εστιακό σημείο μπορούν να ελαχιστοποιηθούν.

Εν κατακλείδι ο βέλτιστος σχεδιασμός του συστήματος απαιτεί τη γνώση των χαρακτηριστικών όλων των στοιχείων που το συγκροτούν.

3.11 Συνοπτική περιγραφή των διαδικασιών που απαιτούνται για τη διασφάλιση ποιότητας κατά την εκτέλεση διαγνωστικής ραδιογραφίας

Η διασφάλιση της ποιότητας στο επίπεδο της διαγνωστικής ακτινολογίας πραγματοποιείται με στόχο την καλύτερη απεικόνιση και ταυτόχρονα την ελαχιστοποίηση της δόσης των ασθενών και του προσωπικού. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά οι παράμετροι που περιλαμβάνονται ως δοκιμές σε τακτικά προγράμματα διασφάλισης ποιότητας [4].

- **Δυναμικό λειτουργίας:** Η τάση λειτουργίας της μηχανής ακτίνων-Χ μπορεί να μετρηθεί με κατάλληλο εξοπλισμό. Η τάση λειτουργίας θα πρέπει να κυμαίνεται σε ένα εύρος λειτουργίας $\pm 5\text{kV}$ γύρω από την ονομαστική τιμή. Εάν η μετρούμενη τάση λειτουργίας είναι περισσότερο από 10 kV, η μονάδα ακτίνων-Χ θα πρέπει να ενταχθεί σε διαδικασία ελέγχου και επισκευής.

- **Ο χρόνος έκθεσης:** Η μέτρηση του χρόνου έκθεσης μπορεί να μετρηθεί όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 3.8.2. Είναι προφανές πως τα όρια έκθεσης πρέπει να τηρούνται με στόχο την ελαχιστοποίηση της δόσης του ασθενούς.

- **Το μέγεθος του εστιακού σημείου:** Η αξιολόγηση του μεγέθους του εστιακού σημείου αναλύθηκε εκτενώς στην παράγραφο 3.8.2.4. Τα test objects παρέχουν μεγαλύτερες δυνατότητες αξιολόγησης για τους συνήθεις ελέγχους διασφάλισης της ποιότητας, ωστόσο με τη μέθοδο της λήψης εικόνας μέσω μίας μικρής σπής υπάρχει η επιπλέον δυνατότητα διαπίστωσης της ορθής λειτουργίας της μηχανής. Οι μετρήσεις θα πρέπει να είναι στην περιοχή $\pm 50\%$ της ονομαστικής τιμής, εάν η ονομαστική αξία είναι μικρότερη ή ίση έως 1 mm^2 και στην περιοχή $\pm 30\text{-}40\%$, εάν η ονομαστική τιμή είναι μεγαλύτερη από 1 mm^2 .

- **Μέτρηση του Half Value Layer:** Η μέτρηση του HVL πραγματοποιείται με την τοποθέτηση των φίλτρων αλουμινίου κατά τον άξονα της δέσμης των ακτίνων Χ. Το HVL είναι πάχος φίλτρων που πρέπει να τοποθετηθεί στην έξοδο της μηχανής, ώστε η εκπεμπόμενη ακτινοβολία να αποκτήσει το 50% της αρχικής έντασης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ισοδύναμης ενέργειας της δέσμης ή για να βρεθεί το συνολικό πάχος των φίλτρων που εφαρμόζονται σε μία δέσμη. Για

τις περισσότερες μονάδες, η συνολική εξασθένηση της δέσμης θα πρέπει να είναι ισοδύναμη με τουλάχιστον 2,5 mm Al.

- Οι ενισχυτές οθόνης: Οι ενισχυτές οθόνης της εικόνας θα πρέπει να ελέγχονται ως προς την ανάλυση, την αντίθεση και την ασάφεια τους.

4ο Κεφάλαιο : Ο κώδικας προσομοίωσης Monte-Carlo PENELOPE

4.1 Εισαγωγή

Στο 4^ο Κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη παρουσίαση της δομής και του τρόπου λειτουργίας του κώδικα PENELOPE. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη αναφορά στην προσομοίωση με τη μέθοδο Monte-Carlo, ενώ στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας και το λογικό διάγραμμα ενός τυπικού κυρίως προγράμματος (main program ή user code). Για λόγους πληρότητας θα γίνει αναφορά και στα τρία πρότυπα προγράμματα που περιλαμβάνονται στον κώδικα PENELOPE (Penslab, Pencyl και Penmain). Εν τούτοις, η ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί αφορά μόνο το κυρίως πρόγραμμα Penmain, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Θα παρουσιαστούν τα αρχεία δεδομένων και τα αρχεία αποτελεσμάτων του προγράμματος Penmain, καθώς και τα διάφορα ήδη εικονικών ανιχνευτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση, ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε προβλήματος. Η εν λόγω διαδικασία έχει αναλυθεί διεξοδικά στις Δ.Ε. (Αθανασίου Ν., 2006) και (Χαυλής Σ., 2011), οι οποίες έχουν εκπονηθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. γίνεται ιδιαίτερα αναφορά στα σημεία του προγράμματος που χρειάστηκε να μεταβληθούν στα πλαίσια της Δ.Ε.

4.2 Παρουσίαση του Κώδικα PENELOPE προσομοίωσης με τη μέθοδο Monte Carlo

Η μελέτη των προβλημάτων της μετάδοσης της σωματιδιακής και φωτονιακής ακτινοβολίας βασίστηκε αρχικά στην εξίσωση μετάδοσης του Boltzmann [10]. Η μέθοδος αυτή παρουσίαζε ορισμένες δυσκολίες στις γεωμετρίες με πολύπλοκα και πεπερασμένα όρια. Στα τέλη της δεκαετίας του 1950, με την εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών αναπτύχθηκε μια νέα βελτιωμένη μέθοδος, η προσομοίωση με τη μέθοδο Monte Carlo.

Η ονομασία «Monte Carlo» επινοήθηκε τη δεκαετία του 1940 από τους επιστήμονες που εργάζονταν στο πυρηνικό πρόγραμμα του Los Alamos για να υποδείξει μια κατηγορία αριθμητικών μεθόδων βασισμένων στη χρήση των τυχαίων αριθμών. Έτσι, η ονομασία «Monte Carlo» προήλθε από την πόλη του Μονακό εξαιτίας των καζίνο που διαθέτει.

Σήμερα, η μέθοδος Monte Carlo χρησιμοποιείται ευρέως για να λύσει σύνθετα φυσικά και μαθηματικά προβλήματα (James F., 1980), (R.Y. Rubinstein, 1981), (Kalos M.H. and P.A. Whitlock, 1986), ιδιαίτερα εκείνα που περιλαμβάνουν πολλαπλές ανεξάρτητες μεταβλητές, όπου οι συμβατικές αριθμητικές μέθοδοι θα απαιτούσαν τεράστια ποσά μνήμης και υπολογιστικούς χρόνους [7]. Επειδή η δημιουργία και η εξέλιξη μιας ιστορίας ενός φωτονίου ή ενός σωματιδίου είναι τυχαίας φύσεως, η μέθοδος Monte Carlo είναι ιδιαίτερα επιτυχής για αυτή την περίπτωση.

Η διαδικασία που ακολουθείται στη μέθοδο Monte Carlo είναι η εξής:

- Σε πρώτη φάση επιλέγεται με τυχαίο τρόπο (μέσω γεννητριών τυχαίων αριθμών) μια τιμή ενός μεγέθους που ενδιαφέρει για την διαδικασία της προσομοίωσης.
- Σε δεύτερη φάση, κατόπιν μίας αλληλουχίας υπολογισμών προκύπτει το τελικό ζητούμενο μέγεθος, το οποίο και καταγράφεται. Αν αυτό επαναληφθεί πολλές φορές, το μέσο αποτέλεσμα προσεγγίζει την πραγματική τιμή της ποσότητας που ενδιαφέρει.

Στην προσομοίωση της μετάδοσης της ακτινοβολίας με τη μέθοδο Monte Carlo, η ιστορία ενός σωματιδίου (ή φωτονίου) αντιμετωπίζεται ως μια τυχαία ακολουθία από ελεύθερες διαδρομές του, όπου κάθε μία ολοκληρώνεται με μια αλληλεπίδραση του σωματιδίου, κατά την οποία το σωματίδιο αλλάζει την κατεύθυνση μετακίνησής του, χάνει ένα μέρος της ενέργειάς του και σε ορισμένες περιπτώσεις παράγει δευτερογενή σωματίδια [7]. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι το σωματίδιο να χάσει όλη την ενέργειά του και απορροφηθεί, ή μέχρι αυτό να εξέλθει των ορίων του συστήματος. Με το πέρας της ιστορίας καταγράφονται τα διάφορα φυσικά μεγέθη που αφορούν τη διάδοση του σωματιδίου (π.χ. ενέργεια που απέθεσε σε συγκεκριμένη θέση στο χώρο, γωνία εισόδου ή εξόδου από ορισμένη επιφάνεια κ.ο.κ).

Ένας αλγόριθμος Monte-Carlo αποτελείται από τέσσερα κύρια στοιχεία:

- τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών.
- τους κανόνες δειγματοληψίας.
- τη συνάρτηση κατανομής της πιθανότητας (probability distribution function-PDF) του μεγέθους που πρόκειται να εκτιμηθεί.

-
- τη μεθοδολογία εκτίμησης του σφάλματος του αποτελέσματος.

Η διαδικασία προσομοίωσης μίας ιστορίας ενός σωματιδίου στηρίζεται πάνω σε διάφορα μοντέλα αλληλεπίδρασης του σωματιδίου με την ύλη, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους φυσικούς νόμους και μηχανισμούς που διέπουν μια αλληλεπίδραση. Υπό την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των παραγόμενων ιστοριών είναι αρκετά μεγάλος, οι μέσες τιμές των φυσικών μεγεθών που καταγράφονται με την ολοκλήρωση κάθε ιστορίας προσεγγίζουν τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές με ικανοποιητική ακρίβεια.

Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί διάφοροι κώδικες προσομοίωσης της διάδοσης των ηλεκτρονίων φωτονίων ή και άλλων σωματιδίων όπως νετρόνια, οι οποίοι βασίζονται στη μέθοδο Monte Carlo. Μερικοί από αυτούς τους κώδικες είναι: ETRAN (Berger M.J. & Seltzer S.M., 1988), ITS3 (Halbleib J.A. et al., 1992), EGS4 (Nelson W.R. et al., 1985), EGSnrc (Kawrakow I. & Rogers D.W.O., 2000), GEANT3 (Brun R. et al., 1986) και MCNP4B (Briesmeister J.F., 1997) [7]. Ένας αντίστοιχος κώδικας είναι και ο PENELOPE, ο οποίος αναπτύχθηκε από τους F. Salvat, Fernandez-Varea και J. Sempau, στο Πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης, για πρώτη φορά το 1996. Για τις προσομοιώσεις που έγιναν στα πλαίσια της Δ.Ε. χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 2011 [10] του κώδικα, η οποία περιλαμβάνει αρκετές βελτιώσεις από τις προηγούμενες εκδόσεις του 1996, 2000, 2001 και 2003.

Ο κώδικας PENELOPE πήρε αυτή την ονομασία από τα αρχικά των λέξεων **PEN**etration and **E**nergy **L**oss of **P**ositrons and **E**lectrons (η προσομοίωση των φωτονίων προστέθηκε αργότερα και γι' αυτό δεν αναφέρεται στην ονομασία του κώδικα) [10]. Ο κώδικας αυτός μπορεί να προσομοιώνει τη διάδοση των ηλεκτρονίων, των φωτονίων και των ποζιτρονίων μέσα από σύνθετες κατασκευές αποτελούμενες από διάφορα υλικά. Ο αλγόριθμος της προσομοίωσης βασίζεται στο μοντέλο του διασκορπισμού (scattering model), το οποίο συνδυάζει αριθμητικές βάσεις δεδομένων μαζί με αναλυτικά μοντέλα της ενεργού διατομής, για διάφορους μηχανισμούς αλληλεπιδράσεων και εφαρμόζεται για ενεργειακό φάσμα από μερικά eV μέχρι 1GeV.

Η εξέλιξη των προσομοιώσεων βασίζεται στα εξής είδη αλληλεπιδράσεων, τα οποία έχουν αναλυθεί διεξοδικά στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας Δ.Ε.:

-
- Σκέδαση Compton
 - Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο
 - Δίδυμη Γένεση
 - Μη Ελαστική Σκέδαση

Ο κώδικας PENELOPE αποτελείται κυρίως από ένα σύνολο υπορουτίνων. Για τον πλήρη έλεγχο της προσομοίωσης και για την πλήρη πρόσβαση σε όλες τις πληροφορίες και βάσεις δεδομένων, ο χρήστης πρέπει να γράψει το δικό του κυρίως πρόγραμμα. Το κυρίως πρόγραμμα θα πρέπει να ελέγχει την εξέλιξη της τροχιάς (track) του κάθε σωματιδίου κατά την προσομοίωση και να καταχωρεί τις ποσότητες που ενδιαφέρουν το χρήστη. Παρόλα αυτά, για τη διευκόλυνση του χρήστη, στο πακέτο του κώδικα PENELOPE περιλαμβάνονται και τρία έτοιμα κυρίως προγράμματα με τις ονομασίες Penslab, Pencyl και Penmain, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται ως (main program ή user code) [7]. Ο κώδικας Penslab προσομοιώνει την διάδοση των ηλεκτρονίων/φωτονίων μέσα από μια επίπεδη πλάκα από καθορισμένο υλικό και για δεδομένη ενέργεια σωματιδίων. Ο κώδικας Pencyl προσομοιώνει τη διάδοση των ηλεκτρονίων/φωτονίων μέσα από σύνθετες κυλινδρικές κατασκευές. Ο κώδικας Penmain είναι γενικής μορφής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση μιας μεγάλης ποικιλίας πρακτικών προβλημάτων. Στην παρούσα Δ.Ε. χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας χρήστη Penmain και αξιοποιήθηκαν τα αρχεία αποτελεσμάτων, τα οποία αυτός παράγει.

4.3 Δομή του κώδικα PENELOPE

Το πακέτο του κώδικα PENELOPE περιέχει πέντε (5) υποκαταλόγους (directories), όπου κάθε υποκατάλογος περιέχει μια σειρά από αρχεία ή και άλλους υποκαταλόγους. Η δομή του προγράμματος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1, το οποίο βρίσκεται στο τέλος του κεφαλαίου. Συνοπτικά, στο πακέτο του κώδικα περιλαμβάνονται τα εξής [11]:

- **/doc/**: Ο υποκατάλογος αυτός περιέχει τρία αρχεία, τα οποία είναι τα βοηθητικά έγγραφα που αφορούν το σύστημα του κώδικα. Τα αρχεία αυτά είναι:

1. tutorial.pdf: Το κείμενο που περιέχεται στο αρχείο αυτό, είναι εκπαιδευτικού χαρακτήρα και περιλαμβάνει οδηγίες και παραδείγματα

με στόχο την εξοικείωση του χρήστη με το πρόγραμμα και τη διαδικασία εκτέλεσής του.

2. PENELOPE-2011-NEA.pdf: Το κείμενο που περιέχεται στο αρχείο αυτό, αποτελεί το επίσημο εγχειρίδιο του κώδικα PENELOPE, το οποίο περιλαμβάνεται στην έκδοση του 2011. Το εγχειρίδιο έχει τον ακόλουθο τίτλο: «PENELOPE, a code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport».
3. Metrologia-2009.pdf: Το κείμενο που περιέχεται στο αρχείο αυτό αφορά δημοσίευση με τίτλο: «Overview of physical interaction models for photon and electron transport used in Monte Carlo codes» των Francesc Salvat and Jose M Fernandez-Varea στο επιστημονικό περιοδικό Metrologia (46 (2009) S112–S138), που δημοσιεύτηκε στις 12/09/2008

▪ **/fsource/** :Ο υποκατάλογος αυτός περιέχει πέντε αρχεία της Fortran 77 τα οποία αποτελούν το κυρίως μέρος του κώδικα PENELOPE. Τα αρχεία αυτά είναι:

1. Penelope.f: Περιέχει τις υπορουτίνες που σχετίζονται με τη φυσική της προσομοίωσης που πραγματοποιεί ο κώδικας και με τη διάδοση των σωματιδίων.
2. rengeom.f: Περιέχει τις υπορουτίνες που αναφέρονται στην κατασκευή σύνθετων γεωμετριών με τη χρήση διαφόρων επιφανειών, γνωστή και ως τετραγωνική γεωμετρία (quadricgeometry).
3. renvared.f: Περιέχει μία σειρά από υπορουτίνες που μπορούν να κληθούν από τον κώδικα για τη βελτίωση της στατιστικής κατά την προσομοίωση (variancereduction).
4. material.f: Πρόκειται για βοηθητικό πρόγραμμα, με το οποίο παράγονται αρχεία δεδομένων που αναφέρονται στις ιδιότητες των υλικών και τα οποία είναι απαραίτητα για την εκτέλεση της προσομοίωσης.
5. timer.f: Περιέχει τις υπορουτίνες που σχετίζονται με την καταγραφή του χρόνου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
6. rita.f: Περιέχει σύνολο υπορουτίνων για την τυχαία δειγματοληψία σε συνεχείς και ασυνεχείς κατανομές.

-
- **/pendbase/**: Ο υποκατάλογος αυτός περιέχει αρχεία σε διάφορες μορφές, τα οποία είναι απαραίτητα για τη δημιουργία των αρχείων που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες των υλικών.
 - **/mains/**: Ο υποκατάλογος αυτός περιέχει τρεις (3) υποκαταλόγους (Penslab, Pencyl και Penmain). Κάθε υποκατάλογος περιέχει ένα παράδειγμα κυρίως κώδικα (maincode) για την επίλυση ενός συγκεκριμένου φυσικού προβλήματος, μαζί με όλα τα απαραίτητα αρχεία για την προσομοίωση. Στον κάθε υποκατάλογο περιλαμβάνονται έτοιμα τα αρχεία εισόδου του προγράμματος γραφικής απεικόνισης Gnuplot, με τα οποία εμφανίζονται γραφικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν για κάθε ένα φυσικό πρόβλημα.
 - **/other/**: Ο υποκατάλογος αυτός περιέχει τέσσερις (4) υποκαταλόγους (emfields, gview, shower και tables). Πρόκειται για υποκαταλόγους, οι οποίοι περιέχουν βοηθητικά προγράμματα, τα οποία είναι χρήσιμα για την εφαρμογή του κώδικα PENELOPE. Τα προγράμματα αυτά είναι :
 1. **gview** (gview2d και gview3d), τα οποία διαβάζουν την τετραγωνική γεωμετρία και εμφανίζουν τη γεωμετρία της κατασκευής σε δισδιάστατη (2D) και σε τρισδιάστατη μορφή (3D) αντίστοιχα
 2. **shower**, το οποίο προσομοιώνει την κίνηση σωματιδίων μέσα σε μια πλάκα με επιλεγμένο υλικό ενώ ταυτόχρονα εμφανίζει στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή, σχηματικά την κίνηση των σωματιδίων μέσα στην πλάκα
 3. **tables**, το οποίο υπολογίζει και καταγράφει σε αρχεία, πίνακες που αναφέρονται στις διάφορες ιδιότητες των υλικών.
 4. **Emfields**, το οποίο περιλαμβάνει υπορουτίνες χρήσιμες για την προσομοίωση της κίνησης φορτισμένων σωματιδίων μέσα από ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

4.4 Ο κώδικας χρήστη Penmain

Ο κώδικας Penmain είναι γενικής χρήσης, αφού προσομοιώνει τη διάδοση των ηλεκτρονίων/φωτονίων μέσα από σύνθετες κατασκευές [10]. Η γεωμετρία της κατασκευής περιγράφεται σε κατάλληλο αρχείο εισόδου (αρχείο τύπου .geo), το οποίο διαβάζει ο Penmain μέσω της υπορουτίνας Pengeom. Μέσω κατάλληλου

αρχείου εισόδου (αρχείο τύπου .in), ο χρήστης εισάγει στον κώδικα τις διάφορες παραμέτρους, με τις οποίες επιθυμεί να γίνει η προσομοίωση.

Στην περίπτωση του κώδικα Penmain η πηγή που εκπέμπει τα πρωτογενή σωματίδια, μπορεί να είναι σημειακή, επιφανειακή ή τρισδιάστατη, με καθορισμένη ενέργεια ή με καθορισμένο φάσμα ενεργειών. Η αρχική κατεύθυνση των πρωτογενών σωματιδίων περιορίζεται στο εσωτερικό ενός κώνου με καθορισμένη από το χρήστη ημιγωνία ανοίγματος και με κεντρικούς άξονες με καθορισμένη διεύθυνση. Με τη χρήση του κώδικα αυτού παρέχονται πληροφορίες που αφορούν τη διάδοση των σωματιδίων μέσα από τα διάφορα υλικά σώματα που συγκροτούν τη γεωμετρία του προβλήματος.

Παράλληλα πληροφορίες όπως η κατανομή της ενέργειας και της γωνίας εξόδου των εκπεμπόμενων σωματιδίων, η κατανομή της δόσης του αποτιθέμενου φορτίου και η κατανομή της αποτιθέμενης ενέργειας στα διάφορα υλικά καταγράφονται σε μία σειρά από αρχεία εξόδου του προγράμματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση εικονικών ανιχνευτών, όπως ανιχνευτές αλληλεπίδρασης ή/και ανιχνευτές εναποτιθέμενης ενέργειας [10]. Ένας ανιχνευτής αλληλεπίδρασης αποτελείται από μια ομάδα υλικών σωμάτων, τα οποία έχουν ήδη οριστεί από το χρήστη για την υπ' όψιν γεωμετρία. Ο κάθε ανιχνευτής αλληλεπίδρασης εμφανίζει με το πέρας της προσομοίωσης ένα φάσμα, το οποίο αναφέρεται στην κατανομή της ενέργειας των σωματιδίων που εισήλθαν στον ανιχνευτή. Ένας ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας επίσης αποτελείται από μια ομάδα υλικών σωμάτων, τα οποία έχουν ήδη οριστεί από το χρήστη. Στην περίπτωση αυτών των ανιχνευτών καταγράφεται η κατανομή της ενέργειας που απορροφήθηκε από τον ανιχνευτή στα αντίστοιχα αρχεία εξόδου. Πέραν των ανιχνευτών, ο χρήστης μπορεί να ορίσει έναν ανιχνευτή δόσης, ο οποίος στην πραγματικότητα δεν είναι τίποτε άλλο από ένα τρισδιάστατο καρτεσιανό πλέγμα, στο εσωτερικό του οποίου θα καταγραφεί η κατανομή της δόσης σε κάθε θέση (dose enclosure). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσδιορισθεί η δοσιμετρική κατανομή μίας ακτινοβολίας μέσα σε ένα σώμα ή σε μία περιοχή.

Ο κώδικας επιτρέπει στον χρήστη να σταματήσει τη διαδικασία της προσομοίωσης οποιαδήποτε στιγμή και να την επανεκκινήσει από το σημείο που έχει σταματήσει. Επίσης, ο κώδικας παρέχει τη δυνατότητα να καταγραφεί τα αποτελέσματα στα αρχεία εξόδου σε καθορισμένες χρονικές περιόδους. Αυτό είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις που η προσομοίωση διαρκεί μεγάλο χρονικό διάστημα και για βελτίωση της στατιστικής των αποτελεσμάτων.

Ο κώδικας Penmain μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές, αφού ουσιαστικά δεν υπάρχει περιορισμός στη γεωμετρία της κατασκευής (σε αντίθεση με τους κώδικες Penslab και Pencyl).

4.5 Αρχεία εισόδου δεδομένων του κώδικα Penmain

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνεται η περιγραφή των αρχείων δεδομένων, τα οποία είναι απαραίτητα για την εκτέλεση του κώδικα. Τρία είδη αρχείων απαιτούνται εν γένει για μία προσομοίωση [6]:

- Το αρχείο εισόδου δεδομένων τύπου *.in που περιγράφει τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης (είδος σωματιδίων, ενέργεια, πλήθος ιστοριών που προσομοιώνονται κλπ). Το αρχείο αυτό κατασκευάζεται από το χρήστη σε ASCII μορφή. Το αρχείο αυτό είναι απαραίτητο για μία προσομοίωση. Στην περίπτωση που η γεωμετρία, για την οποία γίνεται η προσομοίωση είναι απλή, σε αυτό το αρχείο μπορεί να γίνεται και η περιγραφή της γεωμετρίας.
- Το αρχείο εισόδου γεωμετρίας τύπου *.geo που περιγράφει τη γεωμετρία του προβλήματος που επιλύεται με την προσομοίωση (κυλινδρικός ανιχνευτής με θωράκιση, επάλληλες πλάκες κλπ). Το αρχείο αυτό κατασκευάζεται από το χρήστη σε ASCII μορφή. Είναι δυνατόν μία προσομοίωση να γίνει και χωρίς το αρχείο αυτό, αν και η χρήση του διευκολύνει ιδιαίτερα την ορθή προσομοίωση.
- Το αρχείο εισόδου υλικού τύπου .mat περιέχει φυσικές σταθερές και παραμέτρους (μικροσκοπικές ενεργές διατομές κλπ) των υλικών, τα οποία εμπλέκονται στο πρόβλημα. Το αρχείο αυτό κατασκευάζεται από το ειδικό πρόγραμμα Material ανεξάρτητα και πριν από την προσομοίωση. Το αρχείο είναι απαραίτητο για μία προσομοίωση.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η δομή των αρχείων τύπου *.in και *.geo που απαιτούνται για την εκτέλεση του κώδικα Penmain. Αυτό κρίθηκε απαραίτητο προκειμένου να δοθεί όλη η ποικιλία παραμέτρων και των δυνατών τιμών που μπορούν να πάρουν αυτές για κάθε μία περίπτωση προσομοίωσης. Επισημάνεται ότι τα αρχεία δεδομένων πρέπει να έχουν συγκεκριμένη δομή και διάρθρωση, προκειμένου να μπορεί να διαβαστεί σωστά από το κυρίως πρόγραμμα. Σε άλλη περίπτωση ο κώδικας θα εντοπίσει σφάλμα και δεν θα εκτελεστεί η προσομοίωση.

4.5.1 Το αρχείο εισόδου δεδομένων τύπου *.in του κώδικα Penmain

Στο αρχείο εισόδου δεδομένων, το οποίο πρέπει να έχει την τυπική ονομασία *.in, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης, δίνονται πληροφορίες για το είδος και την ενέργεια της ακτινοβολίας, ενώ ταυτόχρονα περιέχονται πληροφορίες για τα αρχεία που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα υλικά της διάταξης καθώς και τους ανιχνευτές που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν [6]. Κάθε γραμμή του αρχείου εισόδου δεδομένων πρέπει να περιέχει μια δεσμευτική λέξη 6 χαρακτήρων (περιλαμβανομένων και των κενών χαρακτήρων), η οποία ακολουθείται είτε από αριθμητικά δεδομένα (σε ελεύθερη διαμόρφωση) είτε από αλφαβητική σειρά χαρακτήρων, τα οποία πρέπει να αρχίζουν από την 8η στήλη. Οι δεσμευτικές λέξεις χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από το πρόγραμμα και γι' αυτό το λόγο πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στη χρήση τους καθώς ελλοχεύει ο κίνδυνος να μην εκκινήσει ο κώδικας και η διεξαγωγή των προσομοιώσεων.

Το πρότυπο αρχείο εισόδου δεδομένων *.in έχει την μορφή που απεικονίζεται στο παράρτημα ΣΤ τέλος της εργασίας. Επίσης στο ίδιο παράρτημα πραγματοποιείται η αναλυτική επεξήγηση των διάφορων παραμέτρων του αρχείου εισόδου.

4.5.2 Το αρχείο δεδομένων γεωμετρίας τύπου .geo του κώδικα Penmain

Η γεωμετρία της κατασκευής όπου θα αλληλεπιδράσουν τα σωματίδια καθορίζεται από ένα κατάλληλα διαμορφωμένο αρχείο εισόδου τύπου .geo. Το αρχείο κατασκευάζεται από το χρήστη σε μορφή ASCII και έχει μία σειρά από πλεονεκτήματα, σημαντικότερα των οποίων είναι [6]:

- Επιτρέπει την προσομοίωση διαφορετικών παρόμοιων γεωμετριών (π.χ. ανιχνευτές διαφορετικών διαστάσεων) με το ίδιο βασικό πρόγραμμα και ίδιο αρχείο εισόδου τύπου .in. Αρκεί μόνο η αλλαγή του ονόματος του αρχείου δεδομένων γεωμετρίας μέσα στο αρχείο .in.
- Επιτρέπει στο χρήστη να έχει πολύ καλύτερη εποπτεία της γεωμετρίας την οποία περιγράφει στο αρχείο εισόδου γεωμετρίας.

Το αρχείο εισόδου γεωμετρίας .geo αποτελείται από παραγράφους, οι οποίες αναφέρονται στα διάφορα στοιχεία της κατασκευής που είναι οι επιφάνειες, τα σώματα (bodies) και μεγαλύτερες ενότητες (modules). Υπάρχουν δύο δυνατότητες

για την περιγραφή της γεωμετρίας επιφανειών, υπό αναλυτική μορφή και υπό συμπυκνωμένη (reduced) μορφή. Επίσης, είναι δυνατή η περιστροφή αντικειμένων της γεωμετρίας, ως προς τις τρεις γωνίες του ορθοκανονικού συστήματος.

Κάθε παράγραφος του αρχείου γεωμετρίας περιέχει μια σειρά από αυστηρά τυποποιημένες γραμμές (απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στους κενούς χαρακτήρες), ενώ πριν και μετά από κάθε παράγραφο επιβάλλεται η ύπαρξη μιας γραμμής συμπληρωμένης από μηδενικά (0), με την οποία διαχωρίζονται οι παράγραφοι μεταξύ τους. Μπορούν να τοποθετηθούν γραμμές με σχόλια σε οποιοδήποτε σημείου του αρχείου, οι οποίες πρέπει να αρχίζουν με το χαρακτήρα «C» ή «c» και δε λαμβάνονται υπόψη από το πρόγραμμα.

Οι αριθμητικές ποσότητες θα πρέπει να έχουν συγκεκριμένη διαμόρφωση (format) και να βρίσκονται μέσα σε παρενθέσεις. Οι αποστάσεις πρέπει να είναι σε cm ενώ οι γωνίες μπορούν να είναι σε μοίρες ή σε rad. Στο σχήμα 4.2 στο τέλος του κεφαλαίου δίνεται ένα τυπικό αρχείο γεωμετρίας.geo.

4.6 Ο ορισμός εικονικών ανιχνευτών κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης

Όπως έχει αναφερθεί, υπάρχει δυνατότητα να οριστούν εικονικοί ανιχνευτές κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων, ώστε να γίνεται καταγραφή των απαραίτητων για την επίλυση του προβλήματος πληροφοριών. Ουσιαστικά, ένας εικονικός ανιχνευτής είναι μια σειρά εντολών μέσα στον κώδικα Penmain, με τις οποίες καταγράφονται ορισμένοι παράμετροι όταν ένα σωματίδιο εισέλθει σε ένα σώμα, το οποίο έχει καθοριστεί από το χρήστη στο αρχείο εισόδου τύπου .in, ως ανιχνευτής ή τμήμα ενός ανιχνευτή. Ο κώδικας PENELOPE περιλαμβάνει τρία ήδη εικονικών ανιχνευτών, τους ανιχνευτές αλληλεπίδρασης (impact detectors), τους ανιχνευτές εναποτιθέμενης ενέργειας (energy-deposition detectors) και τους ανιχνευτές δόσης (dose enclosure). Στα πλαίσια της ανάπτυξης της παρούσης Δ.Ε. έγινε χρήση και επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται από τον ανιχνευτή δόσης [7].

4.6.1 Ανιχνευτής Αλληλεπίδρασης (Impact Detector)

Ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης είναι ένας ανιχνευτής ο οποίος καταγράφει την ενέργεια των σωματιδίων που εισέρχονται μέσα σε αυτόν. Ως ανιχνευτής αλληλεπίδρασης θεωρείται ένα σώμα ή μια ομάδα σωμάτων, τα οποία έχουν οριστεί από το χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου (τύπου .in). Τα σώματα αυτά αποτελούν

τμήμα της κατασκευής και πρέπει να περιλαμβάνονται μέσα στο αρχείο που περιγράφει την γεωμετρία της κατασκευής (τύπου .geo). Όταν ένα σωματίδιο εισέλθει μέσα στον ανιχνευτή τότε καταγράφεται η ενέργεια E που είχε κατά την είσοδό του στον ανιχνευτή.

4.6.2 Ανιχνευτής Αποτιθέμενης Ενέργειας (Energy Deposition Detector)

Ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας είναι ένας ανιχνευτής, ο οποίος καταγράφει την ενέργεια των σωματιδίων που αποτίθεται σε αυτόν. Ως ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας θεωρείται ένα σώμα ή μια ομάδα σωμάτων, τα οποία έχουν οριστεί από το χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου (τύπου .in). Τα σώματα αυτά αποτελούν τμήμα της κατασκευής και πρέπει να περιλαμβάνονται μέσα στο αρχείο που περιγράφει την γεωμετρία της κατασκευής (τύπου .geo). Όταν ένα σωματίδιο εισέλθει μέσα στον ανιχνευτή τότε καταγράφεται η ενέργεια του σωματιδίου που εναποτίθεται μέσα σε αυτόν.

4.6.3 Ανιχνευτής Δόσης (Dose Enclosure)

Ο ανιχνευτής δόσης είναι ένας ανιχνευτής ο οποίος καταγράφει την κατανομή της δόσης σε ένα τμήμα της κατασκευής. Ως ανιχνευτής δόσης θεωρείται ένα τρισδιάστατο ορθογώνιο πλέγμα, το οποίο έχει καθοριστεί από το χρήστη μέσω του αρχείου εισόδου (τύπου .in). Όταν ένα σωματίδιο βρεθεί μέσα στο χώρο που ορίστηκε ως ανιχνευτής, καταγράφεται η δόση που αποτίθεται λόγω αλληλεπίδρασης σε κάθε θέση του πλέγματος. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης έχει καταγραφεί η κατανομή της δόσης μέσα στον ανιχνευτή.

4.7 Διαδικασία εκτέλεσης του κώδικα Penmain

Στην παράγραφο αυτή καταγράφονται τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης, ώστε να μπορέσει να εκτελέσει τον κώδικα Penmain και να εκκινήσει η διαδικασία των προσομοιώσεων. Τα βήματα αναλύονται στο αρχείο tutorial.pdf που βρίσκεται στην ακόλουθη διαδρομή του φακέλου [11]:

./doc/

Για τη δημιουργία των εκτελέσιμων αρχείων των προγραμμάτων προσομοίωσης θα χρειασθεί ένας Fortran compiler. Ο compiler βρέθηκε στη διεύθυνση:

<http://mingw-w64.sourceforge.net>

Επιπλέον θα πρέπει να εγκατασταθεί και ένα πρόγραμμα που επιτρέπει τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί είναι το Gnuplot, το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ακόλουθη διεύθυνση:

<http://mingw-w64.sourceforge.net>

Για λόγους ορθολογικής διαχείρισης των προγραμμάτων και των αρχείων που απαιτούνται για τη χρήση του κώδικα δημιουργείται φάκελος εργασίας:

./work/compile

μέσα στον οποίο αποθηκεύονται όλα τα περιεχόμενα του φακέλου:

./PENELOPE/source

Στο φάκελο work αποθηκεύονται όλα τα αρχεία που θα δημιουργούνται για την εκτέλεση του κώδικα, καθώς και αυτά που παράγονται κατά την εκτέλεση του κώδικα Penmain. Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι όλες οι εντολές δίνονται σε παράθυρο εντολών των Windows (command prompt).

4.7.1 Δημιουργία του αρχείου υλικών

Η δημιουργία του αρχείου υλικού του προβλήματος γίνεται από το αρχείο material.exe, το οποίο παράγεται με την παρακάτω εντολή:

```
>gfortran -Os -Wall material.f -o material.exe
```

Το εκτελέσιμο αρχείο material.exe πρέπει να βρίσκεται στον κατάλογο:

./PENELOPE/pendbase

όπου περιέχονται οι βάσεις δεδομένων των υλικών του κώδικα Penelope, δηλαδή ο φάκελος pfiles. Το πρόγραμμα material.exe εκτελείται απλά με την εντολή:

```
material.exe
```

και παρέχει τη δυνατότητα επιλογής έτοιμων υλικών από μία λίστα υλικών ή τη δημιουργία ενός υλικού με εισαγωγή των συστατικών του από ένα παράθυρο διαλόγου:

Select one option (1 or 2):

1. : Enter composition data from the keyboard

2. : Read them from the file pdcompos.p05fn

Για τη δημιουργία των υλικών που συμμετείχαν στο σύνολο των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια παρούσας Δ.Ε. έγινε η επιλογή για τη δημιουργία έτοιμων υλικών. Στη συνέχεια ζητείται από το χρήστη ο καθορισμός του αύξοντα αριθμού που αντιστοιχεί στο υλικό :

Enter material identification number

Για τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα η αρίθμηση είναι με βάση τον ατομικό αριθμό, ενώ για τις χημικές ενώσεις και τα μίγματα ακολουθείται αλφαβητική σειρά.

4.7.2 Εκτέλεση κώδικα Penmain

Για την εκτέλεση του κώδικα Penmain σε πρώτη φάση μεταφέρεται το αρχείο penmain.f στον κατάλογο:

`./work/compile`

και εκτελείται η παρακάτω εντολή:

`>gfortran -Ospenmain.f -o penmain.exe`

Το εκτελέσιμο αρχείο που προκύπτει είναι το penmain.exe, το οποίο θα πρέπει να εκτελείται κάθε φορά για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων. Ωστόσο για την πραγματοποίηση ορισμένων προσομοιώσεων χρειάστηκαν μικρές τροποποιήσεις στον κώδικα, όπως θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο. Το σύνολο των δεδομένων που εισάγονται για την εκτέλεση του κώδικα Penmain καθώς και το σύνολο των αρχείων που παράγει ο κώδικας κατά την εκτέλεση του τοποθετούνται στον υποκατάλογο με το όνομα examples:

`./work/penmain/examples`

ο οποίος δημιουργείται για το σκοπό αυτό.

4.7.3 Τα αρχεία αποτελεσμάτων κώδικα Penmain

Με την εκτέλεση του κώδικα Penmain παράγονται μια σειρά από αρχεία εξόδου μέσα στα οποία περιέχονται διάφορες πληροφορίες που αφορούν την προσομοίωση και τις κατανομές των σωματιδίων. Τα αρχεία ποικίλουν από προσομοίωση σε προσομοίωση, ανάλογα με τις παραμέτρους που έχει καθορίσει ο χρήστης κάθε φορά. Τα αρχεία εξόδου είναι τύπου *.dat και *.rep και καταγράφονται συνοπτικά παρακάτω [10]:

1. Το αρχείο Penmain.dat, το οποίο περιέχει σημαντικές πληροφορίες που αφορούν την προσομοίωση. Το αρχείο περιλαμβάνει το πρώτο τμήμα με τίτλο «**Program Penmain input data file and runtime messages**» και περιλαμβάνει τις βασικές παραμέτρους της προσομοίωσης, όπως αυτές έχουν καθορισθεί στο αρχείο τύπου .in, και το δεύτερο τμήμα με τίτλο «**Program Penmain Results**», το οποίο επαναλαμβάνεται μέσα στο αρχείο και περιλαμβάνει τις τρέχουσες τιμές των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης κάθε φορά που αυτά καταχωρούνταν μέσα στο αρχείο (dump).
2. Το αρχείο Penmain-res.dat, το οποίο παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις πληροφορίες που προκύπτουν από τα σύνολο των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν.
3. Το αρχείο 3d-dose.dat, το οποίο συνδέεται με τον ορισμό του ανιχνευτή αποτιθέμενης δόσης και θα περιγραφεί αναλυτικότερα.
4. Το αρχείο dump.dmp, στο οποίο αποθηκεύονται προσωρινά οι πληροφορίες ανά χρονικό διάστημα που ορίζει ο χρήστης.
5. Το αρχείο geometry.rep, το οποίο δημιουργείται από την υπορουτίνα regeom.f και ορίζει αυστηρά την ίδια γεωμετρία με το αρχείο εισόδου .geo
6. Το αρχείο material.dat, στο οποίο περιλαμβάνονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για το κάθε υλικό που χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση.
7. Το αρχείο depth-dose.dat, στο οποίο περιγράφεται η κατανομή της δόσης σε συνάρτηση με το βάθος (διάσταση z).
8. Το αρχείο spc-enddet-01.dat, το οποίο περιγράφει την κατανομή της αποτιθέμενης ενέργειας των σωματιδίων μέσα στον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας που αναφέρεται το αρχείο.
9. Το αρχείο energy-el-up.dat, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της ενέργειας των οπισθοσκεδαζομένων ηλεκτρονίων.

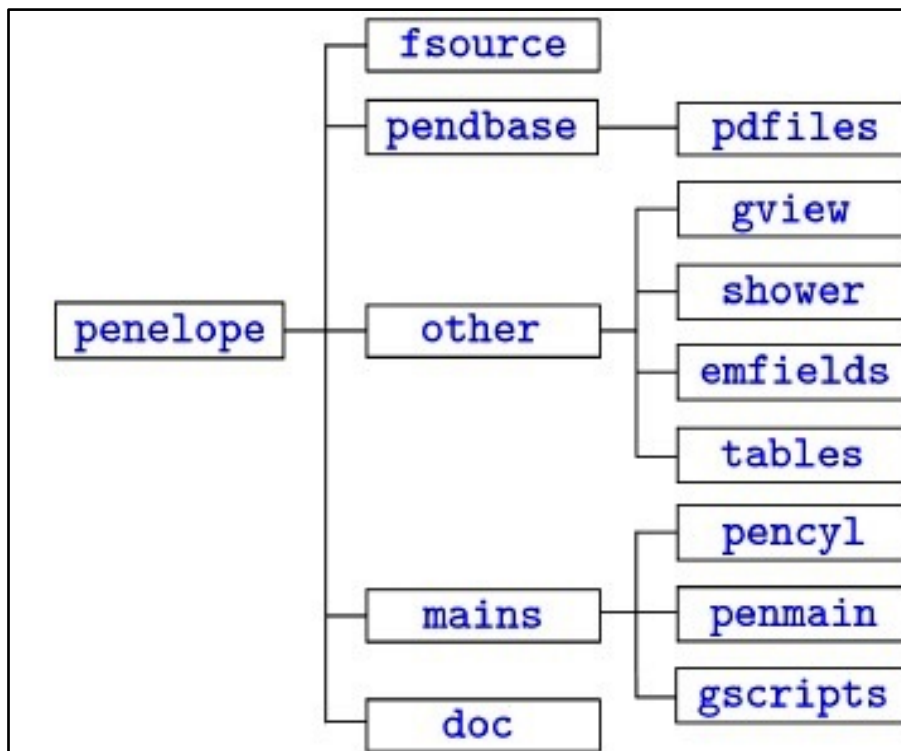
-
10. Το αρχείο `energy-el-down.dat`, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της ενέργειας των εκπεμπομένων ηλεκτρονίων.
 11. Το αρχείο `energy-ph-up.dat`, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της ενέργειας των οπισθοσκεδαζομένων φωτονίων.
 12. Το αρχείο `energy-ph-down.dat`, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της ενέργειας των εκπεμπομένων φωτονίων.
 13. Το αρχείο `energy-po-up.dat`, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της ενέργειας των οπισθοσκεδαζομένων ποζιτρονίων.
 14. Το αρχείο `energy-po-down.dat`, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της ενέργειας των εκπεμπομένων από την κατασκευή ποζιτρονίων.
 15. Το αρχείο `angle-el.dat`, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της γωνίας με την οποία εξέρχονται της κατασκευής τα ηλεκτρόνια.
 16. Το αρχείο `angle-po.dat`, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της γωνίας με την οποία εξέρχονται της κατασκευής τα ποζιτρόνια.
 17. Το αρχείο `angle-ph.dat`, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της γωνίας με την οποία εξέρχονται της κατασκευής τα φωτόνια.
 18. Το αρχείο `x-dose.dat`, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της δόσης κατά μήκος του άξονα x .
 19. Το αρχείο `y-dose.dat`, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της δόσης κατά μήκος του άξονα y .
 20. Το αρχείο `z-dose.dat`, στο οποίο καταγράφεται η κατανομή της δόσης κατά μήκος του άξονα z .

4.8 Το αρχείο `3d-dose.dat`

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα η σημασία του αρχείου `3d-dose.dat` στα πλαίσια της Δ.Ε., καθώς είναι αυτό το αρχείο, το οποίο παρείχε σε κάθε προσομοίωση τις απαραίτητες πληροφορίες για την εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων. Τα άλλα είδη εικονικών ανιχνευτών δε χρησιμοποιήθηκαν στη πλαίσια της ΔΕ.

Τμήμα του αρχείου `3d-dose.dat`, το οποίο προκύπτει ως αποτέλεσμα μίας προσομοίωσης απεικονίζεται στο σχήμα 4.3 στο τέλος του κεφαλαίου. Στην αρχή του αρχείου απεικονίζονται στοιχεία που έχουν καθοριστεί στο αρχείο εισόδου δεδομένων της προσομοίωσης, δηλαδή οι συντεταγμένες του ανιχνευτή δόσης κατά τους άξονες x , y , z , και το πλήθος των διαμερίσεων σε κάθε άξονα (ο αριθμός των καναλιών δηλαδή). Στη συνέχεια παρουσιάζονται 8 στήλες. Οι πρώτες τρεις

αφορούν τις συντεταγμένες στο χώρο του εκάστοτε καναλιού, όπως προκύπτουν από τις συνολικές διαστάσεις και τη διαμέριση του ανιχνευτή στους 3 άξονες. Στην τέταρτη στήλη καταγράφεται η μετρούμενη δόση στο κανάλι σε eV/g και στην πέμπτη η αντίστοιχη αβεβαιότητα. Στις τρεις τελευταίες στήλες καταγράφονται οι αύξοντες αριθμοί του εκάστοτε καναλιού κατά τους άξονες x, y, z. Στο σχήμα 4.3, το οποίο βρίσκεται στο τέλος του κεφαλαίου, απεικονίζεται τμήμα του αρχείου 3d-dose.dat.



Σχήμα 4.1-Δομή του κώδικα Penelope


```

# Results from PENMAIN. 3D dose distribution.
# Dose-map box: XL = -2.500000E-01 cm, XU = 2.500000E-01 cm
#               YL = -2.500000E-01 cm, YU = 2.500000E-01 cm
#               ZL = 2.000250E+01 cm, ZU = 2.000650E+01 cm
# Numbers of bins:   NBX = 100, NBY = 100, NBZ = 1
#
# columns 1 to 3: coordinates X,Y,Z of the bin centres
# 4th column: dose (ev/g).
# 5th column: statistical uncertainty (3 sigma).
# columns 6 to 8: bin indices IX,IY,IZ.
-2.475E-01 -2.475E-01 2.000E+01 7.24192E+01 5.1E+01 1 1 1
-2.475E-01 -2.425E-01 2.000E+01 6.70762E+01 4.7E+01 1 2 1
-2.475E-01 -2.375E-01 2.000E+01 2.50524E+01 2.5E+01 1 3 1
-2.475E-01 -2.325E-01 2.000E+01 8.65310E+01 5.4E+01 1 4 1
-2.475E-01 -2.275E-01 2.000E+01 5.64386E+01 4.4E+01 1 5 1
-2.475E-01 -2.225E-01 2.000E+01 5.02472E+01 4.0E+01 1 6 1
-2.475E-01 -2.175E-01 2.000E+01 1.79282E+01 2.2E+01 1 7 1
-2.475E-01 -2.125E-01 2.000E+01 2.11895E+01 2.7E+01 1 8 1
-2.475E-01 -2.075E-01 2.000E+01 1.34406E+01 2.2E+01 1 9 1
-2.475E-01 -2.025E-01 2.000E+01 1.11114E+01 1.9E+01 1 10 1
-2.475E-01 -1.975E-01 2.000E+01 4.76902E+01 4.0E+01 1 11 1
-2.475E-01 -1.925E-01 2.000E+01 1.51251E+01 2.1E+01 1 12 1
-2.475E-01 -1.875E-01 2.000E+01 1.04800E+01 2.0E+01 1 13 1
-2.475E-01 -1.825E-01 2.000E+01 9.26927E+00 2.0E+01 1 14 1
-2.475E-01 -1.775E-01 2.000E+01 1.17441E+01 2.0E+01 1 15 1
-2.475E-01 -1.725E-01 2.000E+01 8.05854E+00 1.7E+01 1 16 1
-2.475E-01 -1.675E-01 2.000E+01 3.20281E+00 5.6E+00 1 17 1
-2.475E-01 -1.625E-01 2.000E+01 9.32661E+00 1.6E+01 1 18 1
-2.475E-01 -1.575E-01 2.000E+01 1.97759E+01 2.8E+01 1 19 1
-2.475E-01 -1.525E-01 2.000E+01 1.39039E+01 2.4E+01 1 20 1
-2.475E-01 -1.475E-01 2.000E+01 1.16907E+01 2.0E+01 1 21 1
-2.475E-01 -1.425E-01 2.000E+01 1.57461E+01 2.5E+01 1 22 1
-2.475E-01 -1.375E-01 2.000E+01 1.66892E+01 2.4E+01 1 23 1
-2.475E-01 -1.325E-01 2.000E+01 1.52908E+01 2.3E+01 1 24 1
-2.475E-01 -1.275E-01 2.000E+01 1.58480E+01 2.4E+01 1 25 1
-2.475E-01 -1.225E-01 2.000E+01 1.66964E+01 2.5E+01 1 26 1
-2.475E-01 -1.175E-01 2.000E+01 6.62671E+00 1.5E+01 1 27 1
-2.475E-01 -1.125E-01 2.000E+01 6.22356E+00 1.3E+01 1 28 1
-2.475E-01 -1.075E-01 2.000E+01 1.36828E+01 2.1E+01 1 29 1
-2.475E-01 -1.025E-01 2.000E+01 4.04907E+01 3.7E+01 1 30 1
-2.475E-01 -9.750E-02 2.000E+01 4.75744E+01 4.1E+01 1 31 1
-2.475E-01 -9.250E-02 2.000E+01 8.36816E+01 5.5E+01 1 32 1
-2.475E-01 -8.750E-02 2.000E+01 9.03943E+01 5.6E+01 1 33 1
-2.475E-01 -8.250E-02 2.000E+01 8.44637E+01 5.2E+01 1 34 1
-2.475E-01 -7.750E-02 2.000E+01 8.00616E+01 5.1E+01 1 35 1
-2.475E-01 -7.250E-02 2.000E+01 4.80453E+01 3.8E+01 1 36 1
-2.475E-01 -6.750E-02 2.000E+01 2.63680E+01 2.9E+01 1 37 1
-2.475E-01 -6.250E-02 2.000E+01 2.26713E+01 2.7E+01 1 38 1
-2.475E-01 -5.750E-02 2.000E+01 1.21124E+01 2.0E+01 1 39 1
-2.475E-01 -5.250E-02 2.000E+01 2.43839E+01 3.1E+01 1 40 1
-2.475E-01 -4.750E-02 2.000E+01 1.20617E+01 2.1E+01 1 41 1
-2.475E-01 -4.250E-02 2.000E+01 5.84537E+00 1.4E+01 1 42 1
-2.475E-01 -3.750E-02 2.000E+01 9.26927E+00 2.0E+01 1 43 1
-2.475E-01 -3.250E-02 2.000E+01 1.79410E+01 2.6E+01 1 44 1
-2.475E-01 -2.750E-02 2.000E+01 4.63464E+00 1.4E+01 1 45 1
-2.475E-01 -2.250E-02 2.000E+01 1.29281E+01 2.1E+01 1 46 1
-2.475E-01 -1.750E-02 2.000E+01 9.26927E+00 2.0E+01 1 47 1
-2.475E-01 -1.250E-02 2.000E+01 8.91775E+00 1.7E+01 1 48 1
-2.475E-01 -7.500E-03 2.000E+01 1.56547E+01 2.1E+01 1 49 1
-2.475E-01 -2.500E-03 2.000E+01 3.07238E+00 6.6E+00 1 50 1
-2.475E-01 2.500E-03 2.000E+01 1.42749E+01 2.3E+01 1 51 1
-2.475E-01 7.500E-03 2.000E+01 2.15732E+01 2.7E+01 1 52 1
-2.475E-01 1.250E-02 2.000E+01 1.69763E+01 2.5E+01 1 53 1
-2.475E-01 1.750E-02 2.000E+01 7.10944E+00 1.5E+01 1 54 1
-2.475E-01 2.250E-02 2.000E+01 8.48316E+00 1.6E+01 1 55 1
-2.475E-01 2.750E-02 2.000E+01 1.99685E+00 4.3E+00 1 56 1
-2.475E-01 3.250E-02 2.000E+01 2.05366E+01 2.4E+01 1 57 1

```

Σχήμα 4.3-Τμήμα αρχείου 3d-dose.dat

5^ο Κεφάλαιο : Προσομοίωση του ποιοτικού ελέγχου μηχανής ακτίνων-Χ με την ύλη

5.1 Εισαγωγή

Βασικός σκοπός του παρόντος κεφαλαίου της εργασίας είναι να εξεταστεί μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo η επίδραση που έχουν μία σειρά παράμετροι στα πλαίσια της διαδικασίας ποιοτικού ελέγχου μία μηχανής ακτίνων-Χ, με κεντρικό γνώμονα τη μελέτη της διακριτικής ικανότητας της μηχανής. Όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο 3^ο κεφάλαιο ο ποιοτικός έλεγχος της λειτουργίας μιας μηχανής ακτίνων-Χ πραγματοποιείται με τη χρήση των δοκιμαστικών δοκιμίων (test objects). Αυτή ακριβώς η διαδικασία προσομοιώθηκε – σε κάποιο βαθμό – με χρήση του κώδικα Penelope.

Εκτός από την απλή γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τη θεωρία που αναπτύχθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο επιχειρήθηκε και η εκτίμηση δεικτών (μεγέθυνση, γεωμετρική ασάφεια) που χαρακτηρίζουν το επίπεδο ποιότητας της ραδιογραφικής εικόνας. Οι βασικές παράμετροι, των οποίων εξετάσθηκε η επίδραση στη δημιουργία της ραδιογραφικής εικόνας ενός δοκιμίου δοκιμής, είναι οι ακόλουθοι:

- Μέγεθος εστιακού σημείου της πηγής.
- Αποστάσεις πηγής-δοκιμίου και δοκιμίου-φιλμ για δεδομένη συνολική απόσταση πηγής-φιλμ.
- Απόσταση μεταξύ των δοκιμίων δοκιμής.
- Ενέργεια ακτίνων-Χ.

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά περιγράφεται η γεωμετρία του προβλήματος, τα αποτελέσματα που δίνει η προσομοίωσή του και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων κάθε προσομοίωσης, η οποία αποφασίσθηκε να γίνει στα πλαίσια της Δ.Ε. προκειμένου να παραχθούν μεγέθη που μπορούν να αξιολογηθούν και να αξιοποιηθούν.

Πριν ξεκινήσει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής μελέτης είναι σκόπιμο να παρουσιασθεί η επίδραση δύο παραμέτρων, όχι της πειραματικής διάταξης αλλά της προσομοίωσης. Οι παράμετροι αυτές ορίζονται στο αρχείο εισόδου δεδομένων πριν από την εκκίνηση του κώδικα. Αρχικά θα εξεταστεί η

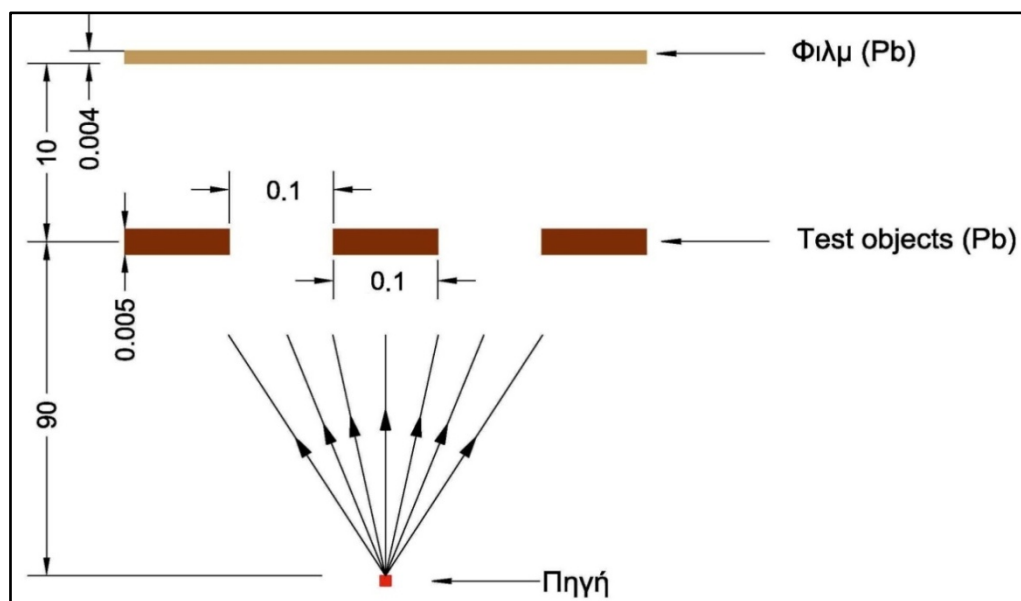
επίδραση που έχει στο αποτέλεσμα της εκάστοτε προσομοίωσης ο καθορισμός της ενέργειας αποκοπής (Cut off energy) φωτονίων και σωματιδίων, όσον αφορά το κάθε είδος αλληλεπίδρασης καθώς και η επιλογή των συντελεστών ελαστικής σκέδασης. Σε δεύτερη φάση θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επιλογή του υλικού που αποτελεί το φιλμ στην προσομοίωση, το οποίο ορίζεται στα αρχεία εισόδου δεδομένων και γεωμετρίας ως ανιχνευτής δόσης.

Μετά την παραπάνω διερεύνηση, στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση. Στο τελευταίο τμήμα του κεφαλαίου παρουσιάζεται προσομοίωση που έγινε, όχι με τη χρήση μονοενεργειακής δέσμης ακτίνων-Χ, αλλά με την εισαγωγή φάσματος ακτινοβολίας και συγκρίνεται με την αντίστοιχη προσομοίωση στην οποία έχει οριστεί μονοενεργειακή πηγή ακτινοβολίας.

5.2 Περιγραφή της γεωμετρίας της διάταξης

Σε γενικό πλαίσιο η γεωμετρία της διάταξης που θα οριστεί για την εκτέλεση των προσομοιώσεων απεικονίζεται στο σχήμα 5.1. Στο κάτω μέρος ορίζεται η πηγή ακτινοβολίας, η οποία μπορεί να εκπέμπει είτε ακτινοβολία συγκεκριμένης ενέργειας είτε φάσμα ακτινοβολίας.

Η εξερχόμενη ακτινοβολία από το παράθυρο της μηχανής προσπίπτει στα test objects, τα οποία είναι τοποθετημένα σε ορισμένη απόσταση και αποτελούνται από φύλλα μολύβδου τοποθετημένα σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους. Ακολούθως η ακτινοβολία προσπίπτει, είτε εξασθενημένη είτε όχι, στο φιλμ ραδιογραφίας, το οποίο ορίζεται ως ανιχνευτής δόσης. Στην πειραματική διάταξη πολλές παράμετροι, όπως η χωρική συχνότητα, το υλικό των δοκιμίων δοκιμής, η απόσταση των δοκιμίων δοκιμής από το φιλμ, το υλικό του φιλμ πρόκειται να μεταβάλλονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε προσομοίωσης.



Σχήμα 5.1- Παράδειγμα πειραματικής διάταξης

5.3 Ορισμός ανιχνευτή δόσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η συλλογή των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων θα πραγματοποιηθεί μέσω του ορισμού του φιλμ ραδιογραφίας ως ανιχνευτή δόσης (Dose enclosure). Σε όλες τις προσομοιώσεις γίνεται κατάλληλος διαμερισμός του ανιχνευτή σε voxels (volume elements) συνολικού πλήθους 10.000. Στις περισσότερες προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ανάλυση $100 \times 100 \times 1$, ενώ σε όλες τις προσομοιώσεις κατά τον άξονα z δεν πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός (πρακτικά έχουμε 1 voxel πάντα).

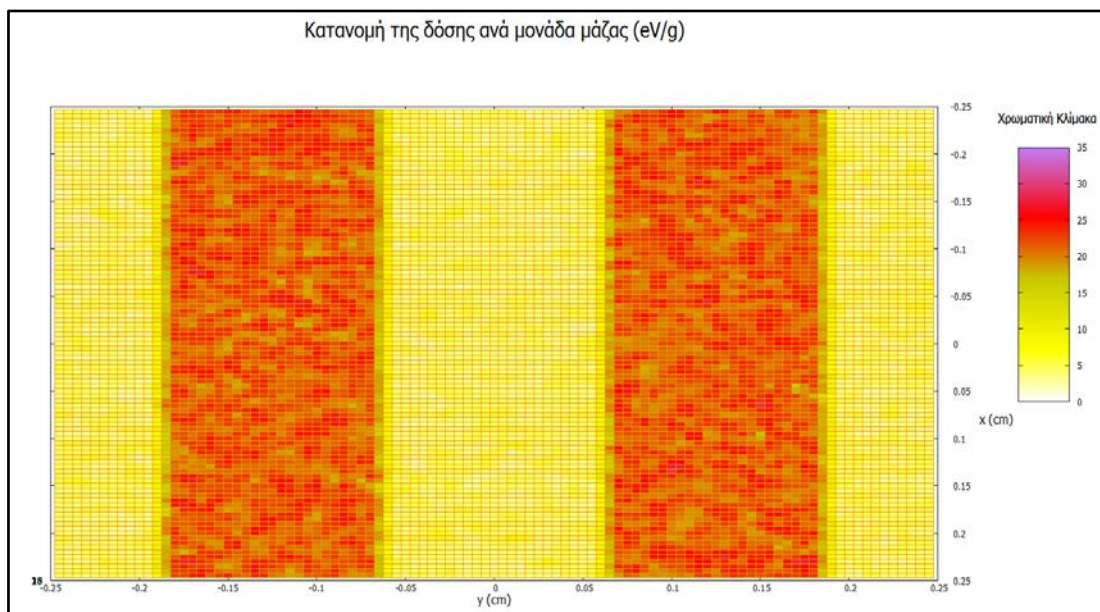
Όπου κρίθηκε απαραίτητο πραγματοποιήθηκε μεταβολή της επιμέρους ανάλυσης των αξόνων, με το συνολικό γινόμενο της ανάλυσης, ωστόσο να παραμένει σταθερό. Για αυτό θα επισημανθούν οι προσομοιώσεις όπου έχουμε διαφορετική ανάλυση από $100 \times 100 \times 1$. Επιπροσθέτως ο κώδικας δεν επιτρέπει μεγαλύτερη διαμέριση από 100 σε κάθε άξονα. Για να μπορέσουμε να πετύχουμε μεγαλύτερη διαμέριση θα πρέπει να γίνει τροποποίηση του κώδικα, διαδικασία που περιγράφεται λεπτομερώς στο παράρτημα Β. Τέλος ως υλικό του φιλμ θα θεωρηθεί κατά κύριο λόγο ο AgBr.

5.4 Απεικόνιση και επεξεργασία και των αποτελεσμάτων

Όπως τονίστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η επεξεργασία και η διεξαγωγή συμπερασμάτων θα πραγματοποιηθεί με την χρήση του αρχείου 3d-dose.dat, στο οποίο καταγράφεται η ενέργεια ανά μονάδα μάζας που αποθηκεύεται

στα voxels του ανιχνευτή δόσης. Η αξιοποίηση του αρχείου πραγματοποιήθηκε με δύο διαδικασίες.

Η πρώτη διαδικασία αφορά τη χρήση του αρχείου με τη μορφή που αυτό δημιουργείται και η απεικόνιση του με το πρόγραμμα gnuplot.exe χρησιμοποιώντας χρωματική κλίμακα. Έτσι λαμβάνουμε γραφήματα με την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 5.2-Παράδειγμα απεικόνισης με τη χρήση χρωματικής κλίμακας με τη χρήση του gnuplot.exe

Με την παραπάνω απεικόνιση μπορούμε να δούμε την κατανομή της δόσης στην επιφάνεια του ανιχνευτή δόσης. Οι διαστάσεις που απεικονίζονται είναι οι άξονες x και y , το επίπεδο δηλαδή που είναι κάθετο στον άξονα ακτινοβολίας (άξονας z). Ο συγκεκριμένος τρόπος απεικόνισης επιτρέπει στον αναγνώστη μία περισσότερο ποιοτική προσέγγιση του προβλήματος. Πρακτικά μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε αν τα δεδομένα του προβλήματος εισήχθησαν σωστά και η προσομοίωση εξελίχθηκε όπως ακριβώς αναμενόταν.

Η δεύτερη δυνατότητα που χρησιμοποιήσαμε περιλαμβάνει την περαιτέρω επεξεργασία των εξαγόμενων μετρήσεων πριν την απεικόνιση τους με τη χρήση του προγράμματος gnuplot.exe. Το αρχείο 3d-dose.dat που λαμβάνουμε έχει την εξής μορφή:

```

# Results from PENMAIN. 3D dose distribution.
# Dose-map box: XL = -2.500000E-01 cm, XU = 2.500000E-01 cm
#               YL = -2.500000E-01 cm, YU = 2.500000E-01 cm
#               ZL = 2.000250E+01 cm, ZU = 2.002250E+01 cm
# Numbers of bins: NBX = 100, NBY = 100, NBZ = 1
#
# columns 1 to 3: coordinates X,Y,Z of the bin centres
# 4th column: dose (eV/g).
# 5th column: statistical uncertainty (3 sigma).
# columns 6 to 8: bin indices IX,IY,IZ.
-2.475E-01 -2.475E-01 2.001E+01 2.42090E+00 3.3E+00 1 1 1
-2.475E-01 -2.425E-01 2.001E+01 2.64317E+00 3.5E+00 1 2 1
-2.475E-01 -2.375E-01 2.001E+01 4.04314E+00 4.3E+00 1 3 1
-2.475E-01 -2.325E-01 2.001E+01 5.59271E+00 5.1E+00 1 4 1
-2.475E-01 -2.275E-01 2.001E+01 3.39408E+00 3.9E+00 1 5 1
-2.475E-01 -2.225E-01 2.001E+01 2.11454E+00 3.2E+00 1 6 1
-2.475E-01 -2.175E-01 2.001E+01 4.22907E+00 4.5E+00 1 7 1
-2.475E-01 -2.125E-01 2.001E+01 7.21100E+00 5.7E+00 1 8 1
-2.475E-01 -2.075E-01 2.001E+01 2.82910E+00 3.6E+00 1 9 1
-2.475E-01 -2.025E-01 2.001E+01 3.48360E+00 4.0E+00 1 10 1
-2.475E-01 -1.975E-01 2.001E+01 4.78862E+00 4.6E+00 1 11 1
-2.475E-01 -1.925E-01 2.001E+01 2.72410E+00 3.4E+00 1 12 1
-2.475E-01 -1.875E-01 2.001E+01 1.72655E+01 9.0E+00 1 13 1
-2.475E-01 -1.825E-01 2.001E+01 2.04714E+01 9.7E+00 1 14 1
-2.475E-01 -1.775E-01 2.001E+01 1.89652E+01 9.4E+00 1 15 1
-2.475E-01 -1.725E-01 2.001E+01 2.60746E+01 1.1E+01 1 16 1
-2.475E-01 -1.675E-01 2.001E+01 1.99801E+01 9.6E+00 1 17 1
-2.475E-01 -1.625E-01 2.001E+01 1.94165E+01 9.5E+00 1 18 1
-2.475E-01 -1.575E-01 2.001E+01 2.56238E+01 1.1E+01 1 19 1
-2.475E-01 -1.525E-01 2.001E+01 2.26959E+01 1.0E+01 1 20 1
-2.475E-01 -1.475E-01 2.001E+01 2.26949E+01 1.0E+01 1 21 1
-2.475E-01 -1.425E-01 2.001E+01 2.82877E+01 1.2E+01 1 22 1
-2.475E-01 -1.375E-01 2.001E+01 2.04543E+01 9.7E+00 1 23 1
-2.475E-01 -1.325E-01 2.001E+01 2.04933E+01 9.6E+00 1 24 1

```

Σχήμα 5.3-Μορφή αρχείου 3d-dose.dat

Στο αρχείο έχει καταγραφεί η δόση ανά μονάδα μάζας που έχει απορροφηθεί από κάθε voxel του ανιχνευτή δόσης μαζί με τις αντίστοιχες στατιστικές αβεβαιότητες. Λόγω συμμετρίας κατά το άξονα x δεν αναμένουμε μεγάλες διαφοροποιήσεις στην κατανομή της δόσης, παρά μόνο εξαιτίας της στατιστικής. Αυτό το παρατηρούμε και στο σχήμα 5.2. Εκεί που έχει αξία να επικεντρωθεί το ενδιαφέρον είναι οι μεταβολές κατά τον άξονα y. Συνεπώς μπορούμε να ομαδοποιήσουμε τα αποτελέσματα υπολογίζοντας μέσους όρους για όλα τα σημεία του άξονα x, τα οποία αντιστοιχούν σε μία συγκεκριμένη τιμή του άξονα y.

Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή των δεδομένων σε υπολογιστικό φύλλο και της περαιτέρω επεξεργασίας τους. Οι παραπάνω τιμές της στατιστικής αβεβαιότητας δεν θα χρησιμοποιηθούν αλλά θα υπολογιστούν εκ νέου με βάση την ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων.

Για την στατική επεξεργασία των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθούν οι εξής τύποι [9] :

- Υπολογισμός μέσης τιμής:

$$\bar{x} = \sum_{1}^{v} \frac{n_i}{N} * x_i$$

- Υπολογισμός τυπικής απόκλισης:

$$s = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{1}^{v} n_i (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

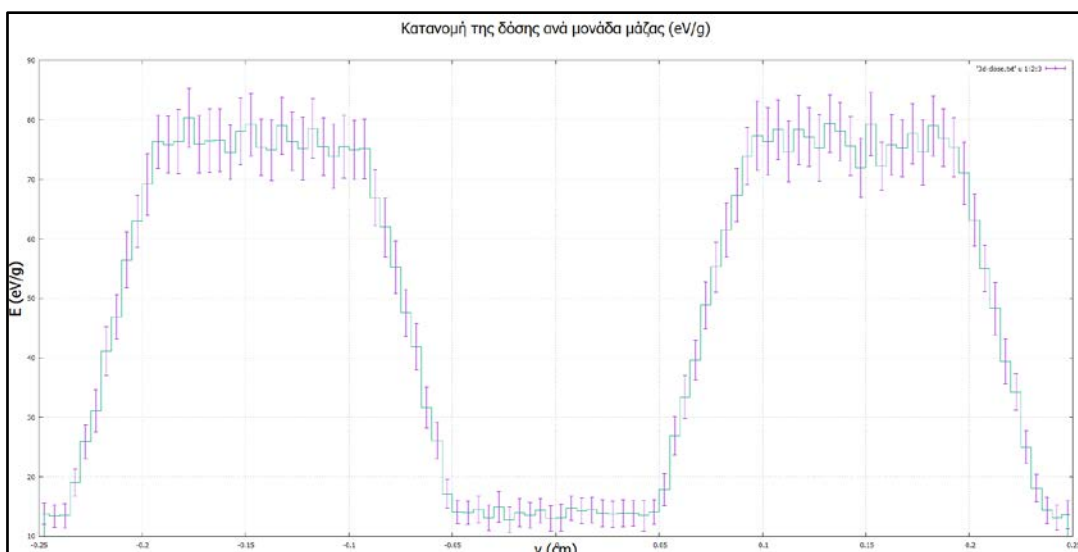
- Υπολογισμός τυπικού σφάλματος:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{s}{N^{\frac{1}{2}}}$$

- Υπολογισμός στατιστικής αβεβαιότητας:

$$u = 3 * \sigma_{\bar{x}}$$

Με τη χρήση των παραπάνω σχέσεων και την εκτέλεση του gnuplot.exe μπορούμε να δημιουργήσουμε πιο κατατοπιστικά γραφήματα, όπως το ακόλουθο γράφημα:



Σχήμα 5.4-Παράδειγμα απεικόνισης δεδομένων κατόπιν της επεξεργασίας με τη χρήση του gnuplot.exe

Επιπροσθέτως θα καταγράφονται ο χρόνος καθώς και η ταχύτητα εκτέλεσης στην εκάστοτε προσομοίωση. Οι πληροφορίες αυτές καταγράφονται στο αρχείο `renmain.dat` που δημιουργεί ο κώδικας κατά την εκτέλεση μίας προσομοίωσης. Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με 1×10^{10} φωτόνια. Τέλος επισημαίνεται πως στο παράρτημα Ε βρίσκονται αναλυτικά οι εντολές και τα αρχεία `gnu` που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

5.5 Θεωρητικοί υπολογισμοί δεικτών ποιότητας ραδιογραφίας

Με βάση τα δεδομένα του πειράματος και ανακαλώντας το θεωρητικό υπόβαθρο του 3^{ου} κεφαλαίου μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεγέθυνση του και την προκύπτουσα γεωμετρική ασάφεια του πειράματος.

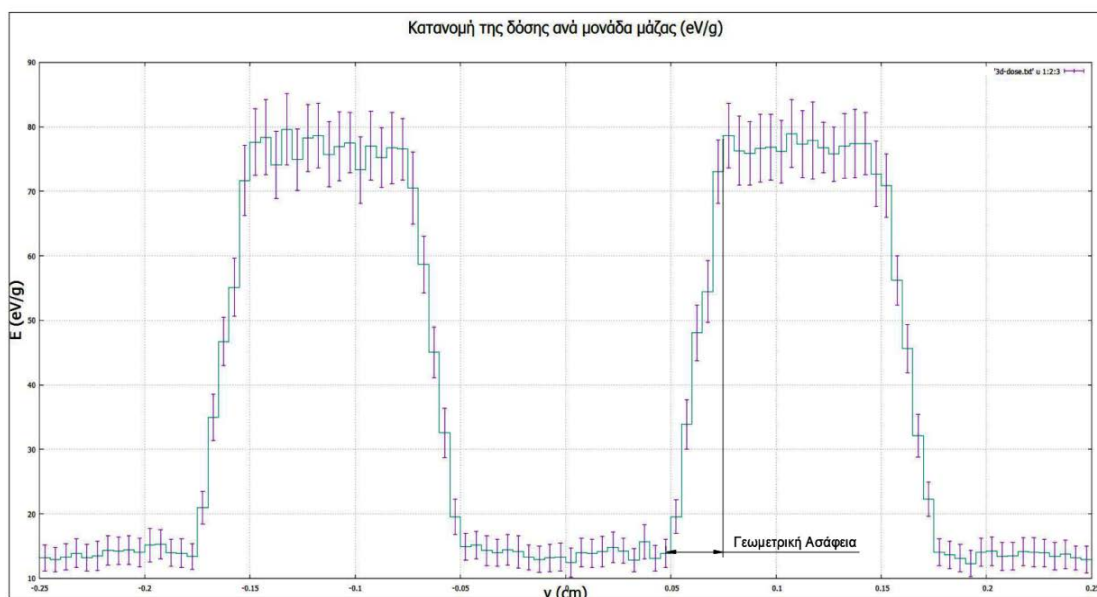
Η μεγέθυνση θα υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$m = \frac{d_1 + d_2}{d_1}$$

όπου d_1 η απόσταση δοκιμίων-πηγής και d_2 η απόσταση δοκιμίων-φιλμ. Επίσης η θεωρητική γεωμετρική ασάφεια θα υπολογιστεί από το τύπο:

$$U_g = k * \left(1 - \frac{1}{m}\right)$$

όπου m είναι η μεγέθυνση και k το πλάτος του σημείου εστίασης της πηγής. Η πραγματική γεωμετρική ασάφεια θα υπολογιστεί γραφικά αξιοποιώντας το ραδιογραφικό αποτελέσματα που μας παρέχουν οι προσομοιώσεις και συγκεκριμένα τα διαγράμματα που προκύπτουν κατόπιν στατιστικής επεξεργασίας. Στο σχήμα 5.5 απεικονίζεται ο τρόπος υπολογισμού της πραγματικής γεωμετρικής ασάφειας.



Σχήμα 5.5-Τρόπος υπολογισμού πραγματικής γεωμετρικής ασάφειας

5.6 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων προσομοίωσης που αφορούν το υλικό

Στα πλαίσια του 4^ο κεφαλαίου, στην περιγραφή του αρχείου εισόδου δεδομένων του κώδικα Penmain, έγινε σύντομη αναφορά στις παραμέτρους του υλικού που σχετίζονται με:

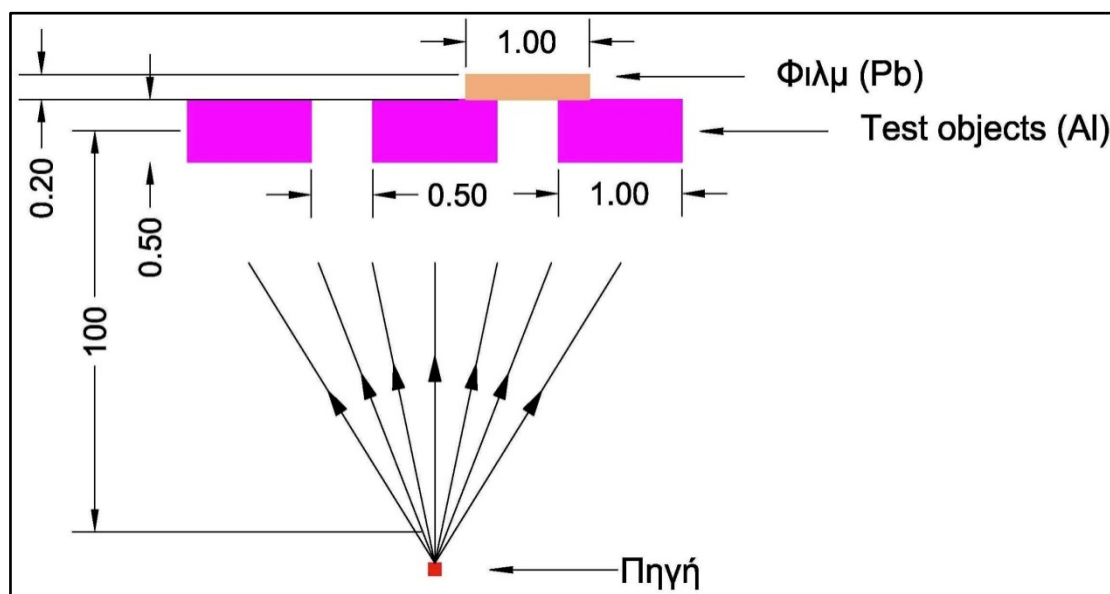
- τις ενέργειες απορρόφησης που σχετίζονται με τα τρία είδη ακτινοβολίας (ηλεκτρόνια, φωτόνια, ποζιτρόνια) και αντιστοιχούν στον παράγοντα EABS(1:3,M).
- τις ελαστικές σκεδάσεις και αντιστοιχούν στους συντελεστές C1(M) και C2(M).
- τις ενέργειες αποκοπής (cut off energies) για τις μη ελαστικές σκεδάσεις WCC(M) και την ακτινοβολία πέδησης WCC(R).

Ως ενέργεια αποκοπής (cut off energy) γενικά ορίζεται το ενεργειακό όριο, κάτω από το οποίο ο κώδικας παύει να παρακολουθεί ένα σωματίδιο ή φωτόνιο και θεωρεί ότι το σωματίδιο ή φωτόνιο αποθέτει πλήρως την ενέργειά του στο σημείο, στο οποίο βρίσκεται. Όπως είναι φανερό η αύξηση της τιμής της παραμέτρου αυτής έχει ως αποτέλεσμα ορισμένες ιστορίες να ολοκληρώνονται γρηγορότερα, κάτι που οδηγεί σε ταχύτερη προσομοίωση. Πρέπει όμως να επισημανθεί το γεγονός πως ο τερματισμός της ιστορίας ενός ηλεκτρονίου ή φωτονίου γρηγορότερα συνεπάγεται την καταγραφή της ενέργειας σε διαφορετικό σημείο, από το οποίο θα είχε αυτή

αποτεθεί αν το σωματίδιο συνέχιζε να κινείται και να αλληλεπιδρά. Αυτό μπορεί να έχει σημαντικές συνέπειες στην κατανομή της δόσης, όπως αυτή καταγράφεται στον ανιχνευτή δόσης. Για το λόγο αυτό, πριν από την παραμετρική μελέτη πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις, έτσι ώστε να διερευνηθεί κατά πόσο η μεταβολή των παραμέτρων αυτών της προσομοίωσης επηρεάζει το αποτέλεσμα που καταγράφει ο ανιχνευτής δόσης.

5.6.1 Μελέτη της επίδρασης των ενεργειών αποκοπής

Στην πρώτη περίπτωση εξετάσθηκε η πιθανή επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα που μπορεί να υπάρχει μεταβάλλοντας τις ενέργειες αποκοπής (cut of energies) για τις μη ελαστικές σκεδάσεις WCC(M) και την ακτινοβολία πέδησης WCC(R). Για το σκοπό θα αυτό θεωρούμε την παρακάτω διάταξη που απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5.6-Διάταξη προσομοίωσης

Η διάταξη περιλαμβάνει τρία δοκίμια από αλουμίνιο (Al) και ακριβώς από πίσω ένα φιλμ από μόλυβδο (Pb), το οποίο ωστόσο δεν καλύπτει όλη την επιφάνεια πίσω από τα δοκίμια αλουμινίου. Η ενέργεια της ακτινοβολίας είναι 30 keV, ενώ χρησιμοποιήθηκε για λόγους απλότητας σημειακή πηγή ακτινοβολίας. Στο σχήμα 5.7 επισημαίνονται οι αλλαγές των μεταβλητών WCC(M) και WCC(R) όσον αφορά το υλικό του μολύβδου έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση τους στο τελικό αποτέλεσμα.

```

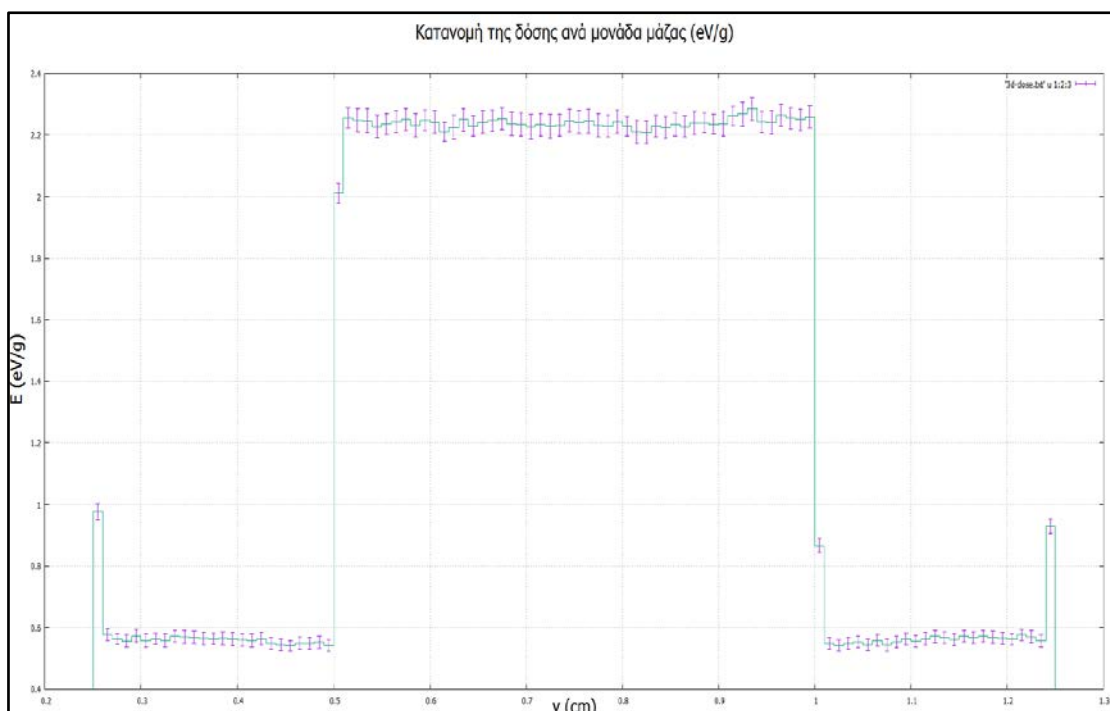
TITLE Aluminium bricks
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 3e4 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 -100 [Coordinates of the source]
SCONE 0 0 25 [Conical beam; angles in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Al.mat [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 3e2 3e2 3e2 0.1 0.1 3e2 3e2 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME Pb.mat [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 3e2 3e2 3e2 0.1 0.1 3e2 3e2 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.

```

Σχήμα 5.7-Τμήμα αρχείου εισόδου δεδομένων

Πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις με στόχο να διερευνηθεί κατά πόσο η μεταβολή των cut off energies θα μεταβάλει το τελικό αποτέλεσμα στον ανιχνευτή αποτιθέμενης δόσης. Στην πρώτη περίπτωση οι cut off energies WCC(M) και WCC(R) ορίστηκαν να έχουν τιμή ίση με 300 eV που αποτελεί την προεπιλογή του προγράμματος (1% της ενέργειας της πηγής). Στη συνέχεια η προσομοίωση επαναλήφθηκε με τη μόνη διαφορά πως οι τιμές των WCC(M) και WCC(R) ορίστηκαν να έχουν τιμή ίση με 15 keV, δηλαδή ίση με την μισή τιμή ενέργειας της μονοενεργειακής ακτινοβολίας.

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται το αποτέλεσμα της πρώτης προσομοίωσης έχοντας θεωρήσει ενέργειες αποκοπής για τα μεγέθη WCC(M) και WCC(R) ίσες με 300 eV.



Σχήμα 5.8-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ενέργειες αποκοπής 300eV

Στο αντίστοιχο αρχείο penmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης: $5.065350 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης: $1.974197 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

Στη συνέχεια έγινε προσομοίωση με μεταβολή των cut off energies στα 15 keV. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο κατώφλι ενέργειας διότι στα 11 keV έχουμε τη δημιουργία ακτίνων-X στο μόλυβδο (Pb). Παρόλα αυτά το αποτέλεσμα δεν υπήρξε διαφορετικό, τουλάχιστον ποιοτικά και το σχήμα που προέκυψε είχε ακριβώς την ίδια μορφή με το σχήμα 5.8.

Στο αντίστοιχο αρχείο penmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $5.080636 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης: $1.968257 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

5.6.2 Η μεταβολή των συντελεστών σκέδασης

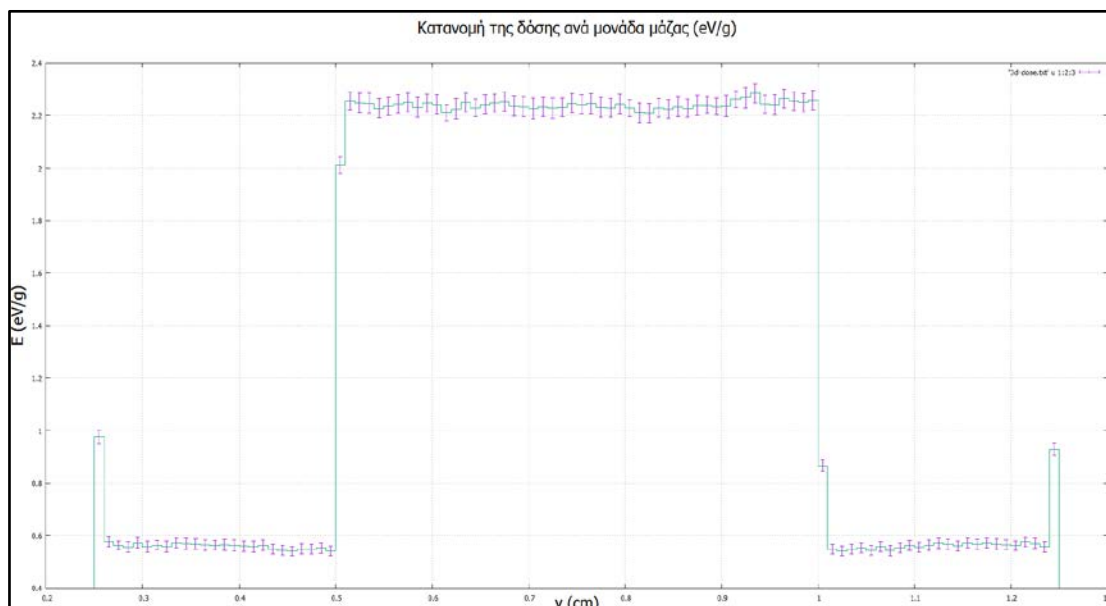
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μελέτη σχετικά με τους συντελεστές ελαστικών σκεδάσεων. Για το σκοπό χρησιμοποιήθηκε εκ νέου η διάταξη του σχήματος 5.6. Στις δύο προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκαν αντίστοιχα τιμές αντίστοιχα 0.1 και 0.01. Τμήμα του αρχείου εισόδου για την πρώτη προσομοίωση απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα:

```
TITLE Aluminium bricks
.
>>>>>>> source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 3e4 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 -100 [Coordinates of the source]
SCONE 0 0 25 [Conical beam; angles in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Al.mat [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 3e2 3e2 3e2 0.1 0.1 3e2 3e2 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME Pb.mat [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 3e2 3e2 3e2 0.1 0.1 3e2 3e2 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
```

Σχήμα 5.9-Τμήμα αρχείου εισόδου δεδομένων

Η προεπιλογή του προγράμματος για τους συντελεστές ελαστικής σκέδασης είναι 0.1. Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα ο ορισμός του συντελεστή σκέδασης αφορά τόσο το υλικό των test objects (Al), όσο και το υλικό του φιλμ (Pb).

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται το αποτέλεσμα της πρώτης προσομοίωσης έχοντας θεωρήσει συντελεστές ελαστικής σκέδασης ίσους με 0.1:

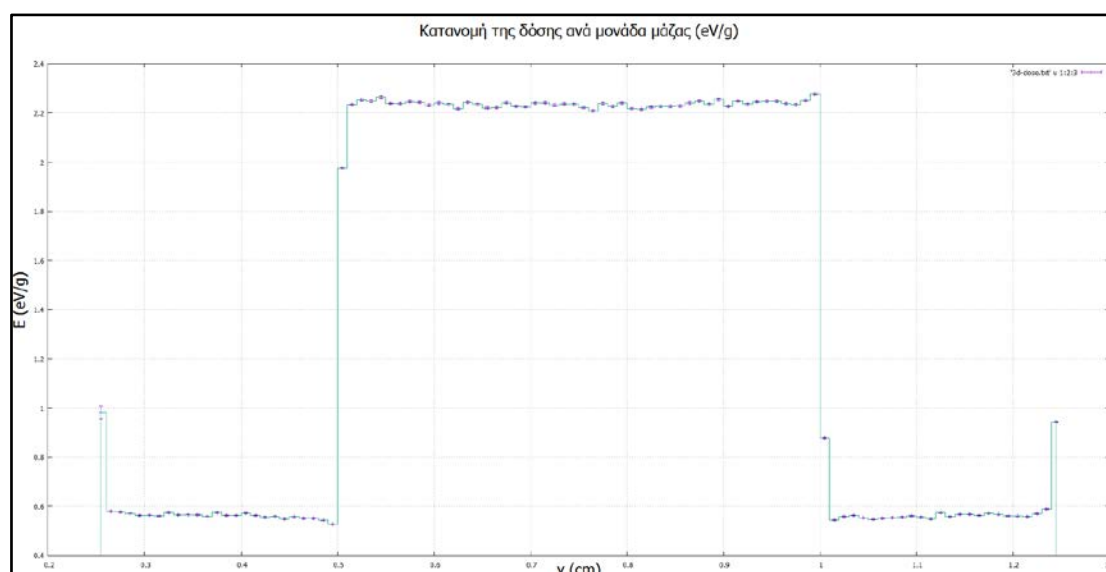


Σχήμα 5.10-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με συντελεστές ελαστικών σκεδάσεων 0.1

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : 5.065350×10^4 sec
- ταχύτητα προσομοίωσης : 1.974197×10^5 showers/sec

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης έχοντας ορίσει ως συντελεστές ελαστικών σκεδάσεων και τα δύο υλικά τη τιμή 0.01:

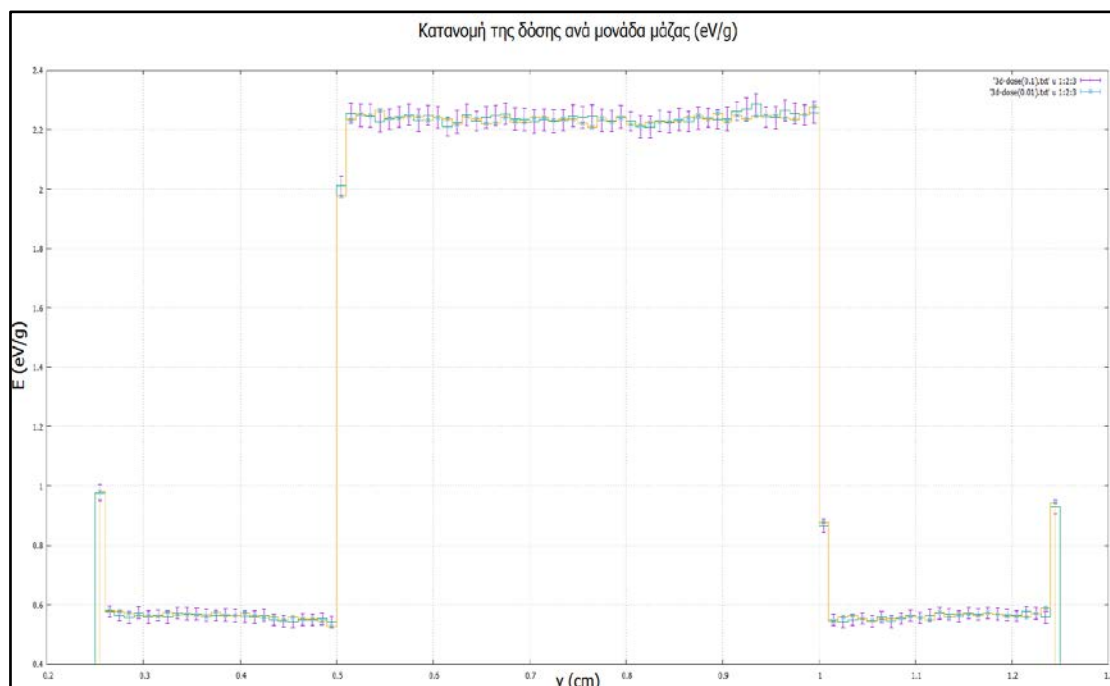


Σχήμα 5.11-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με συντελεστές ελαστικών σκεδάσεων 0.01

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $1.389903 \times 10^5 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $7.194747 \times 10^4 \text{ showers/sec}$

Έχοντας τα δύο παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να συνθέσουμε ένα συγκεντρωτικό γράφημα στο οποίο απεικονίζεται καλύτερα η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων:



Σχήμα 5.12-Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με συντελεστές ελαστικών σκεδάσεων 0.1 και 0.01

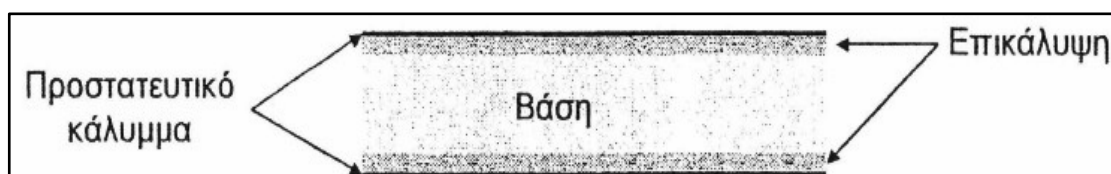
Όπως προκύπτει από το παραπάνω σχήμα υπάρχει διαφοροποίηση της κατανομής της δόσης ανά μονάδα μάζας μεταβάλλοντας τους συντελεστές ελαστικής σκέδασης. Ωστόσο όπως παρατηρούμε σε κάθε σημείο η κύμανση της τιμής της δόσης που αντιστοιχεί στην τιμή των συντελεστών 0,01 είναι πάντα εντός των ορίων της στατιστικής αβεβαιότητας που αντιστοιχεί στην τιμή της δόσης που αντιστοιχεί στην τιμή των συντελεστών 0,1.

5.7 Η επίδραση της επιλογής του υλικού του φιλμ στο ραδιογραφικό αποτέλεσμα

Η επιλογή του υλικού, από το οποίο αποτελείται το φιλμ αναμένεται να επιφέρει μεταβολές στο τελικό ραδιογραφικό αποτέλεσμα, όπως τουλάχιστον προσομοιώνεται. Οι πρώτες προσομοιώσεις κατά τη διάρκεια της παρούσας Δ.Ε.

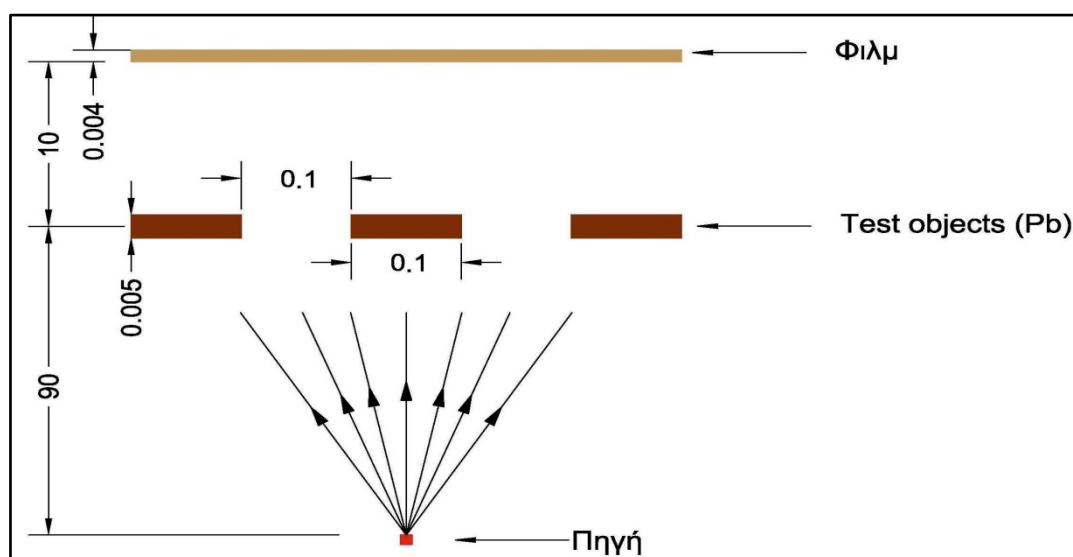
πραγματοποιήθηκαν θεωρώντας ως ανιχνευτή δόση φιλμ αποτελούμενο από μόλυβδο (Pb). Ο λόγος επιλογής του υλικού ήταν να αυξηθεί η πιθανότητα απορρόφησης των φωτονίων στο φιλμ, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη στατιστική σε εύλογο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, κατά την εξέλιξη των προσομοιώσεων αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση.

Στην πραγματικότητα το ραδιογραφικό φιλμ αποτελείται συνήθως από μία πολυεστερική βάση με πάχος 150-200 μm και στρώματα επικάλυψης με AgBr πάχους 10-20 μm στην άνω και κάτω πλευρά της βάσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.13:



Σχήμα 5.13-Τυπική μορφή φιλμ

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά αποφασίστηκε να θεωρηθεί ως ανιχνευτής δόσης ένα στρώμα AgBr, συνολικού πάχους 0.004 cm. Με στόχο λοιπόν να διαπιστωθούν τυχόν μεταβολές στο τελικό αποτέλεσμα εκτελέστηκαν δύο προσομοιώσεις με τη μόνη διαφορά να σχετίζεται με την επιλογή του υλικού του φιλμ. Στις προσομοιώσεις θα χρησιμοποιηθεί σημειακή πηγή μονοενεργειακής ακτινοβολίας 30 keV. Η γεωμετρία του πειράματος απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου έχουμε θεωρήσει τρία δοκίμια από μόλυβδο και σε απόσταση 10.0025 cm τον ανιχνευτή δόσης από ίδιο υλικό:



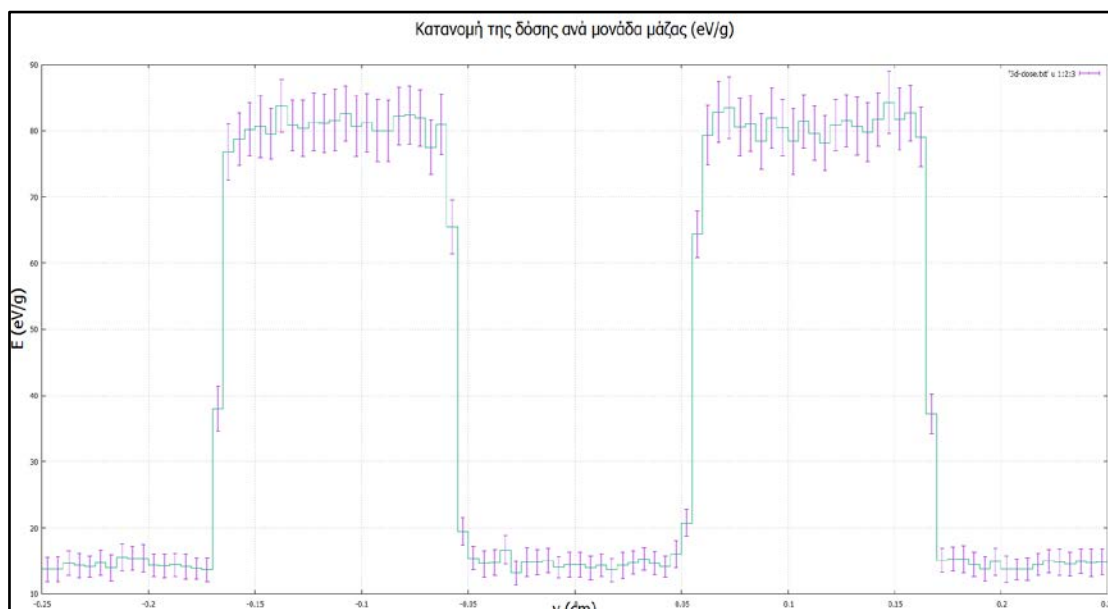
Σχήμα 5.14-Διάταξη προσομοίωσης

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται τμήμα του αρχείου εισόδου δεδομένων :

```
TITLE Pb bricks
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 3e4 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 -90 [Coordinates of the source]
SBOX 0.05 0.05 0 [source box dimensions]
SCONE 0 0 25 [Conical beam; angles in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Pb.mat [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 3e2 3e2 3e2 0.1 0.1 1.5e4 1.5e4 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN brick.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 0 3e4 1000 [Energy window and no. of bins]
NBANGL 45 18 [No. of bins for the angles THETA and PHI]
.
>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 25).
ENDETC 0.0 3e4 1000 [Energy window and number of bins]
EDBODY 1 [Active body; one line for each body]
.
>>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -0.25 0.25 [X coordinates of the enclosure vertices]
GRIDY -0.25 0.25 [Y coordinates of the enclosure vertices]
GRIDZ 10.0025 10.0065 [Z coordinates of the enclosure vertices]
GRIDBN 100 100 1 [Numbers of bins]
```

Σχήμα 5.15-Τμήμα αρχείου εισόδου δεδομένων

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:

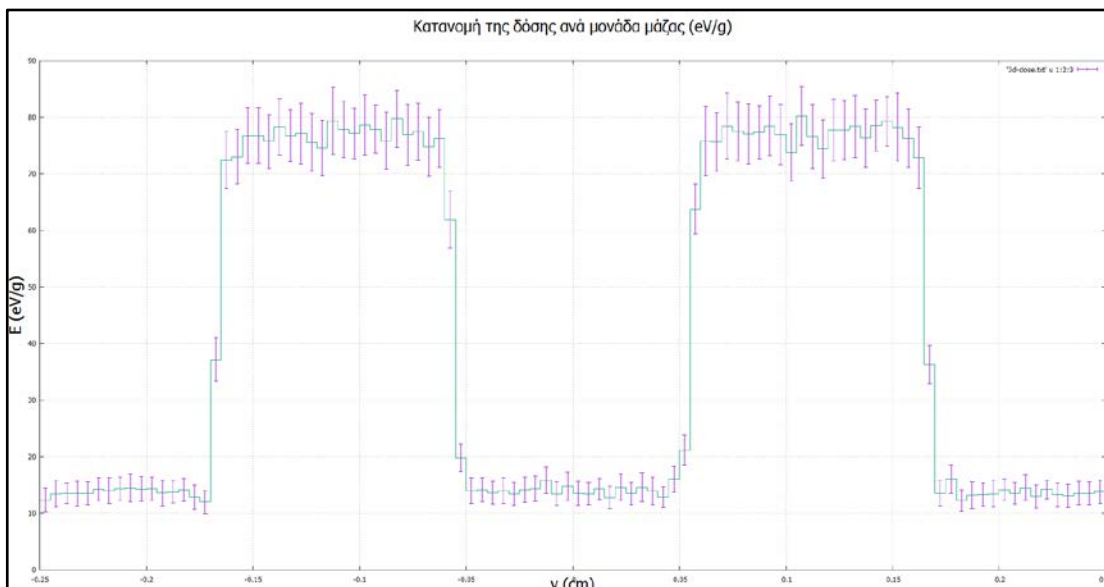


Σχήμα 5.16-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ορισμό του Pb ως υλικό του φιλμ

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $5.493058 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.82048 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

Αντίστοιχα το αποτέλεσμα της προσομοίωσης με ορισμό του υλικού του φιλμ το βρωμιούχο άργυρο (AgBr):

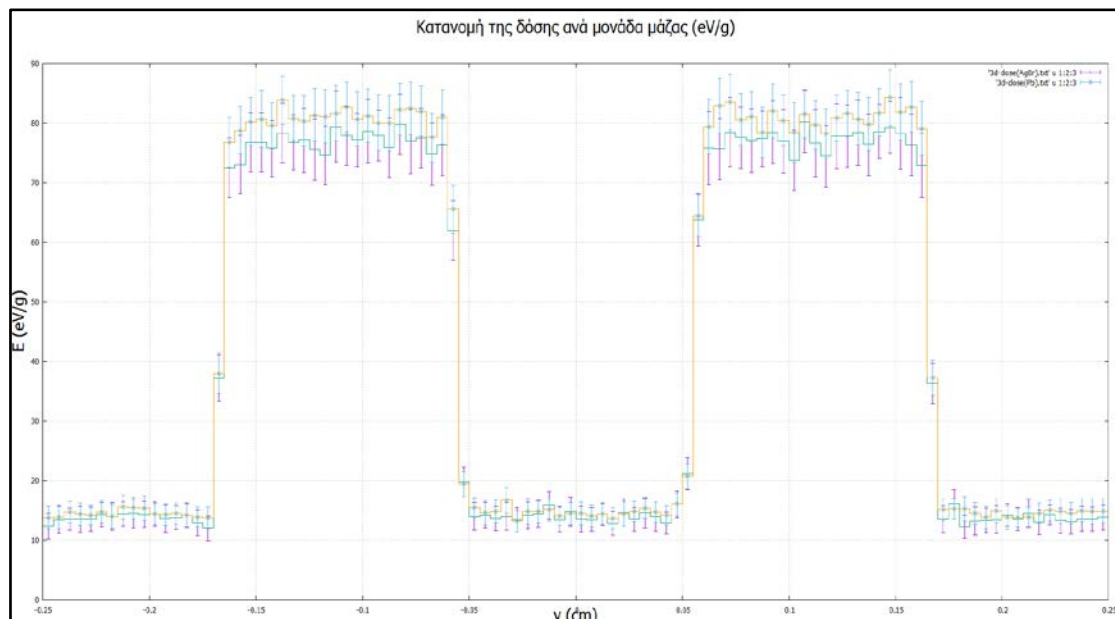


Σχήμα 5.17-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ορισμό του AgBr ως υλικό του φιλμ

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες :

- διάρκεια προσομοίωσης : $5.469433 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.828343 \times 10^4 \text{ showers/sec.}$

Με βάση τις παραπάνω πληροφορίες δημιουργούμε ένα συγκεντρωτικό σχήμα για τις δύο προσομοιώσεις:



Σχήμα 5.18-Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με υλικό φιλμ Pb και AgBr

Με βάση το παραπάνω σχήμα προκύπτει πως η δόση ανά μονάδα μάζας (eV/g) είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση του μολύβδου. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας που παρουσιάζει ο μόλυβδος (11.34 gr/cm^3) σε σχέση με το βρωμιούχο άργυρο (6.473 gr/cm^3). Ως πιο πυκνό υλικό δηλαδή ο μόλυβδος απορροφά περισσότερη ενέργεια. Ωστόσο, η διαφορά που παρατηρείται στην απορροφούμενη δόση δεν είναι ιδιαίτερη μεγάλη.

5.8 Μελέτη χωρικής διακριτικής ικανότητας της μηχανής ακτίνων X

Με τη διερεύνηση της επίδρασης της ενέργειας αποκοπής, του συντελεστή σκεδάσεων και του υλικού του φιλμ στο ραδιογραφικό αποτέλεσμα, ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας που αναπτύχθηκε για τη μελέτη της διακριτικής ικανότητας της μηχανής ακτίνων-X. Η παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε αφορά σε 4 παραμέτρους της διαδικασίας απεικόνισης:

- Το μέγεθος του εστιακού σημείου της μηχανής των ακτίνων-X.
- Το λόγο της απόστασης της μηχανής ακτίνων-X από τα δοκίμια δοκιμών προς το λόγο της απόστασης των δοκιμών δοκιμής από το φιλμ.
- Η απόσταση μεταξύ των δοκιμών δοκιμής.
- Την τιμή της ενέργειας των ακτίνων-X που εκπέμπονται.

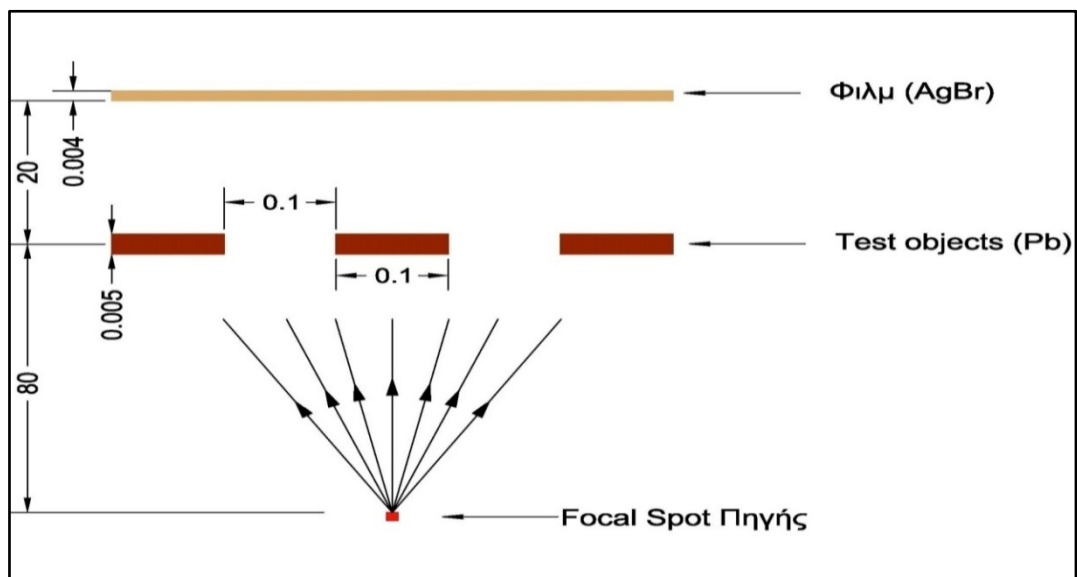
5.8.1 Το μέγεθος του εστιακού σημείου

Η πρώτη παράμετρος που μελετήθηκε αφορά το μέγεθος του εστιακού σημείου της μηχανής ακτίνων-Χ. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν συγκεκριμένες διαστάσεις του σημείου, ώστε να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο το μέγεθός του σημείου μπορεί να επηρεάσει το τελικό ραδιογραφικό αποτέλεσμα.

Για την παραμετρική μελέτη επιλέχθηκαν τα ακόλουθα μεγέθη για το focal spot της μηχανής των ακτίνων Χ:

- i. $0.03 \times 0.03 \text{ cm}^2$
- ii. $0.05 \times 0.05 \text{ cm}^2$
- iii. $0.10 \times 0.10 \text{ cm}^2$
- iv. $0.12 \times 0.12 \text{ cm}^2$
- v. $0.20 \times 0.20 \text{ cm}^2$
- vi. $0.30 \times 0.30 \text{ cm}^2$
- vii. $0.50 \times 0.50 \text{ cm}^2$

Για την παραμετρική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια από μόλυβδο διαστάσεων χωρικής συχνότητας 1 L/mm. Τα δοκίμια έχουν διαστάσεις $0.5 \times 0.1 \times 0.005$ (cm). Ως φιλμ χρησιμοποιήθηκε ένα σώμα από βρωμιούχο άργυρο (AgBr) διαστάσεων $0.5 \times 0.5 \times 0.004$ (cm), το οποίο θα οριστεί στο αρχείο δεδομένων εισόδου ως ανιχνευτής δόσης. Επιπλέον θεωρήθηκε μονοενεργειακή πηγή ακτινοβολίας με ενέργεια ίση με 30 keV. Η διάταξη του πειράματος απεικονίζεται στο σχήμα 5.19.



Σχήμα 5.19-Διάταξη προσομοίωσης

Το αντίστοιχο τμήμα του αρχείου εισόδου παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:

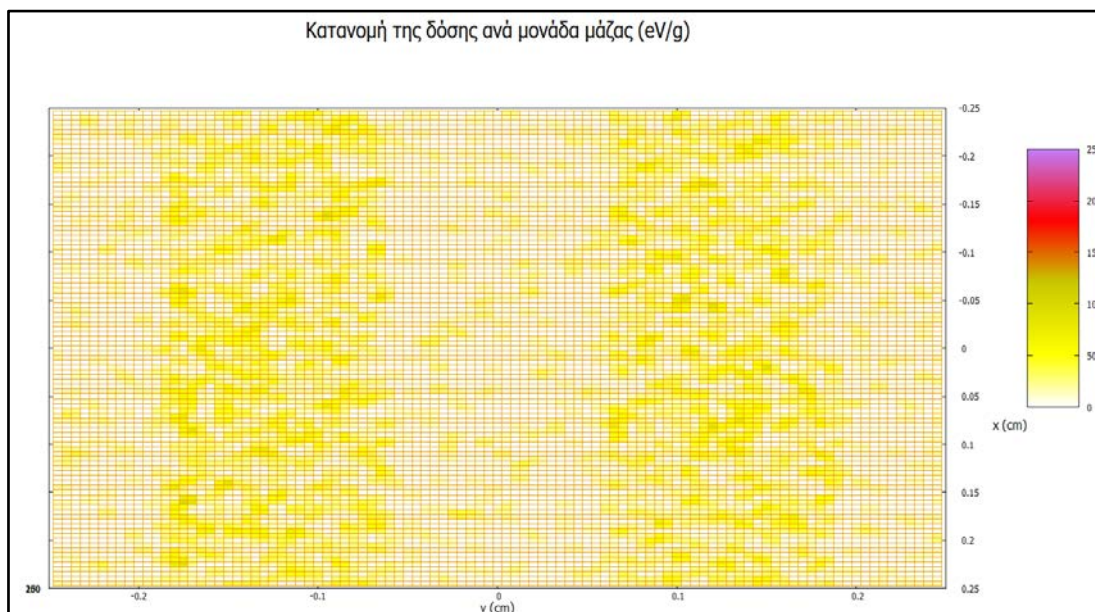
```
TITLE Pb bricks
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 3e4 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
CROFFT 0 0 80 [Coordinates of the source]
SBOX 0.1 0.1 0 [Source box dimensions]
SCONE 0 0 25 [Conical beam; angles in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Pb.mat [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 3e2 3e2 3e2 0.1 0.1 1.5e4 1.5e4 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
```

Σχήμα 5.20-Τμήμα αρχείου εισόδου δεδομένων

Στο σημείο αυτό και πριν παρουσιασθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για διάφορα μεγέθη εστιακού σημείου (focal spot) έχει ενδιαφέρον να παρουσιασθούν τα αποτελέσματα μίας προσομοίωσης που έγινε για μικρό σχετικά πλήθος φωτονίων, κάτι που δείχνει καθαρά το φαινόμενο του κβαντικού θορύβου. Για τη συγκεκριμένη προσομοίωσης επιλέχθηκε focal spot διαστάσεων 0.03×0.03 (cm²). Στο αρχείο αποτελεσμάτων renmain.dat της προσομοίωσης καταγράφεται:

- αριθμός φωτονίων που έχουν προσομοιωθεί: 1.214104×10^8 φωτόνια
- διάρκεια προσομοίωσης : 3.114559×10^2 sec
- ταχύτητα προσομοίωσης : 3.898156×10^5 showers/sec

Στο σχήμα 5.21 παρατίθεται το σχετικό σχήμα αποτελεσμάτων.

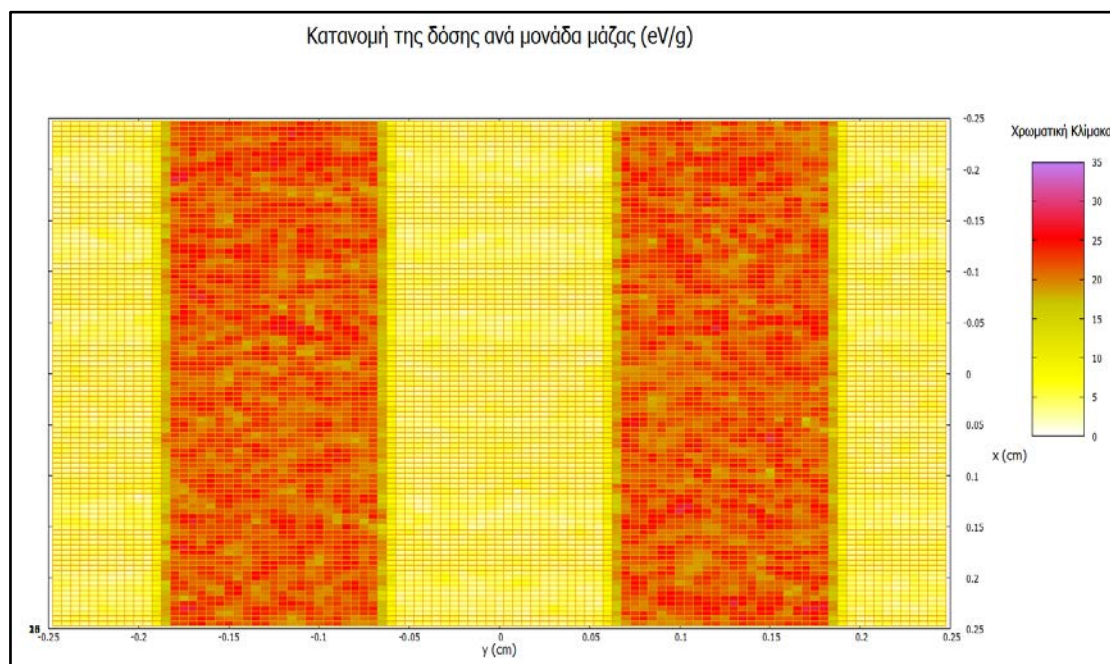


Σχήμα 5.21-Παράδειγμα εμφάνισης κβαντικού θορύβου

Σε σχήμα 5.21 είναι εμφανής ο κβαντικός θόρυβος, το σύνολο των στιγμάτων που εμφανίζονται στο φιλμ τη στιγμή λήψης της πληροφορίας. Ο αριθμός των φωτονίων που έχουν προσομοιωθεί είναι μικρός, γεγονός που δικαιολογεί την έντονη εμφάνιση του φαινομένου. Με την εξέλιξη της προσομοίωσης και των αύξηση των φωτονίων που τελικά αλληλεπιδρούν με το φιλμ, ο κβαντικός θόρυβος θα μειωθεί σημαντικά με παράλληλη ωστόσο αύξηση της δόσης.

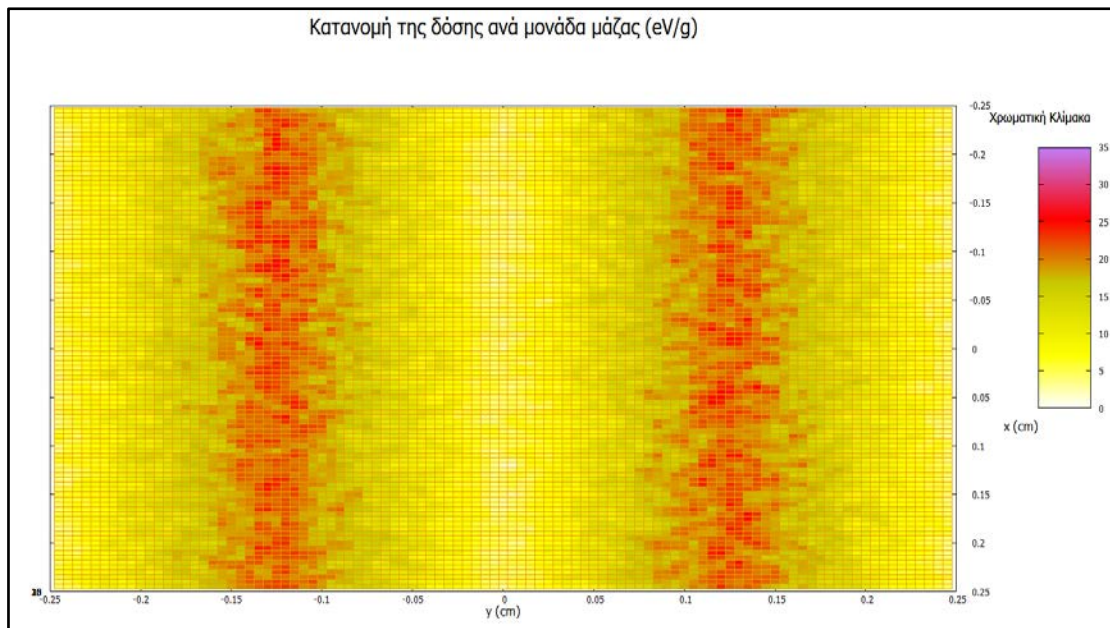
Στη συνέχεια της παραγράφου παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με διαφορετικά μεγέθη του focal spot. Αρχικά, παρατίθενται δύο σχήματα 5.22 και 5.23, τα οποία αντιστοιχούν στην εικόνα που δίνει το πρόγραμμα gnuplot.exe για τις οριακές τιμές του focal spot που δοκιμάστηκαν, $0.03 \times 0.03 \text{ cm}^2$ και $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$, όπου διαπιστώνεται η σαφής μεταβολή της ασάφειας των ορίων. Στη συνέχεια ακολουθούν τα γραφήματα, τα οποία έχουν προκύψει από την επεξεργασία των πρωτογενών αποτελεσμάτων για όλες τις διαστάσεις του focal spot που προσομοιώθηκαν.

- Προσομοίωση με μέγεθος focal spot $0.03 \times 0.03 \text{ cm}^2$



Σχήμα 5.22-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με χρωματική κλίμακα με μέγεθος focal spot $0.03 \times 0.03 \text{ cm}^2$

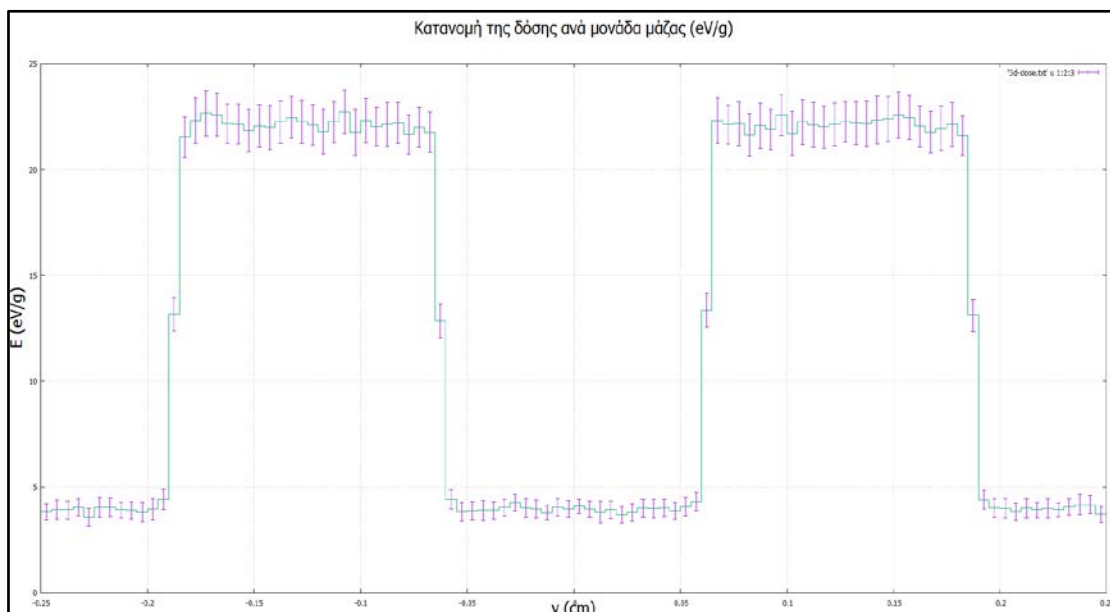
- Προσομοίωση με μέγεθος focal spot $0.5 \times 0.5 \text{ (cm}^2\text{)}$



Σχήμα 5.23-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με χρωματική κλίμακα με μέγεθος focal spot $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$

Αναλυτικότερα για κάθε διάσταση παρουσιάζεται το σχετικό γράφημα καθώς και στοιχεία για το πλήθος ιστοριών που προσομοιώθηκαν και για την ταχύτητα και διάρκεια της προσομοίωσης.

- iii. Διαστάσεις focal spot $0.03 \times 0.03 \text{ cm}^2$

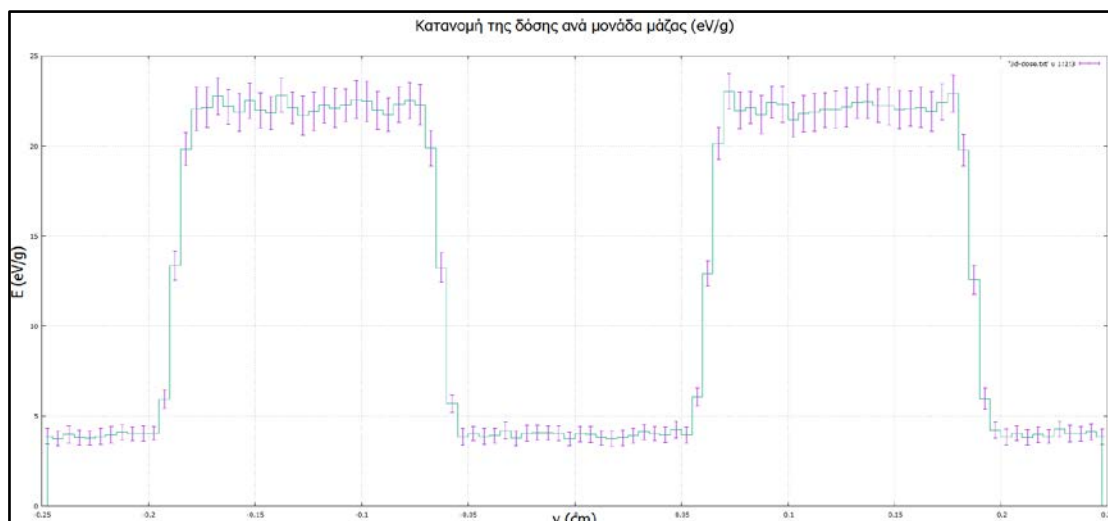


Σχήμα 5.24-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με μέγεθος focal spot $0.03 \times 0.03 \text{ cm}^2$

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $2.320450 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $4.309509 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

iv. **Διαστάσεις focal spot $0.05 \times 0.05 \text{ cm}^2$**

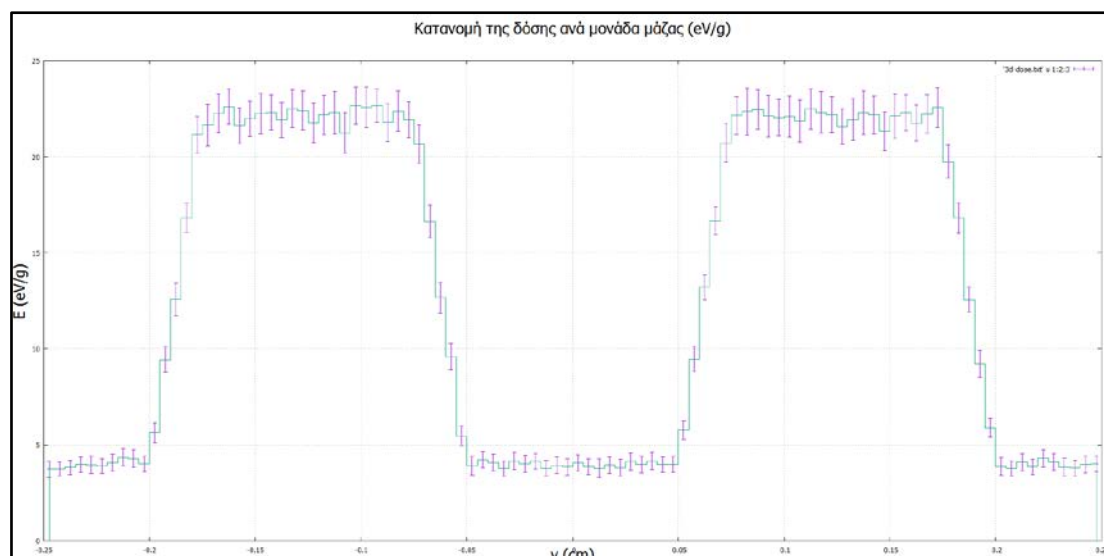


Σχήμα 5.25-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με μέγεθος focal spot $0.05 \times 0.05 \text{ cm}^2$

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες :

- διάρκεια προσομοίωσης : $2.439839 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $4.098632 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

v. **Διαστάσεις focal spot $0.1 \times 0.1 \text{ cm}^2$**

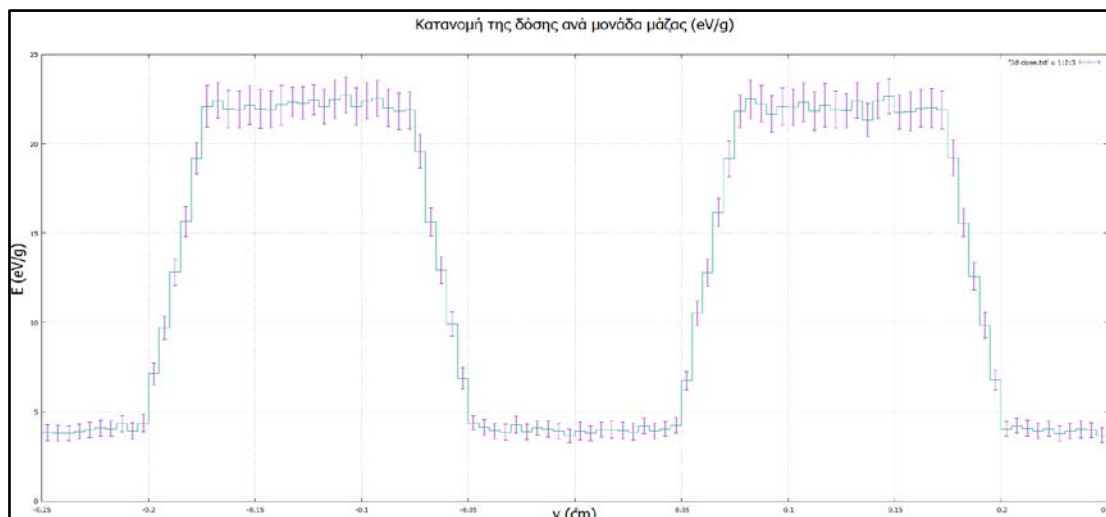


Σχήμα 5.26-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με μέγεθος focal spot $0.1 \times 0.1 \text{ cm}^2$

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $7.307714 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης $1.368417 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

vi. **Διαστάσεις focal spot $0.12 \times 0.12 \text{ cm}^2$**

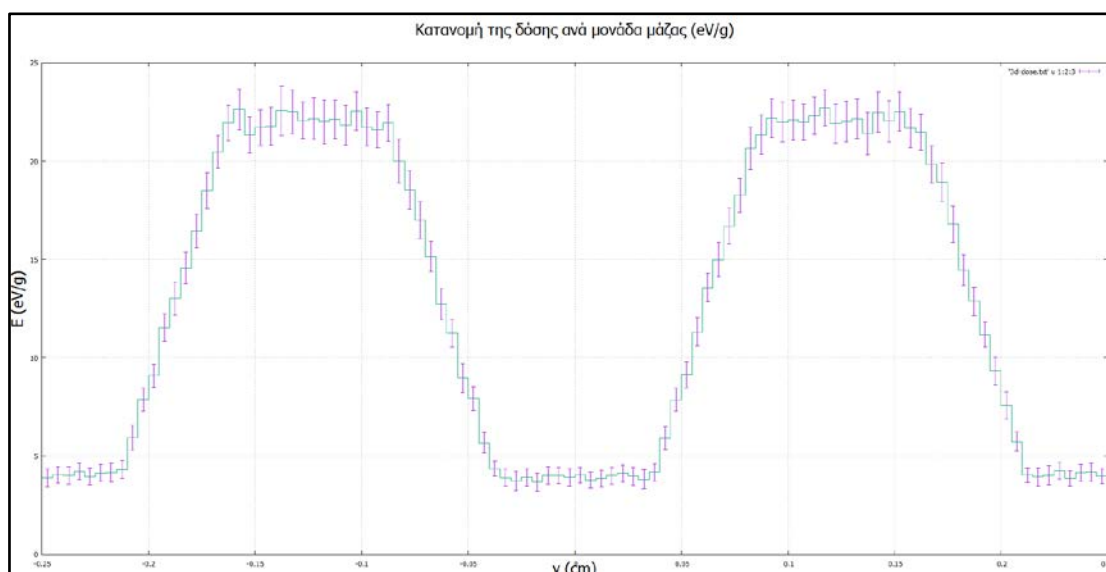


Σχήμα 5.27-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με μέγεθος focal spot $0.12 \times 0.12 \text{ cm}^2$

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $2.451741 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $4.078733 \times 10^5 \text{ showers/sec.}$

vii. **Διαστάσεις focal spot $0.2 \times 0.2 \text{ cm}^2$**

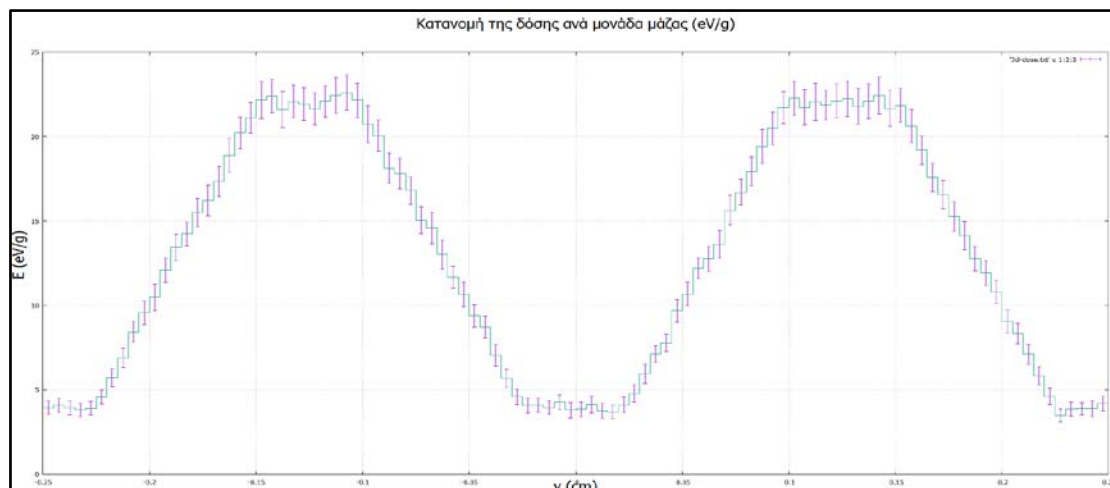


Σχήμα 5.28-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με μέγεθος focal spot $0.2 \times 0.2 \text{ cm}^2$

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $7.332572 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.363778 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

viii. **Διαστάσεις focal spot $0.3 \times 0.3 \text{ cm}^2$**

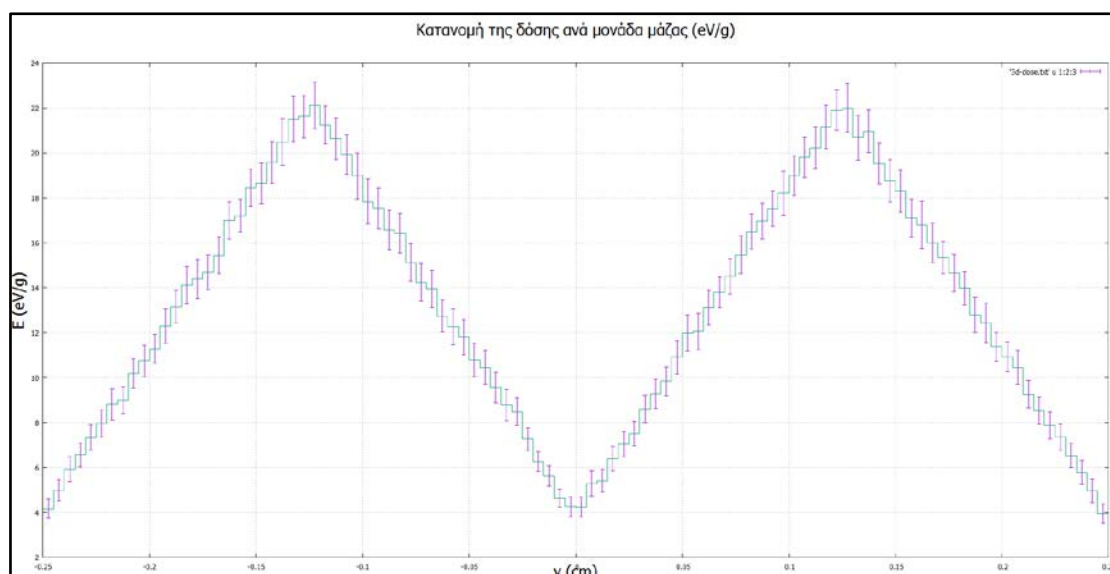


Σχήμα 5.29-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με μέγεθος focal spot $0.3 \times 0.3 \text{ cm}^2$

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $5.571659 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.794797 \times 10^5 \text{ showers/sec.}$

ix. **Διαστάσεις focal spot $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$**

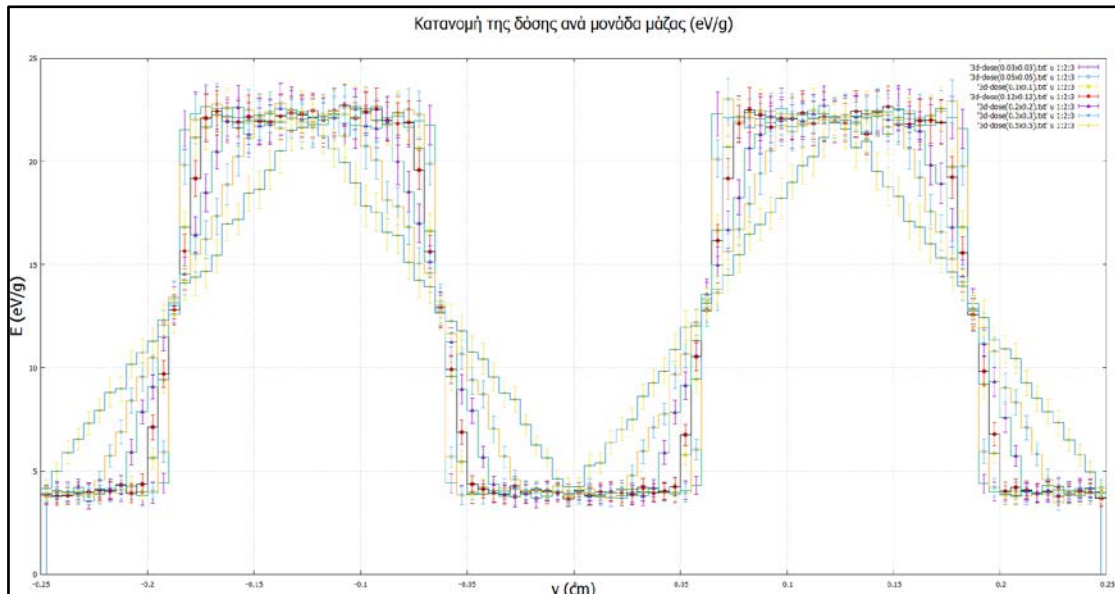


Σχήμα 5.20-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με μέγεθος focal spot $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

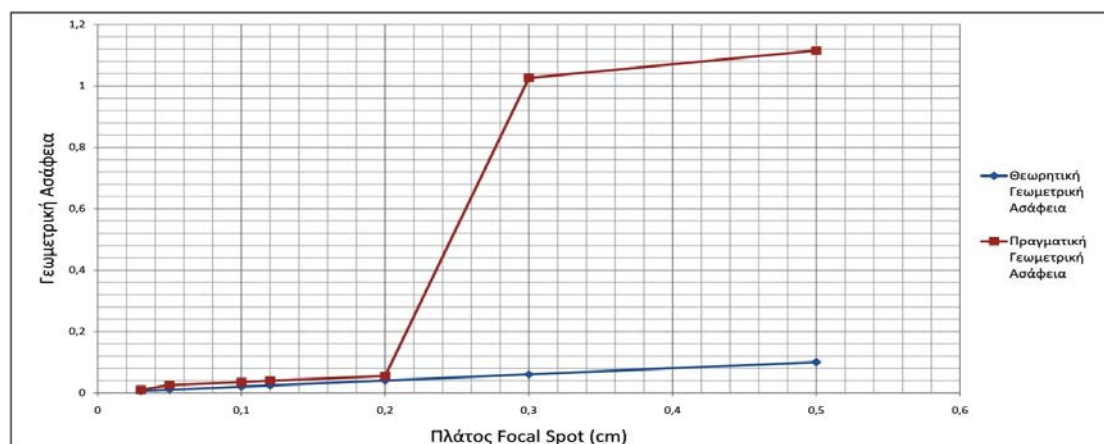
- διάρκεια προσομοίωσης : $7.364673 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.357833 \times 10^5 \text{showers/sec.}$

Στο παρακάτω διάγραμμα 5.31 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω προσομοιώσεων, όπου φαίνεται σαφέστατα η επίδραση του μεγέθους του focal spot.



Σχήμα 5.31-Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης για διάφορα μεγέθη focal spot

Στο διάγραμμα 5.32 απεικονίζεται η θεωρητικής και η πραγματικής γεωμετρικής ασάφειας όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όπως διαπιστώνεται υπάρχει ικανοποιητική σύγκλιση μέχρι του μεγέθους focal spot $0.2 \times 0.2 \text{ cm}^2$.

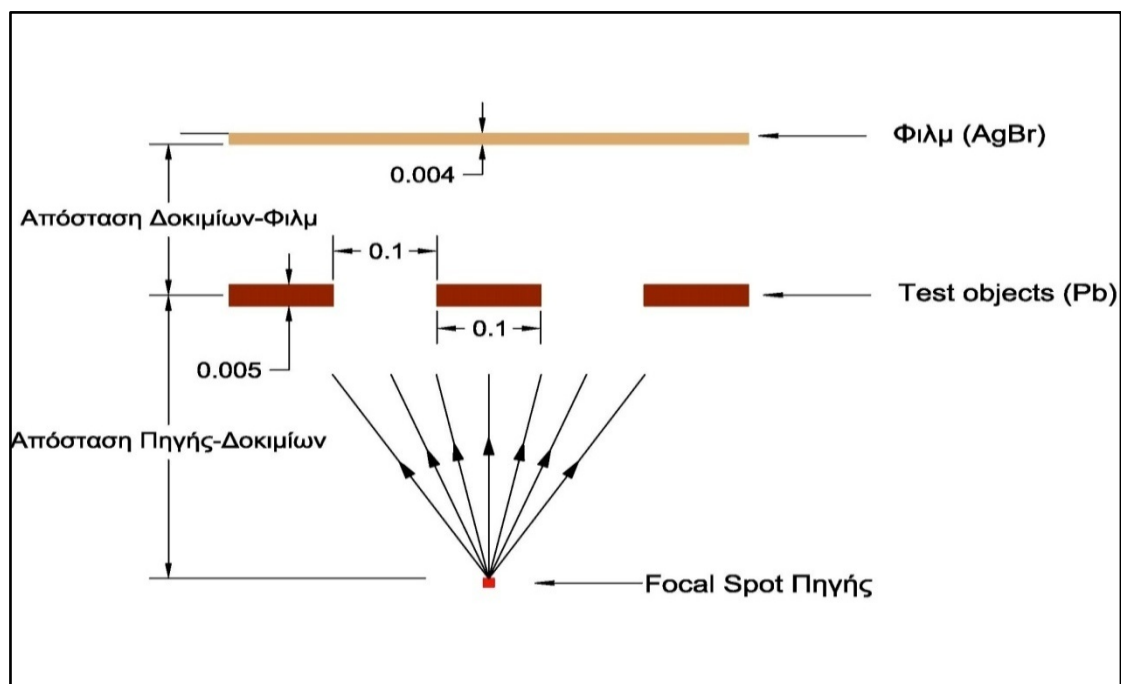


Σχήμα 5.32-Σύγκριση της πραγματικής και θεωρητικής γεωμετρικής ασάφειας συναρτήσει του πλάτους του focal spot

5.8.2 Η μεταβολή της απόστασης μεταξύ δοκιμίων δοκιμής και φιλμ

Ο δεύτερος παράγοντας που εξετάστηκε είναι η απόσταση των δοκιμίων δοκιμής από το φιλμ για δεδομένη απόσταση πηγής-φιλμ. Δηλαδή έγινε μεταβολή της θέσης των test objects μεταξύ μηχανής των ακτίνων-X (focal spot) και φιλμ.

Για την παραμετρική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια από μόλυβδο διαστάσεων χωρικής συχνότητας 1 Lpmm. Τα δοκίμια έχουν διαστάσεις 0.5 x 0.1 x 0.005 (cm). Η διάταξη του πειράματος απεικονίζεται στο σχήμα 5.33:



Σχήμα 5.33-Διάταξη προσομοίωσης

Ως φιλμ χρησιμοποιήθηκε πλάκα από AgBr διαστάσεων 0.5 x 0.5 x 0.004 (cm), το οποίο θα οριστεί στο αρχείο δεδομένων εισόδου ως ανιχνευτής δόσης. Οι διαστάσεις του εστιακού σημείου είναι 0.1 x 0.1 cm², ενώ θεωρήθηκε μονοενεργειακή πηγή ακτινοβολίας ενέργειας ίση με 30 keV. Με βάση το σχήμα 5.34 οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τις ακόλουθες αποστάσεις:

- i. απόσταση δοκιμίων-φιλμ 0 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 100 cm (το φιλμ βρίσκεται σε επαφή με τα δοκίμια)
- ii. απόσταση δοκιμίων-φιλμ 10 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 90 cm
- iii. απόσταση δοκιμίων-φιλμ 20 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 80 cm
- iv. απόσταση δοκιμίων-φιλμ 30 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 70 cm
- v. απόσταση δοκιμίων-φιλμ 40 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 60 cm
- vi. απόσταση δοκιμίων-φιλμ 50 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 50 cm

- vii. απόσταση δοκιμίων-φιλμ 40 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 60 cm
- viii. απόσταση δοκιμίων-φιλμ 30 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 70 cm

Τμήμα αρχείου εισόδου δεδομένων παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 5.34, όπου επισημαίνονται τα σημεία στα οποία γίνονται μεταβολές σε κάθε προσομοίωση αυτής της ομάδας:

```

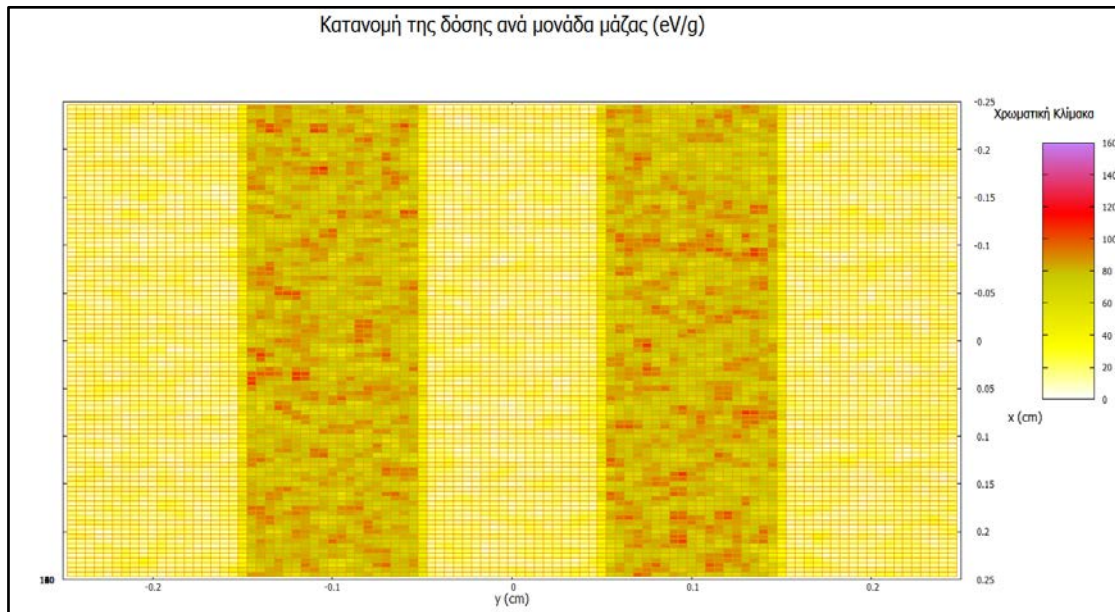
TITLE Pb bricks
.
>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 3e4 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 -100 [Coordinates of the source]
SBOX 0.1 0.1 0 [Source box dimensions]
SCONE 0 0 25 [Conical beam; angles in deg]
.
>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Pb.mat [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 3e2 3e2 3e2 0.1 0.1 1.5e4 1.5e4 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME AgBr.mat [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 3e2 3e2 3e2 0.1 0.1 1.5e4 1.5e4 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN brick.geo [Geometry file, up to 20 chars]
.
>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE 0 3e4 1000 [Energy window and no. of bins]
NBANGL 45 18 [No. of bins for the angles THETA and PHI]
.
>>>>>> Energy deposition detectors (up to 25).
ENDETC 0.0 3e4 1000 [Energy window and number of bins]
EDBODY 1 [Active body; one line for each body]
.
>>>>>> Dose distribution.
GRIDX -0.25 0.25 [X coordinates of the enclosure vertices]
GRIDY 0.25 0.25 [Y coordinates of the enclosure vertices]
GRIDZ 0.0025 0.0065 [Z coordinates of the enclosure vertices]
GRIDBN 100 100 1 [Numbers of bins]
.
>>>>>> Job properties
RESUME dump.dmp [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump.dmp [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP 10000 [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH 1e10 [Desired number of simulated showers]
TIME 1e10 [Allotted simulation time, in sec]
.
END [Ends the reading of input data]

```

Σχήμα 5.34-Τμήμα αρχείου εισόδου δεδομένων

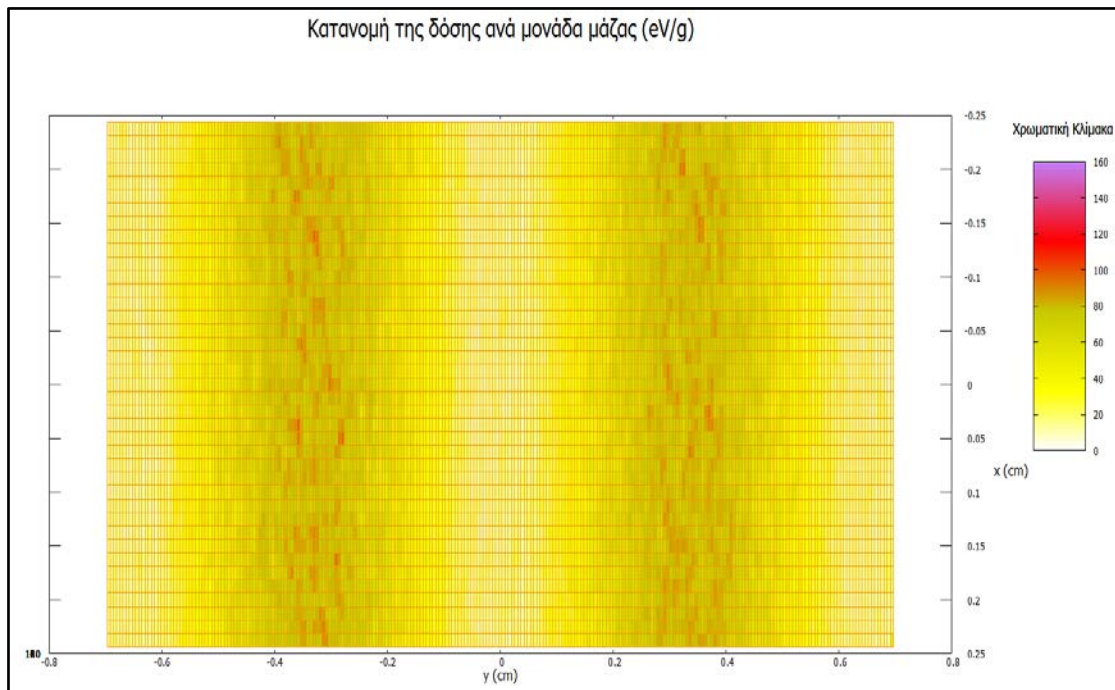
Στη συνέχεια της παραγράφου, αρχικά θα απεικονιστεί η ποιοτική μεταβολή στο ραδιογραφικό αποτέλεσμα εξετάζοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε δύο από τις παραπάνω περιπτώσεις:

- Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 0 cm και απόσταση πηγής-δοκιμίων 100 cm:



Σχήμα 5.35-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με χρωματική κλίμακα για απόσταση πηγής δοκιμίων 100 cm και απόσταση δοκιμίων φιλμ 0 cm

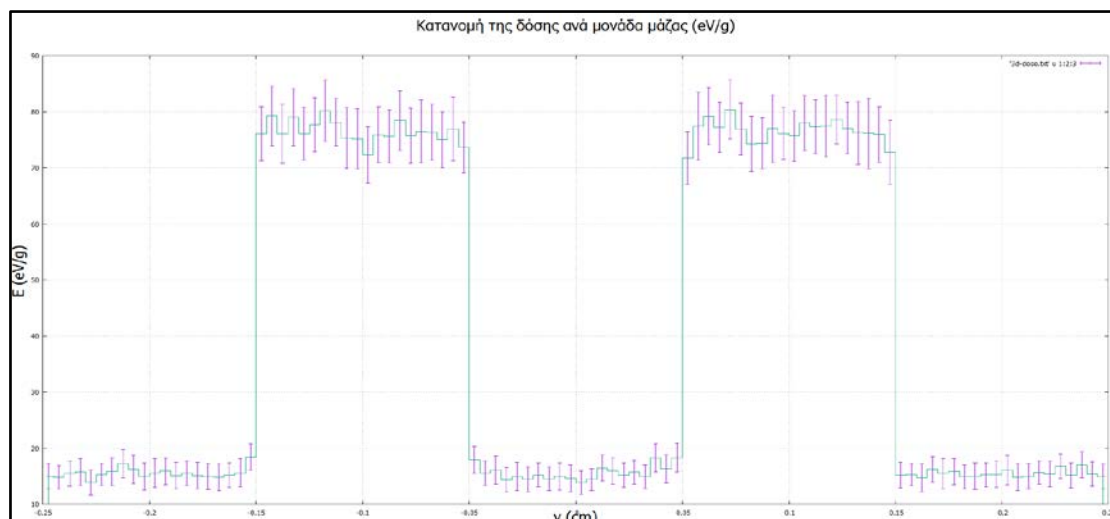
- Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 70 cm και απόσταση πηγής-δοκιμίων 30 cm:



Σχήμα 5.36-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμίων φιλμ 70 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 30 cm

Ακολουθως παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τους διάφορους συνδυασμούς αποστάσεων μεταξύ πηγής-δοκιμίων και δοκιμίων-φιλμ:

i. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 0 cm, απόσταση πηγής-δοκιμίων 100 cm:

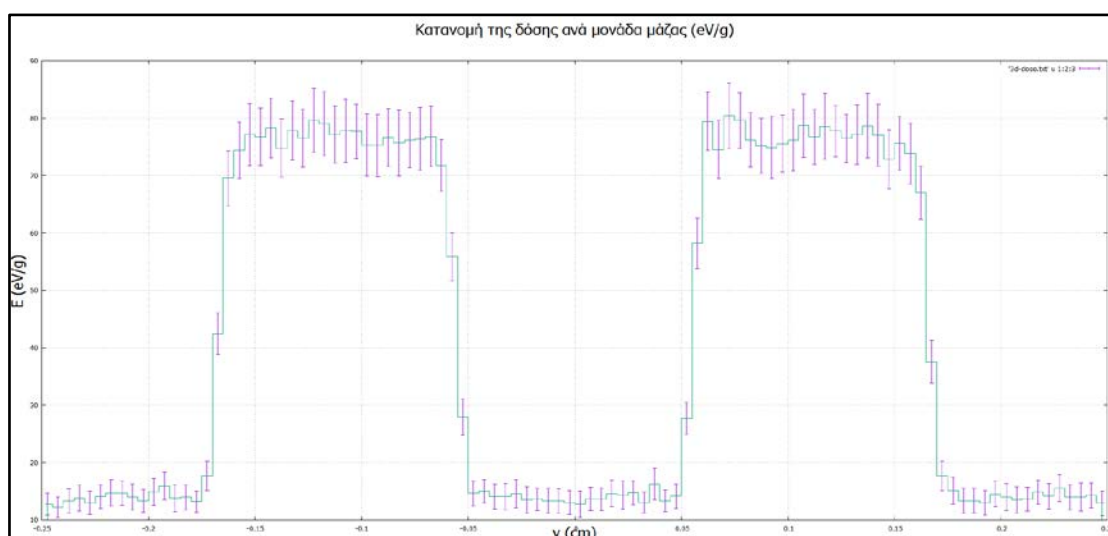


Σχήμα 5.37-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση πηγής δοκιμίων 100 cm και απόσταση δοκιμίων φιλμ 0 cm

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $2.724204 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $3.670797 \times 10^5 \text{ showers/sec.}$

ii. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 10 cm, απόσταση πηγής-δοκιμίων 90 cm

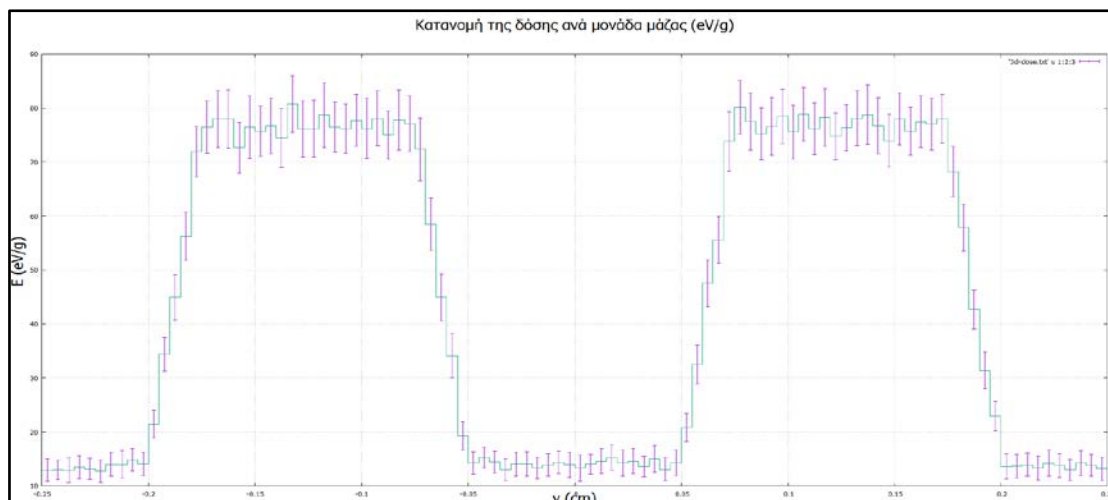


Σχήμα 5.38-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμίων φιλμ 10 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 90 cm

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $2.972841 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $3.363785 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

iii. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 20 cm, απόσταση πηγής-δοκιμίων 80 cm

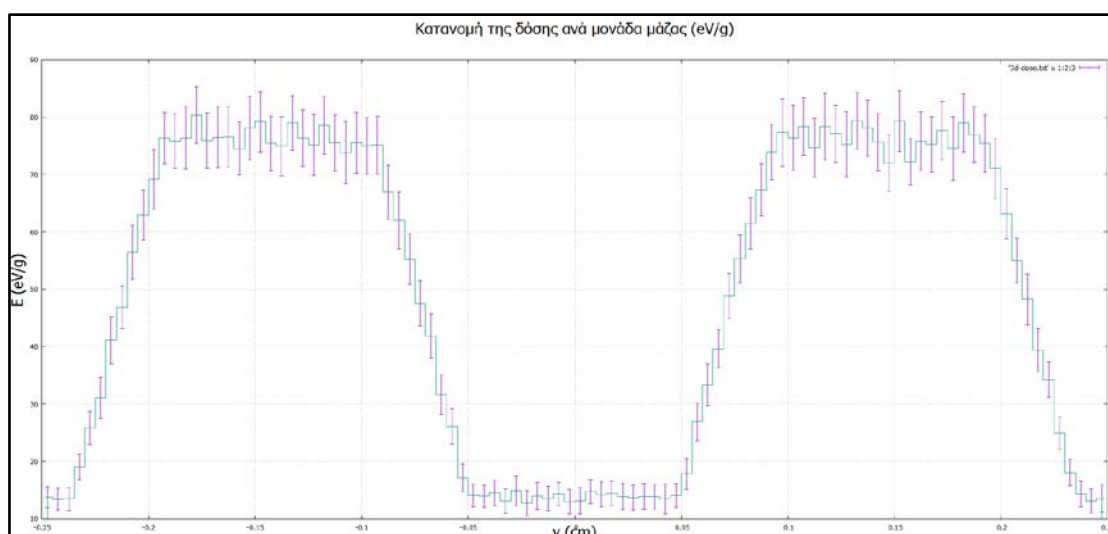


Σχήμα 5.39-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμίων φιλμ 20 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 80 cm

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $2.955629 \times 10^4 \text{se}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $3.383374 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

iv. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 30 cm, απόσταση πηγής-δοκιμίων 70 cm

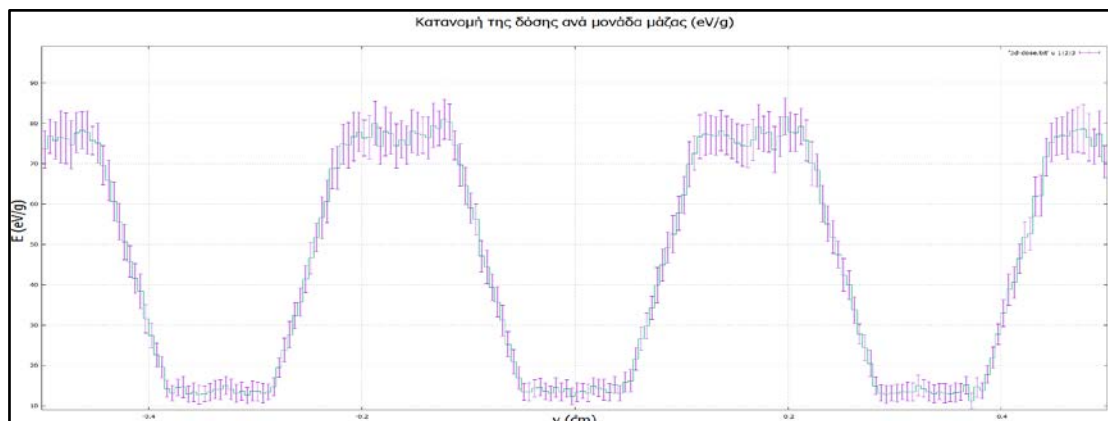


Σχήμα 5.40-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμίων φιλμ 30 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 70 cm

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $2.535050 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $3.944695 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

v. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 40 cm, απόσταση πηγής-δοκιμίων 60 cm



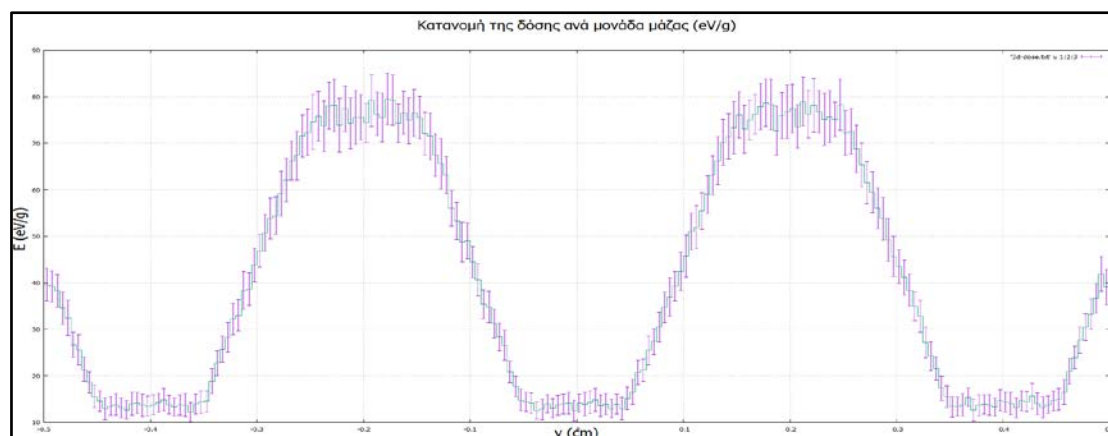
Σχήμα 5.41-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμίων φιλμ 40 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 60 cm

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $9.557773 \times 10^4 \text{se}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.046269 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση η ανάλυση του ανιχνευτή δόσης ήταν $50 \times 200 \times 1$.

vi. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 50 cm και απόσταση πηγής-δοκιμίων 50 cm



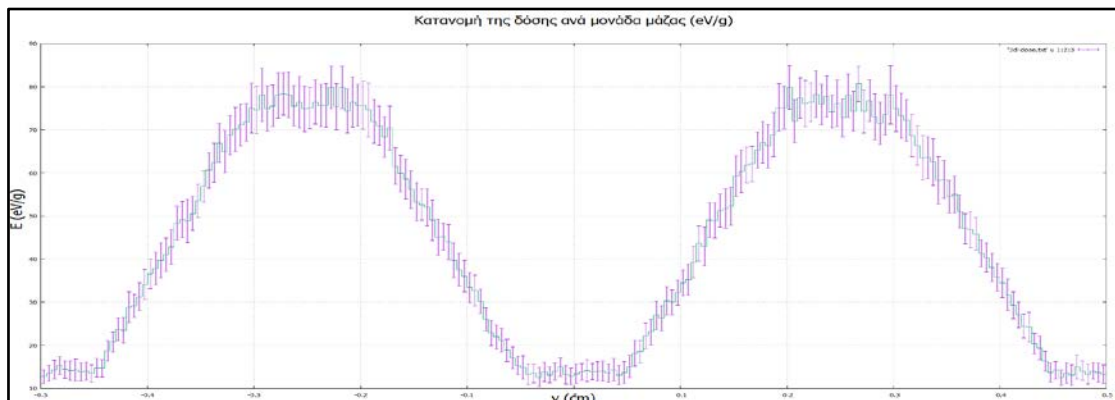
Σχήμα 5.42-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμίων φιλμ 50 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 50 cm

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $9.614012 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.040148 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση η ανάλυση του ανιχνευτή δόσης ήταν $50 \times 200 \times 1$.

vii. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 60 cm και απόσταση πηγής-δοκιμίων 40 cm



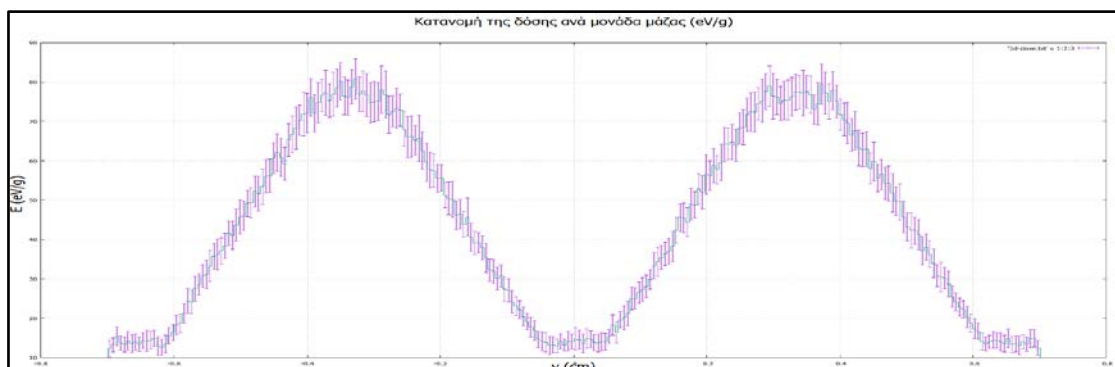
Σχήμα 5.43-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμίων φιλμ 60 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 40 cm

Από το αρχείο renmain.dat της προσομοίωσης παίρνουμε τις εξής:

- διάρκεια προσομοίωσης : $9.712000 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.029654 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση η ανάλυση του ανιχνευτή δόσης ήταν $50 \times 200 \times 1$.

viii. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 70 cm και απόσταση πηγής-δοκιμίων 30 cm



Σχήμα 5.44-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμίων φιλμ 70 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 30cm

Στο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

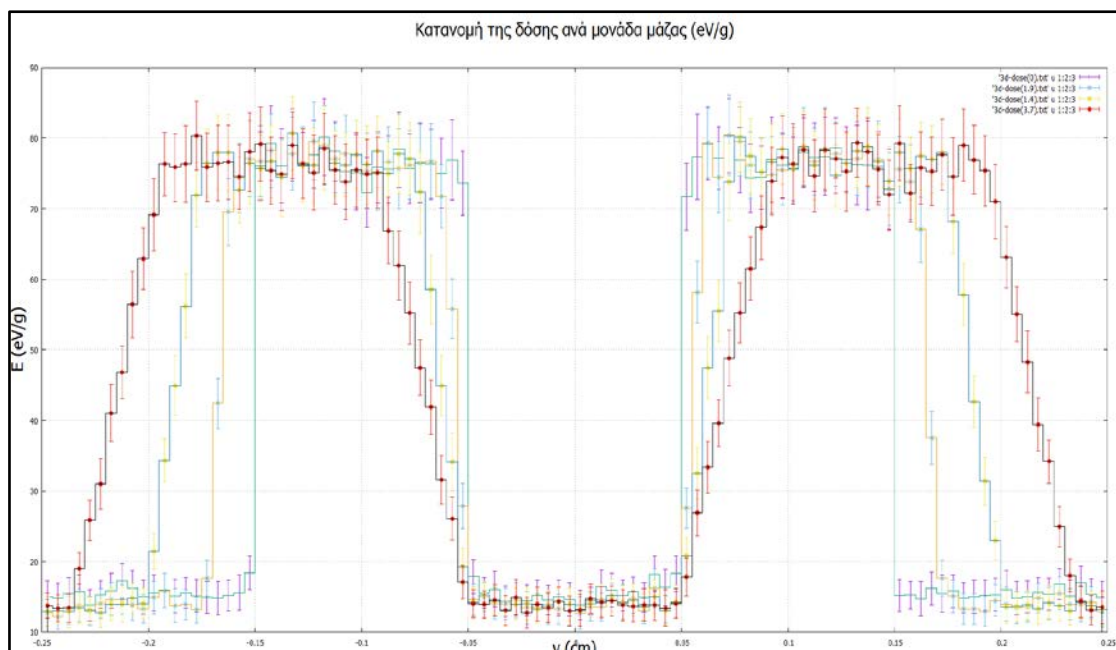
- διάρκεια προσομοίωσης : $5.091708 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.963978 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση η ανάλυση του ανιχνευτή δόσης ήταν $40 \times 250 \times 1$.

Όπως σημειώνεται στις προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, λόγω της μεγέθυνσης της εικόνας των test objects, χρειάστηκε να μεγαλώσουν οι διαστάσεις του φιλμ απεικόνισης. Για το λόγο αυτό και προκειμένου να μην αλλάξει το μέγεθος του κάθε στοιχείου της εικόνας, η αλλαγή αυτή έγινε τροποποιώντας τις διαστάσεις του dose enclosure από $100 \times 100 \times 1$ σε $50 \times 200 \times 1$ και $40 \times 250 \times 1$. Στα γραφήματα που ακολουθούν παρατίθενται τα γραφήματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως ομαδοποιημένα, σε δύο ομάδες.

▪ Απεικόνιση προσομοιώσεων με ανάλυση ανιχνευτή $100 \times 100 \times 1$

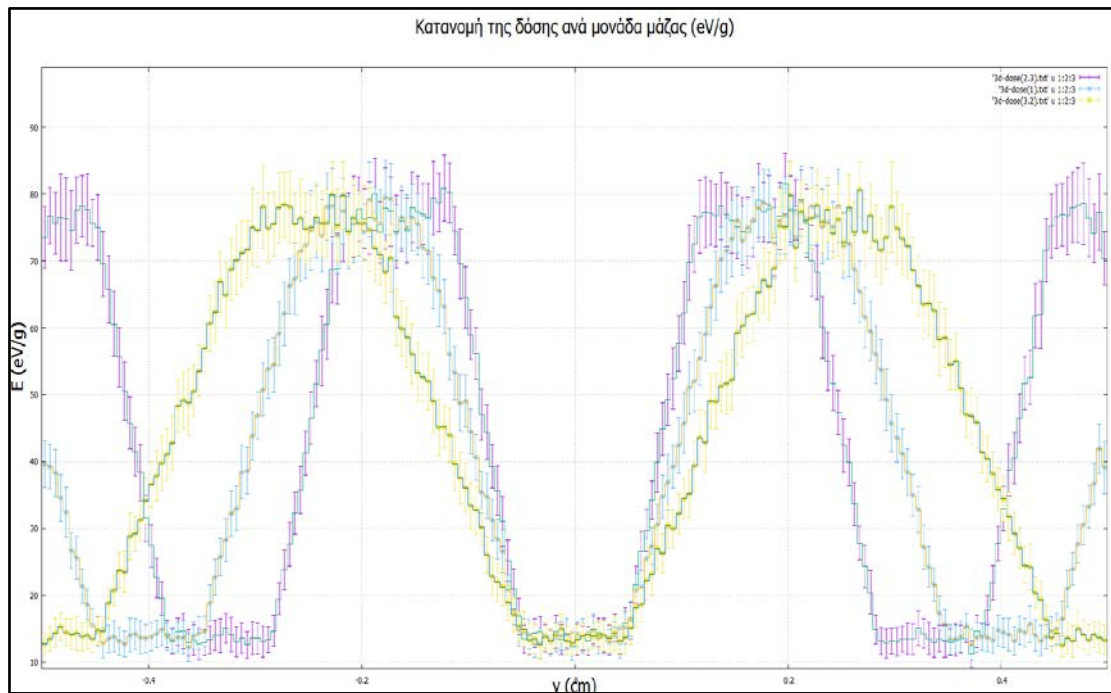
Η πρώτη ομάδα προσομοιώσεων αφορά εκείνες όπου ορίστηκε ανάλυση ανιχνευτή δόσης $100 \times 100 \times 1$. Πρόκειται για τις προσομοιώσεις i, ii, iii, iv. Ακολουθεί το αντίστοιχο σχήμα.



Σχήμα 5.45-Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με ανάλυση ανιχνευτή $100 \times 100 \times 1$

- **Απεικόνιση προσομοιώσεων με ανάλυση ανιχνευτή 50 x 200 x 1**

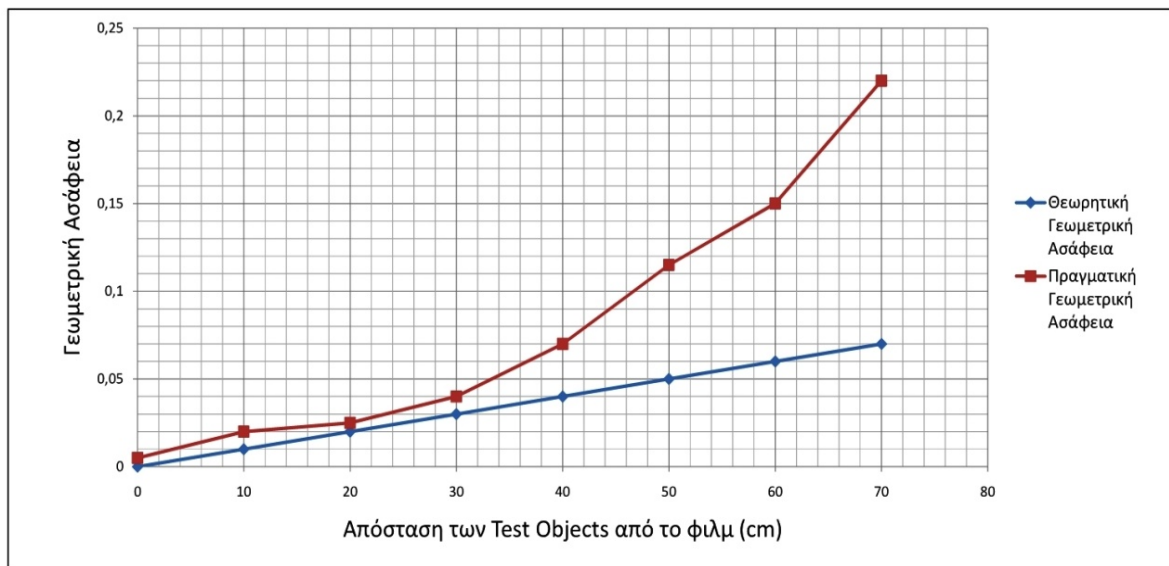
Η δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων αφορά εκείνες όπου ορίστηκε ανάλυση ανιχνευτή δόσης 50 x 200 x 1. Πρόκειται για τις προσομοιώσεις ν, νί, νii. Ακολουθεί το αντίστοιχο σχήμα:



Σχήμα 5.46-Απεικόνιση των αποτελεσμάτων στις προσομοιώσεις με ανάλυση ανιχνευτή 50 x 200 x 1

Τέλος στην ανάλυση 40 x 250 x 1 αντιστοιχεί μία μόνο προσομοίωση περίπτωση (viii), συνεπώς δε τίθεται θέμα συγκριτικού διαγράμματος.

Στο σχήμα 5.47 απεικονίζεται η μεταβολή της θεωρητικής και της πραγματικής ασάφειας που προκύπτει από το ραδιογραφικό αποτέλεσμα σε σχέση με την απόσταση των test objects από το φιλμ. Όπως διαπιστώνεται μέχρι την απόσταση 30 cm μεταξύ των test objects και του φιλμ τα θεωρητικά αποτελέσματα συμπίπτουν ικανοποιητικά με τα πειραματικά.

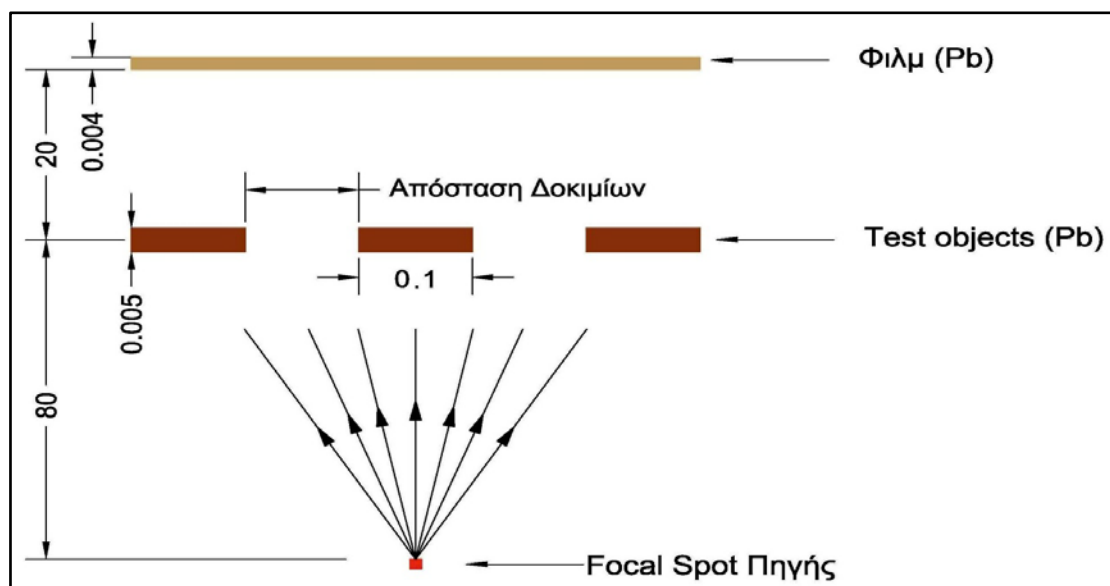


Σχήμα 5.47- Σύγκριση της πραγματικής και θεωρητικής γεωμετρικής ασάφειας συναρτήσει της απόστασης των test objects από το φιλμ ραδιογραφίας

5.8.3 Η μεταβολή της απόστασης μεταξύ των δοκιμών δοκιμής

Σε αυτό το σημείο θα εξεταστεί η επιρροή της μεταβολής της οριζόντιας απόστασης μεταξύ των test object στο ραδιογραφικό αποτέλεσμα. Η μεταβολή αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με τη μεταβολή της χωρικής συχνότητας των δοκιμών δοκιμής, διότι σε αυτή τη περίπτωση μεταβάλλεται μόνο η απόσταση των δοκιμών δοκιμής και όχι το πλάτος των δοκιμών δοκιμής.

Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από μόλυβδο διαστάσεων 0.5 x 0.1 x 0.005 (cm). Η διάταξη του πειράματος απεικονίζεται στο σχήμα 5.48:



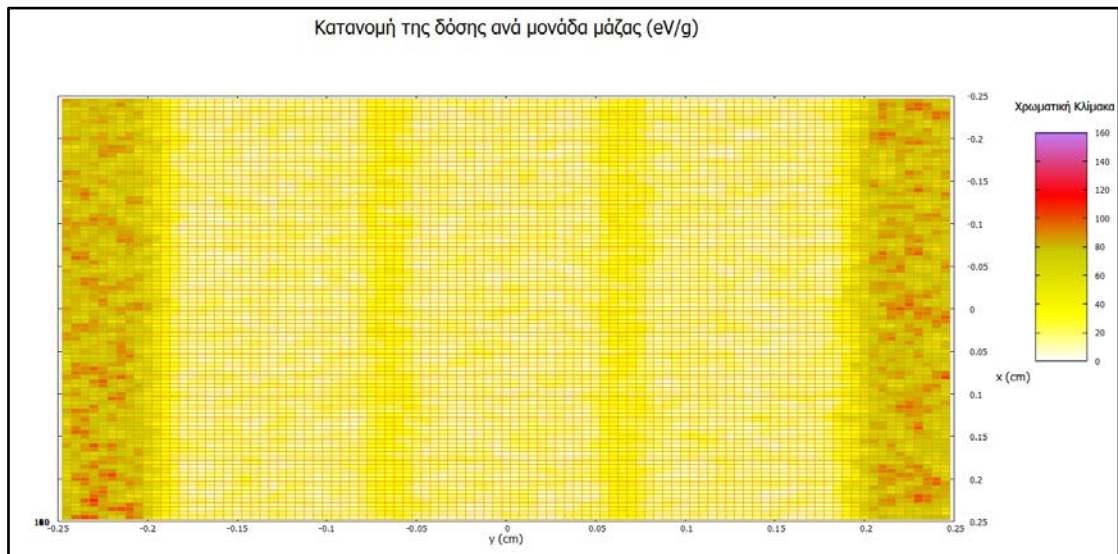
Σχήμα 5.48-Διάταξη προσομοίωσης

Ως φιλμ χρησιμοποιήθηκε ένα σώμα από AgBr διαστάσεων 0.5 x 0.5 x 0.004 cm, το οποίο θα οριστεί στο αρχείο δεδομένων εισόδου ως ανιχνευτής δόσης. Οι διαστάσεις του εστιακού σημείου είναι 0.1 x 0.1 cm², ενώ θεωρήθηκε μονοενεργειακή πηγή ακτινοβολίας με ενέργεια ίση με 30 keV. Παράλληλα το δοκίμια βρίσκονται σε απόσταση 80 cm από την πηγή ενώ ο ανιχνευτής δόσης απέχει από το δοκίμια 20 cm. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν έγιναν με βάση τις παρακάτω τιμές απόστασης των δοκιμίων:

- i.** Απόσταση δοκιμίων 1.5 mm
- ii.** Απόσταση δοκιμίων 1.0 mm
- iii.** Απόσταση δοκιμίων 0.8 mm
- iv.** Απόσταση δοκιμίων 0.5 mm
- v.** Απόσταση δοκιμίων 0.3 mm
- vi.** Απόσταση δοκιμίων 0.1 mm
- vii.** Απόσταση δοκιμίων 0.05 mm

Στο σύνολο των προσομοιώσεων αυτής της ομάδας το αρχείο εισόδου δεδομένων παραμένει χωρίς μεταβολές. Οι μεταβολές στη γεωμετρία των test objects περιλαμβάνονται στο αντίστοιχο αρχείο γεωμετρίας της εκάστοτε προσομοίωσης, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:

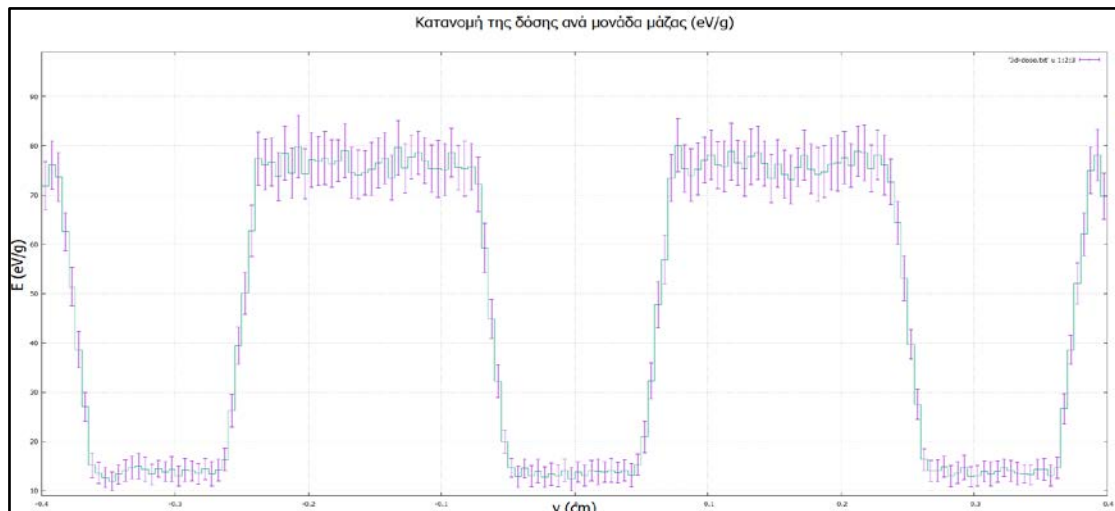
- **Απόσταση δοκιμίων δοκιμής 0.05 mm**



Σχήμα 5.51-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με χρωματική κλίμακα με απόσταση δοκιμίων 0.05 mm

Ακολούθως παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για κάθε τιμή της απόστασης μεταξύ των δοκιμίων δοκιμής:

- i. Απόσταση δοκιμίων 1.5 mm**



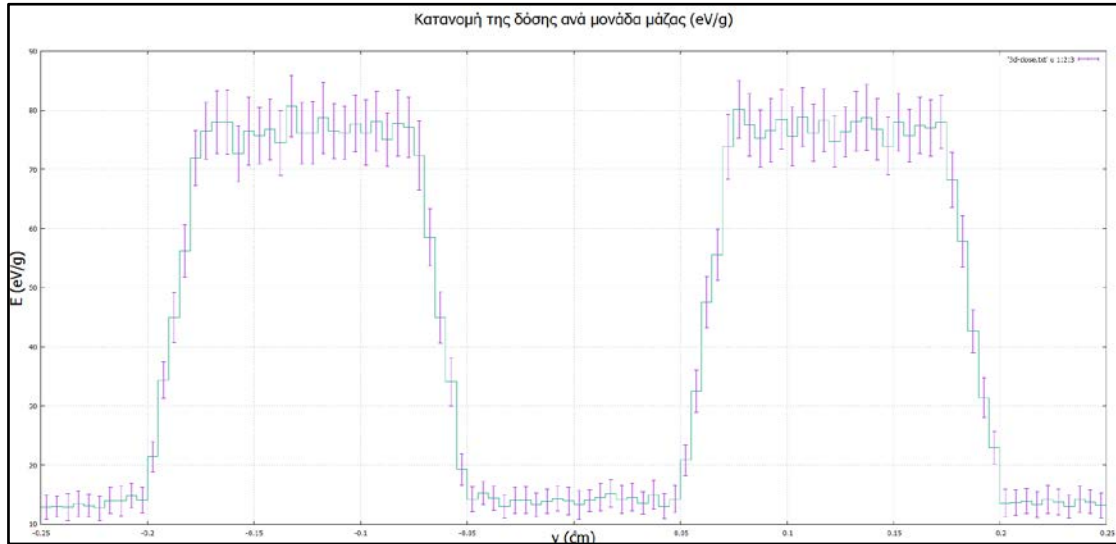
Σχήμα 5.52-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμίων 1.5 mm

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $9.648595 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.036420 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση η ανάλυση του ανιχνευτή δόσης ήταν $50 \times 200 \times 1$.

ii. Απόσταση δοκιμών 1.0 mm

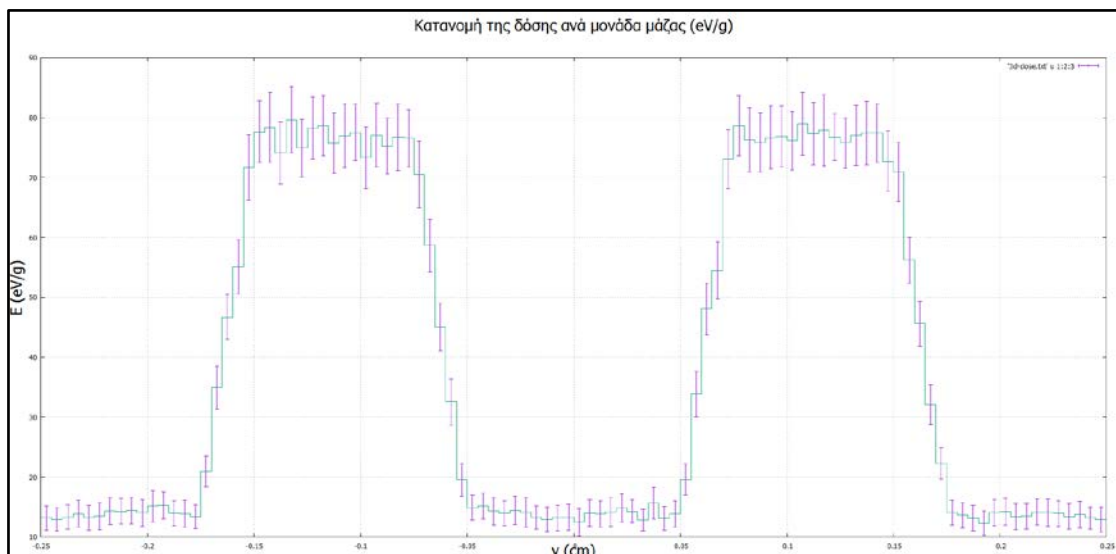


Σχήμα 5.53-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμών 1 mm

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $7.303502 \times 10^4 \text{se}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.369206 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

iii. Απόσταση δοκιμών 0.8 mm

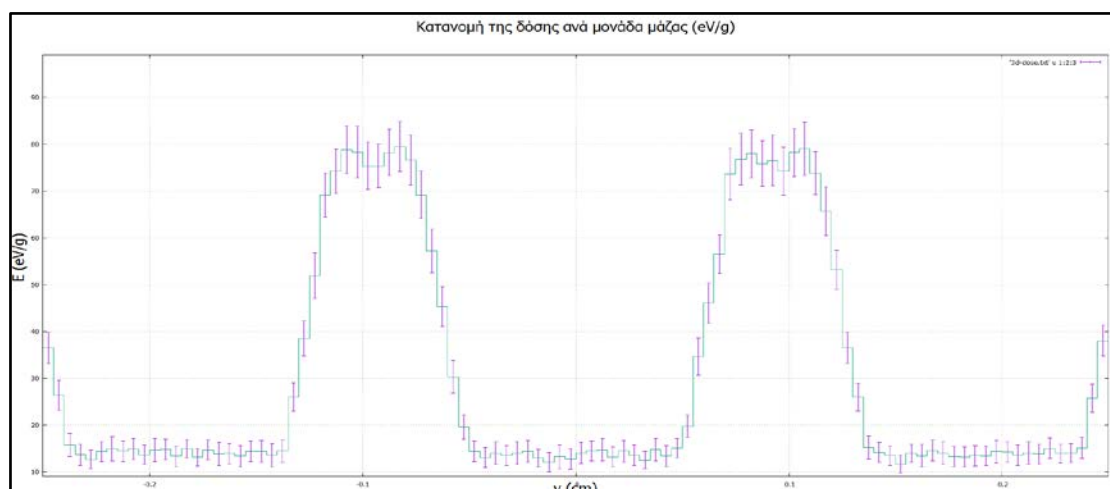


Σχήμα 5.54-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμών 0.8 mm

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $7.593678 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.316885 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

iv. Απόσταση δοκιμών 0.5 mm

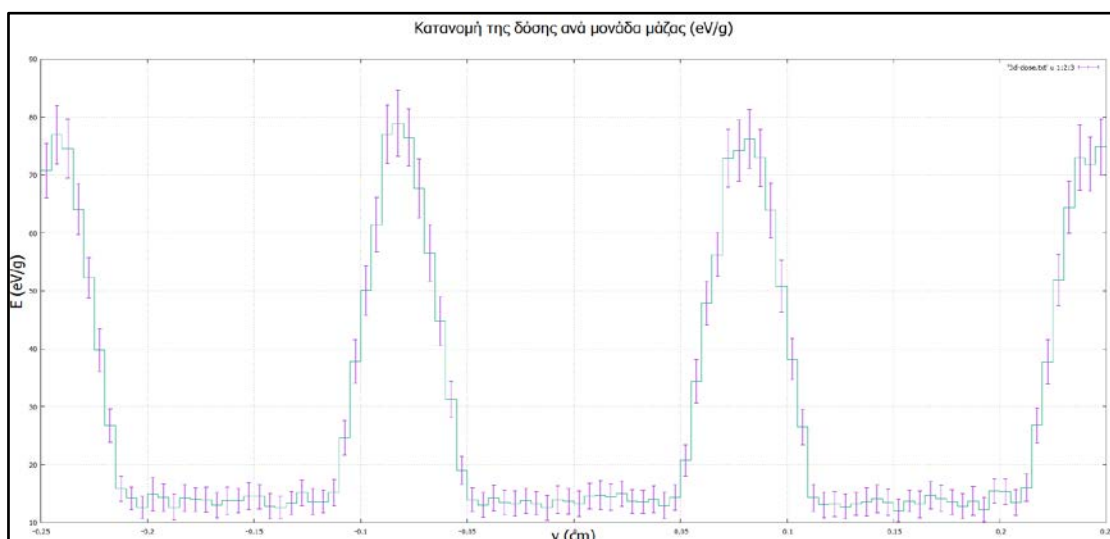


Σχήμα 5.55-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμών 0.5 mm

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $7.590036 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.317517 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

v. Απόσταση δοκιμών 0.3 mm

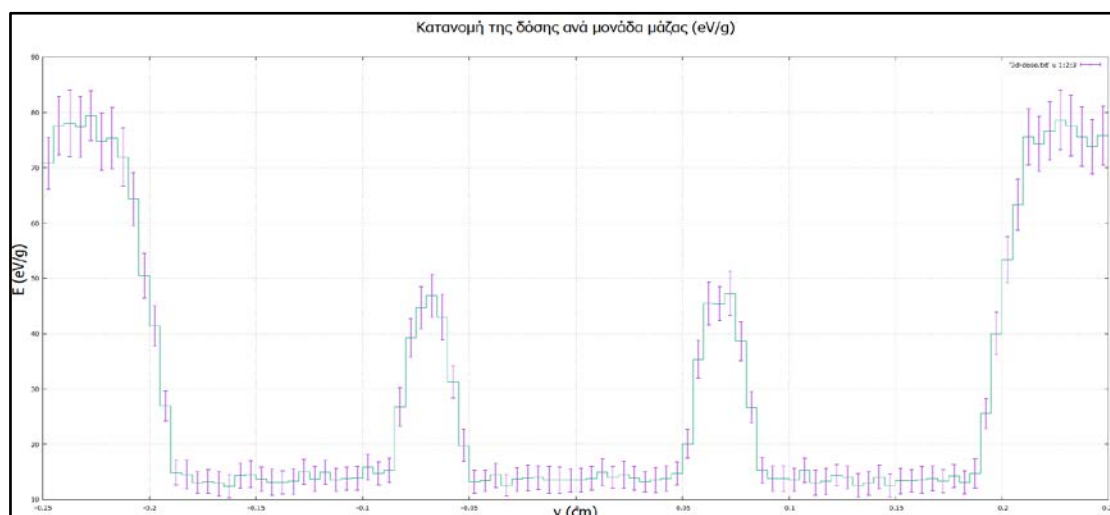


Σχήμα 5.56-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμών 0.3 mm

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $6.180033 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.618114 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

vi. Απόσταση δοκιμών 0.1 Lpmm

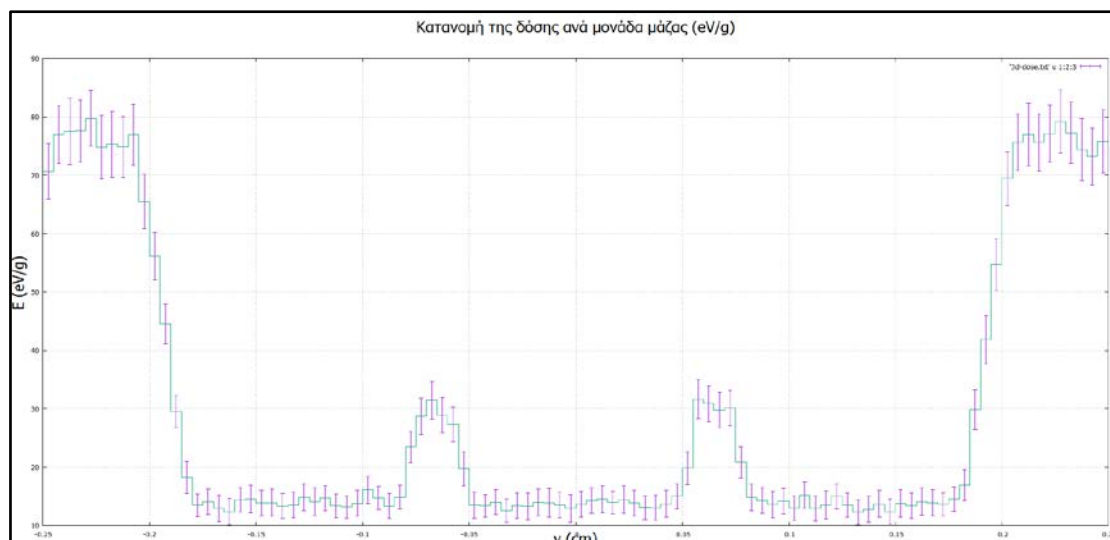


Σχήμα 5.57-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμών 0.1 mm

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $6.109942 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.636677 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

vii. Απόσταση δοκιμών 0.05 Lpmm



Σχήμα 5.58-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με απόσταση δοκιμών 0.05 mm

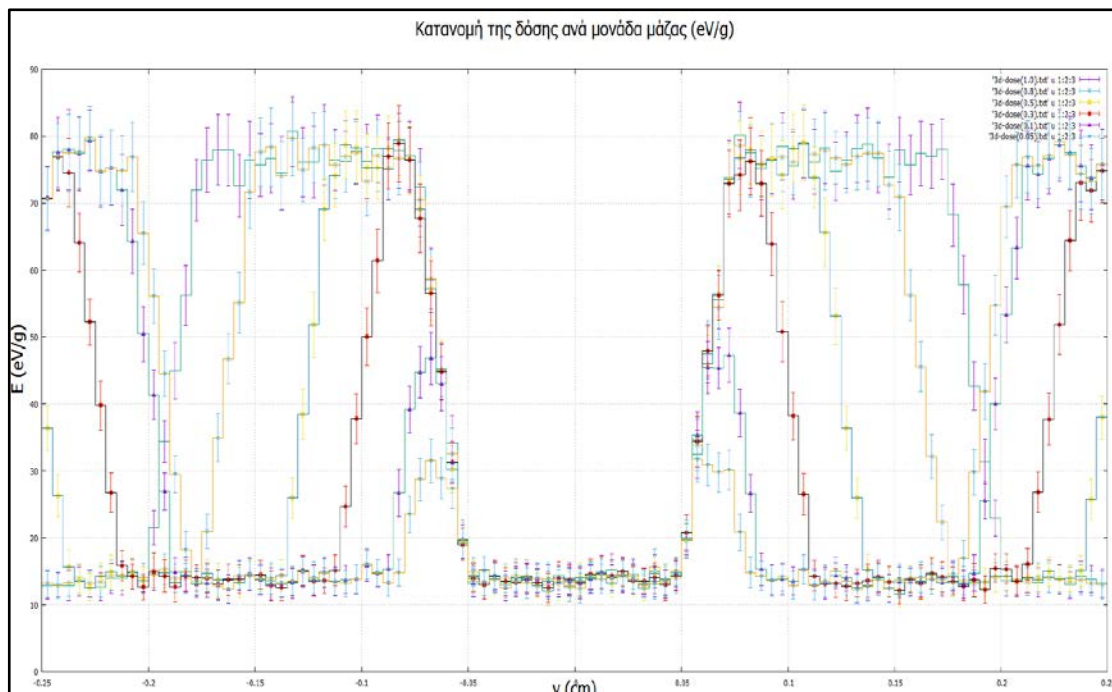
Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $6.081941 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.644212 \times 10^5 \text{ showers/sec}$

Αυτό που πρέπει να σχολιασθεί στα σχήματα 5.43 και 5.44 παρατηρείται αυξημένη καταγραφή δόσης στα άκρα του φιλμ και μειωμένη στο μέσον του στα σημεία που αντιστοιχούν στις σχισμές που δημιουργούνται μεταξύ των πλακιδίων μολύβδου. Αυτό ερμηνεύεται ως εξής:

- Η αυξημένη δόση στα άκρα οφείλεται στο ότι τα πλακίδια έχουν πλησιάσει πολύ μεταξύ τους και έχουν αφήσει κενό στο πλάι, από όπου τα φωτόνια φτάνουν κατευθείαν στο φιλμ
- Η μειωμένη δόση που αντιστοιχεί στις δύο σχισμές περί το μέσον του φιλμ οφείλεται στην πεπερασμένη χωρική διακριτική ικανότητα της διάταξης. Αν τα πλακίδια πλησιάσουν περισσότερο απλά δεν θα μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους, αλλά θα καταγράφεται η εικόνα μίας μεμονωμένης πλάκας.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο ακόλουθο σχήμα. Σε αυτό δε θα παρουσιαστεί η προσομοίωση i , διότι σε αυτή έχει οριστεί διαφορετική ανάλυση στον ανιχνευτή:



Σχήμα 5.59-Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με ανάλυση ανιχνευτή $100 \times 100 \times 1$

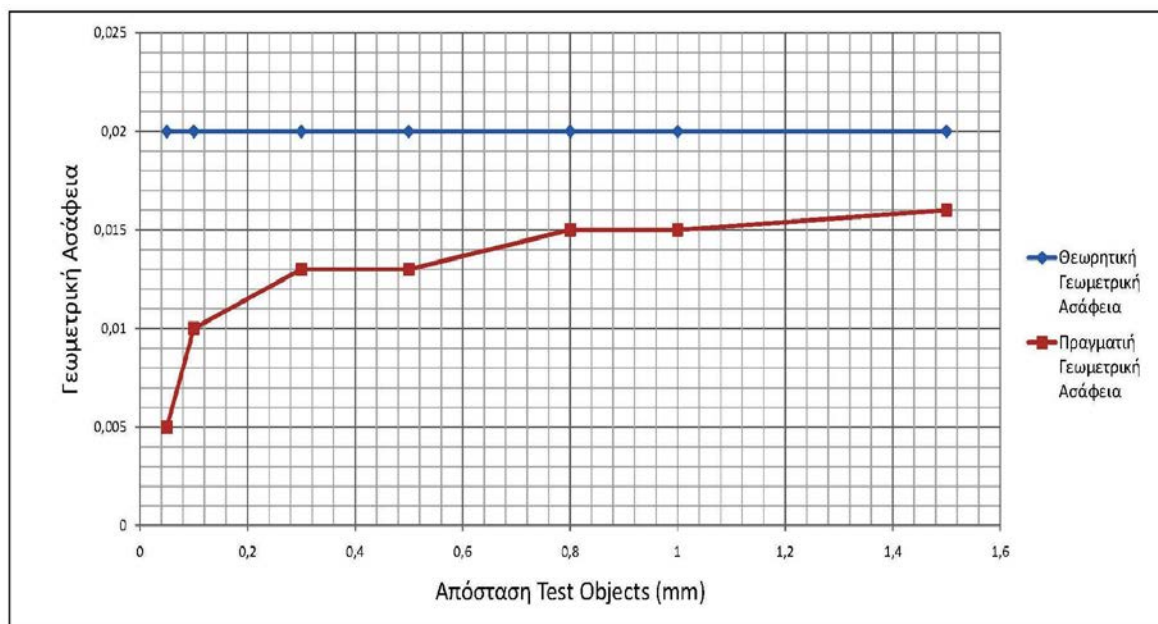
Για τη συγκεκριμένη ομάδα προσομοιώσεων, όπου οι αποστάσεις παραμένουν σταθερές, υπολογίσθηκε η μεγέθυνση από την παρακάτω θεωρητική σχέση:

$$m = \frac{d_1 + d_2}{d_1} = \frac{80 + 20}{80} = 1.25$$

και εν συνεχεία υπολογίσθηκε η γεωμετρική ασάφεια από τη σχέση:

$$U_g = k * \left(1 - \frac{1}{m}\right) = 0.1 * \left(1 - \frac{1}{1.125}\right) = 0.02$$

Στη συνέχεια υπολογίσθηκε γραφικά και η «πραγματική ασάφεια», δηλαδή η γεωμετρική ασάφεια, όπως προκύπτει από το ραδιογραφικό αποτέλεσμα των προσομοιώσεων. Στο γράφημα 5.61 που ακολουθεί γίνεται σύγκριση της «πραγματικής» με την θεωρητική ασάφεια όπου παρατηρείται σύγκλιση των δύο τιμών όσο αυξάνει η απόσταση μεταξύ των δύο πλακιδίων. Αντίθετα όσο τα πλακίδια πλησιάζουν η ασάφεια που εκτιμάται από την προσομοίωση φαίνεται να ελαττώνεται, πιθανότατα εξαιτίας της συνολικής ελάττωσης του σήματος, καθώς οι σχισμές μεταξύ των πλακιδίων διακρίνονται όλο και πιο δύσκολα.



Σχήμα 5.60-Σύγκριση της πραγματικής και θεωρητικής γεωμετρικής ασάφειας συναρτήσει της απόστασης των δοκιμίων δοκιμής

Παρατηρούμε πως η πραγματική γεωμετρική ασάφεια παραμένει ίση με την θεωρητικά υπολογισμένη και μειώνεται όταν χάνεται η πληροφορία που προσπαθήσουμε να ανιχνεύσουμε, μετακινώντας τα δοκίμια πάρα πολύ κοντά μεταξύ τους.

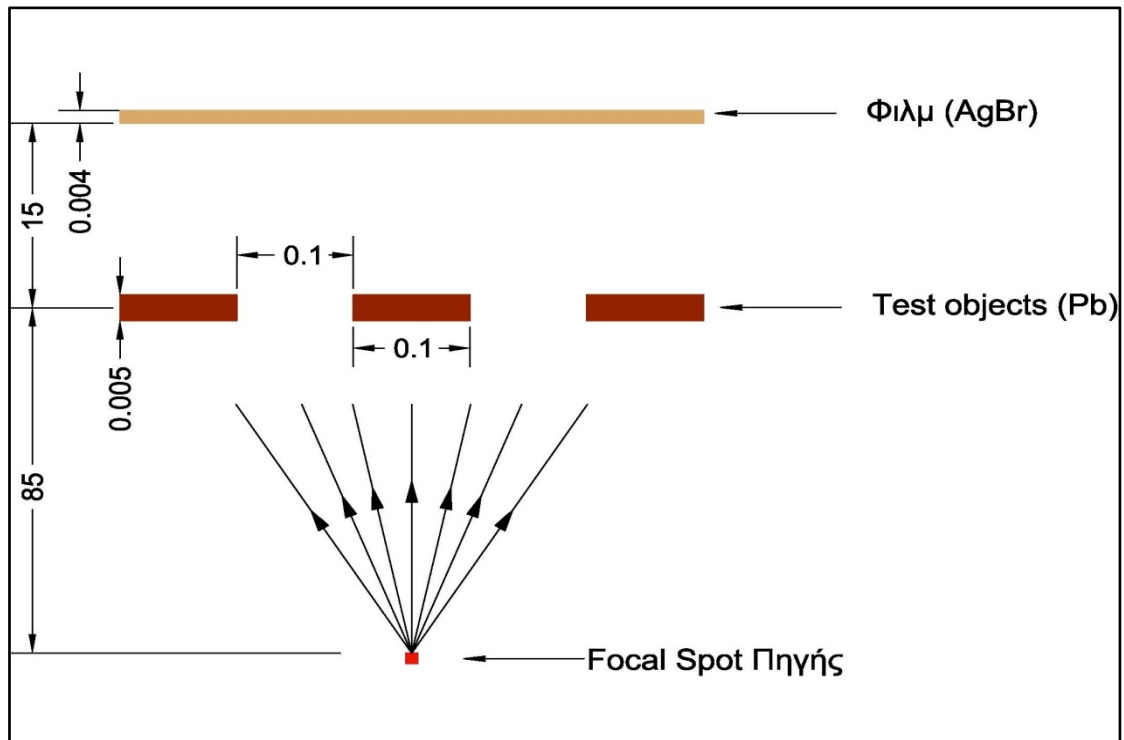
5.8.4 Επίδραση της ενέργειας της ακτινοβολίας των ακτίνων-X

Η τελευταία παραμετρική προσέγγιση αφορά την ενέργεια της ακτινοβολίας που εκπέμπει η μηχανή ακτίνων-X. Όπως είναι γνωστό η μηχανή ακτίνων-X δεν παράγει μονοενεργειακή ακτινοβολία αλλά φάσμα ακτινοβολίας που προκύπτει από τις χαρακτηριστικές φωτοκορυφές που αντιστοιχούν στο υλικό της ανόδου και την ακτινοβολία πέδησης από την επιβράδυνση των ηλεκτρονίων. Παρόλα αυτά η μελέτη της επίδρασης της ενέργειας πραγματοποιήθηκε με βάση το μοντέλο της μονοενεργειακής ακτινοβολίας, ώστε να είναι πιο απλοϊκή η εξαγωγή συμπερασμάτων. Ωστόσο στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί σύγκριση του ραδιογραφικού αποτελέσματος μεταξύ μονοενεργειακής ακτινοβολίας και φάσματος.

Για την εκτέλεση της παραμετρικής μελέτης επιλέχθηκαν 4 τιμές μονοενεργειακής ακτινοβολίας:

- i.** 30 keV
- ii.** 50 keV
- iii.** 80 keV
- iv.** 100 keV

Για την παραμετρική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια από μόλυβδο διαστάσεων χωρικής συχνότητας 1 Lpmm . Τα δοκίμια έχουν διαστάσεις 0.5 x 0.1 x 0.005 (cm). Ως φιλμ θα χρησιμοποιήσουμε ένα σώμα από βρωμιούχο άργυρο (AgBr) διαστάσεων 0.5 x 0.5 x 0.004 (cm), το οποίο θα οριστεί στο αρχείο δεδομένων εισόδου ως ανιχνευτής δόσης. Οι διαστάσεις του εστιακού σημείου είναι 0.5 x 0.5 (cm²) , ενώ θεωρήθηκε μονοενεργειακή πηγή ακτινοβολίας με ενέργεια ίση με 30 keV. Η διάταξη του πειράματος απεικονίζεται στο σχήμα 5.61.



Σχήμα 5.61-Διάταξη προσομοίωσης

Επιπλέον παρουσιάζεται και το τμήμα του αρχείου δεδομένων εισόδου, όπου επισημαίνεται η μεταβολή στην τιμή ενέργειας της μονοενεργειακής ακτινοβολίας:

```

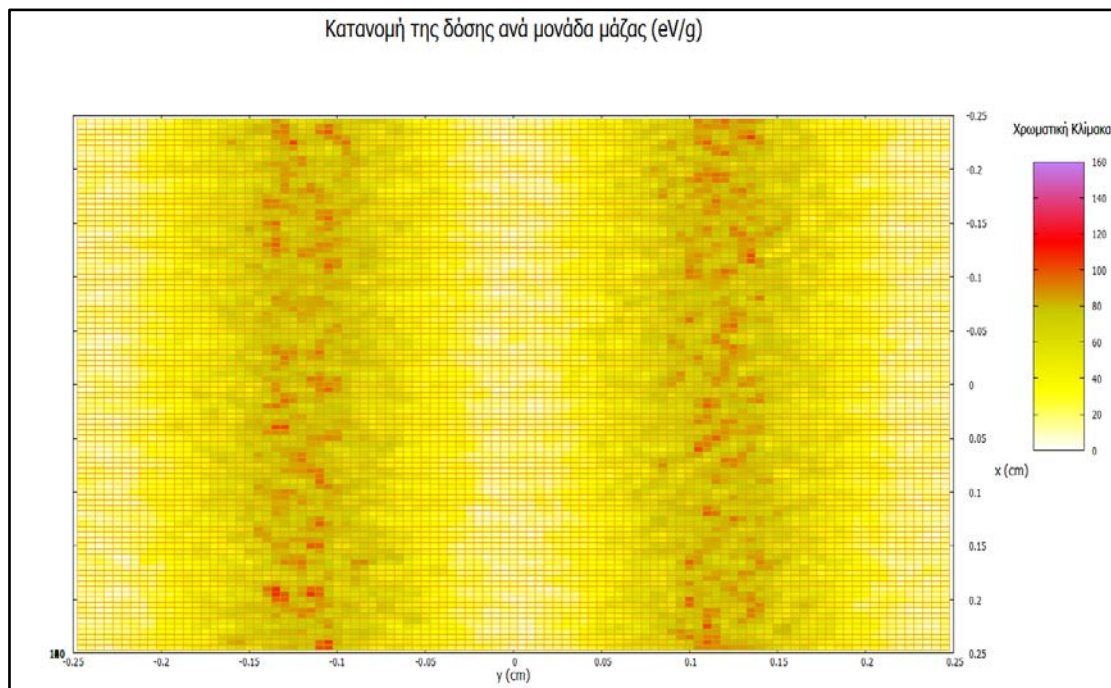
|TITLE Pb bricks
.
>>>>>> Source definition.
SKRAB 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG 3e4 [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPOSIT 0 0 -85 [Coordinates of the source]
SBOX 0.5 0.5 0 [source box dimensions]
SCONE 0 0 25 [Conical beam; angles in deg]
.
>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME Pb.mat [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA 3e2 3e2 3e2 0.1 0.1 1.5e4 1.5e4 [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME AgBr.mat [Material file, up to 20 chars]

```

Σχήμα 5.62-Τμήμα αρχείου εισόδου δεδομένων

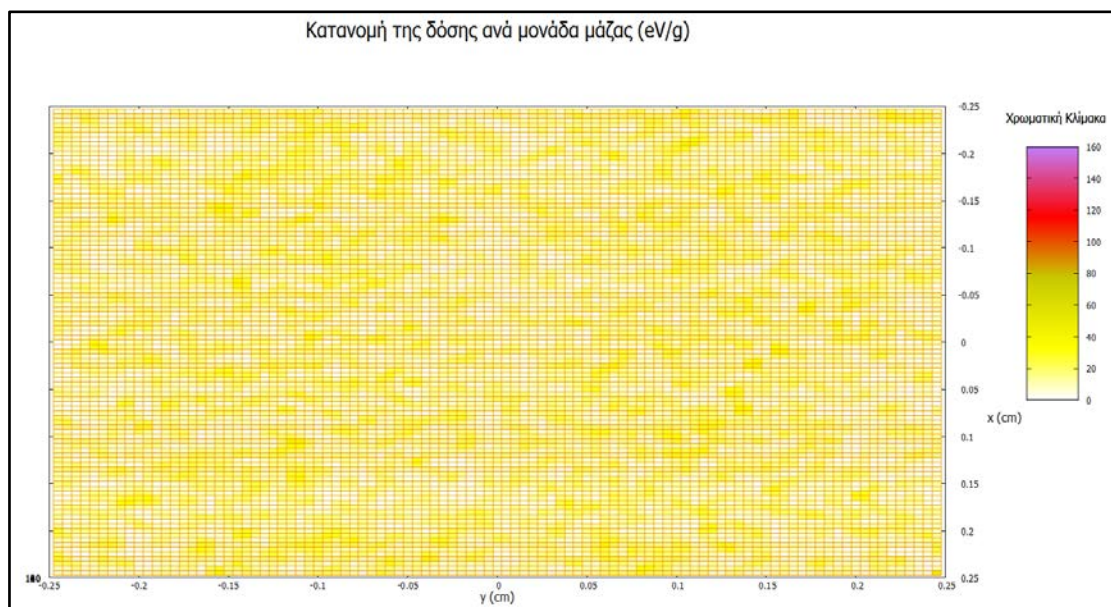
Αντίστοιχα με τις άλλες παραμέτρους αρχικά θα παρουσιαστεί η ποιοτική μεταβολή του ραδιογραφικού αποτελέσματος εξετάζοντας τα διαγράμματα με χρωματική κλίμακα για τις περιπτώσεις των προσομοιώσεων με 30 keV και 100 keV.

- Προσομοίωση για ενέργεια 30 keV



Σχήμα 5.63-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ενέργεια 30 keV

- Προσομοίωση για ενέργεια 100 keV



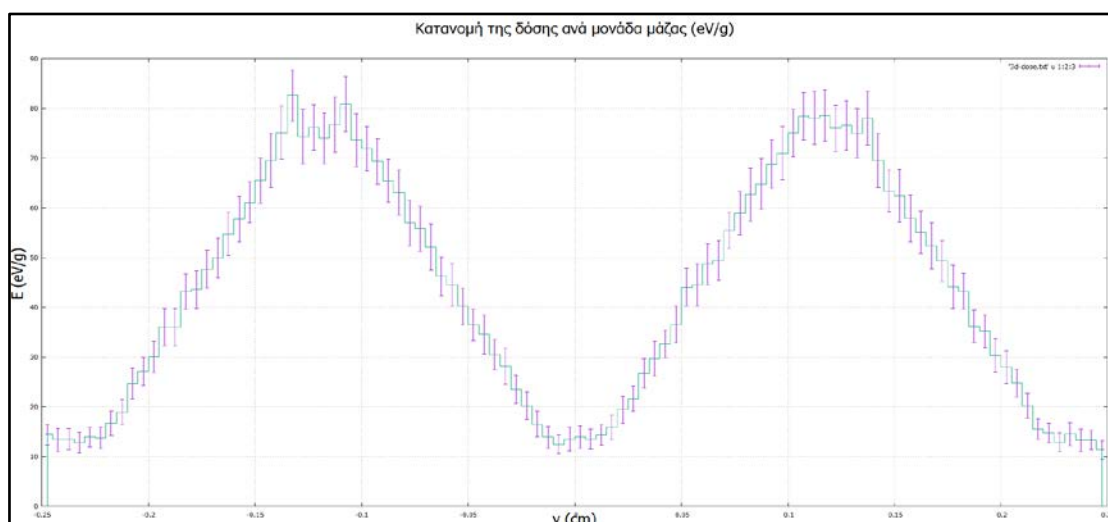
Σχήμα 5.64-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ενέργεια 100 keV

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει το συμπέρασμα πως η αύξηση της τιμής της ενέργειας της ακτινοβολίας στα 100 keV έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της πληροφορίας. Ο ανιχνευτής πλέον δεν μπορεί να διαπιστώσει την ύπαρξη του

δοκιμίου, καθώς η ακτινοβολία υψηλής ενέργειας διέρχεται μέσα από αυτό με ελάχιστη εξασθένιση.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αρχικά με τη μορφή μέσων όρων κατά τον άξονα x:

i. Προσομοίωση με ενέργεια 30 keV

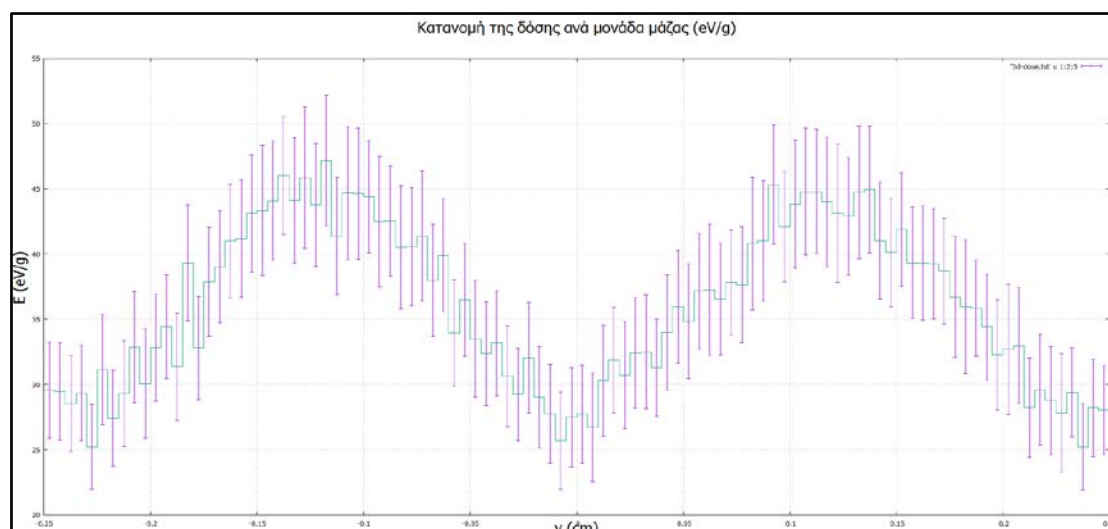


Σχήμα 5.65-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ενέργεια 30 keV

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $2.351517 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $4.252574 \times 10^4 \text{ showers/sec}$

ii. Προσομοίωση με ενέργεια 50 keV

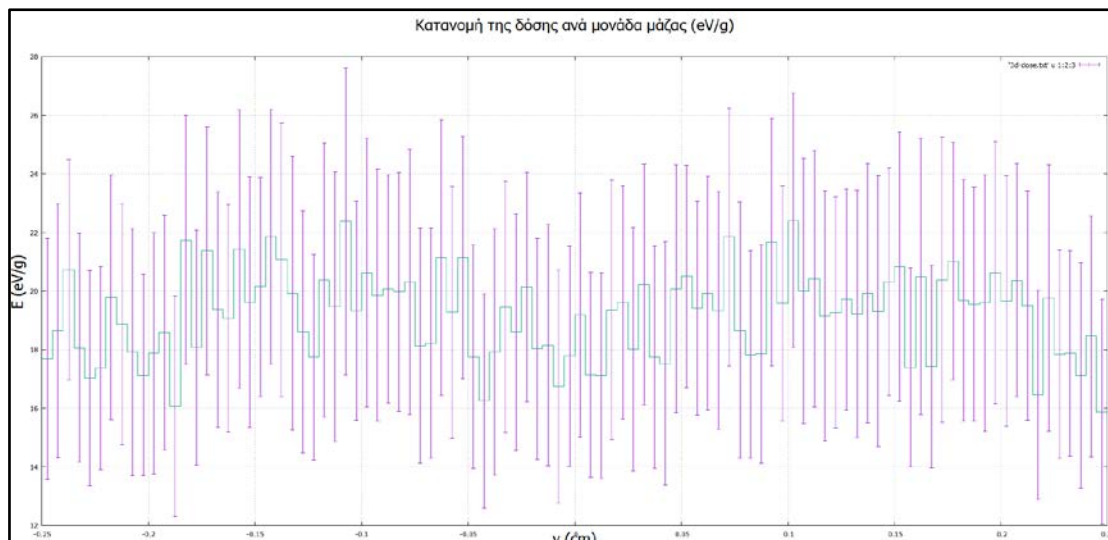


Σχήμα 5.66-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ενέργεια 50 keV

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $5.472819 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.827212 \times 10^5 \text{ showers/sec.}$

iii. Προσομοίωση με ενέργεια 80 keV

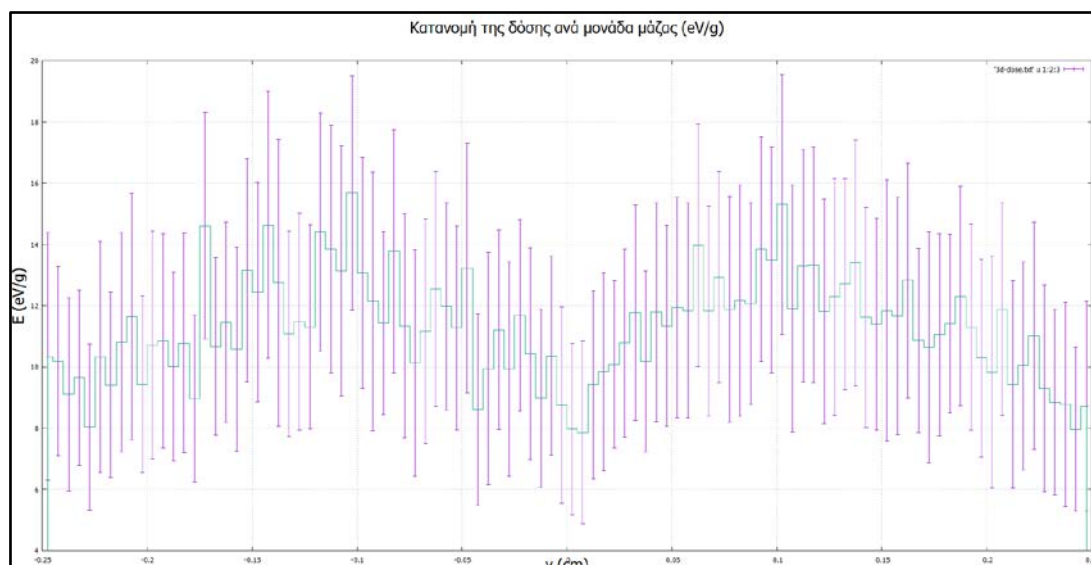


Σχήμα 5.67-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ενέργεια 80 keV

Στο αντίστοιχο αρχείο renmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $6.673884 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.49837 \times 10^5 \text{ showers/sec.}$

iv. Προσομοίωση με ενέργεια 100 keV



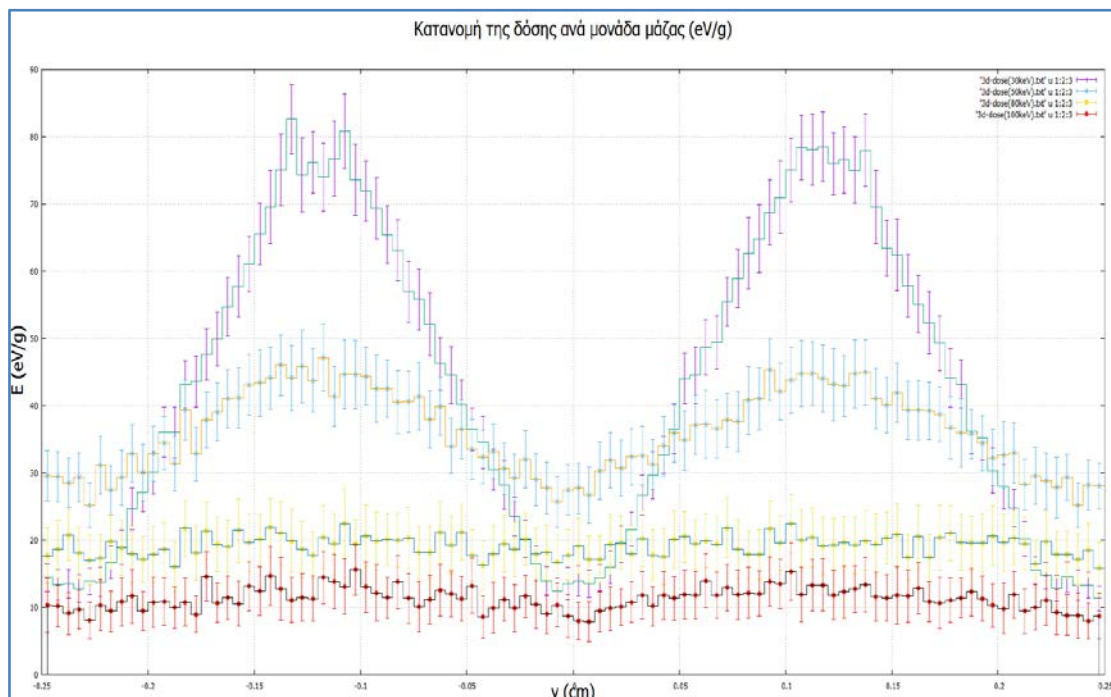
Σχήμα 5.68-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ενέργεια 100 keV

Στο αντίστοιχο αρχείο penmain.dat καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

- διάρκεια προσομοίωσης : $6.681498 \times 10^4 \text{sec}$
- ταχύτητα προσομοίωσης : $1.496670 \times 10^5 \text{ showers/sec.}$

v. Συγκεντρωτικό σχήμα αποτελεσμάτων

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων:



Σχήμα 5.69-Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης για διάφορες τιμές ενέργειας ακτινοβολίας

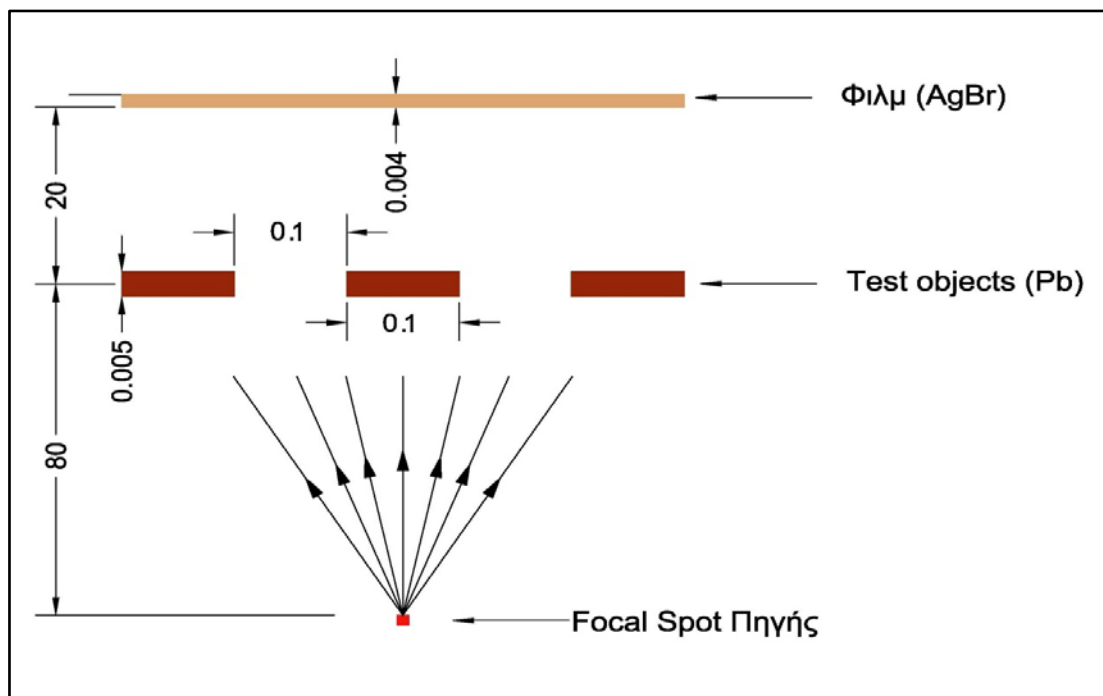
Όπως παρατηρείται η ποιότητα της ραδιογραφίας μεταβάλλεται αρνητικά καθώς η ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας αυξάνεται. Από ένα σημείο και μετά η ενέργεια της είναι τόσο μεγάλη αφενός τα φωτόνια διαπερνούν με μεγάλη ευκολία τα πλακίδια, αφετέρου τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με δυσκολία με το υλικό του φιλμ και αποθέτουν πολύ μικρή ενέργεια σε αυτό.

5.8.5 Σύγκριση μονοενεργειακής ακτινοβολίας και φάσματος ενέργειας

Το επόμενο βήμα στη μελέτη της διακριτικής ικανότητας της μηχανής των ακτίνων-Χ είναι να εξεταστεί η μεταβολή που θα προκύψει στο ραδιογραφικό αποτέλεσμα αν έχουμε φάσμα ακτινοβολίας και όχι μονοενεργειακή ακτινοβολία. Για

το σκοπό αυτό εκτελέστηκαν δύο προσομοιώσεις μεταβάλλοντας μόνο τη συγκεκριμένη παράμετρο.

Για την παραμετρική μελέτη θα χρησιμοποιήσουμε τρία δοκίμια από μόλυβδο διαστάσεων χωρικής συχνότητας 1 L/mm . Τα δοκίμια έχουν διαστάσεις 0.5 x 0.1 x 0.005 (cm). Η διάταξη του πειράματος απεικονίζεται στο σχήμα 5.70:



Σχήμα 5.70-Διάταξη προσομοίωσης

Ως φιλμ χρησιμοποιήθηκε ένα σώμα από AgBr διαστάσεων 0.5 x 0.5 x 0.004 cm, το οποίο ορίζεται κατά τα γνωστά στο αρχείο δεδομένων εισόδου ως ανιχνευτής δόσης. Οι διαστάσεις του εστιακού σημείου είναι 0.1 x 0.1 cm² , ενώ αρχικά πραγματοποιήθηκε εισαγωγή στο αρχείο δεδομένων μονοενεργειακής πηγής ακτινοβολίας με ενέργεια ίση με 30 keV. Το αρχείο εισόδου δεδομένων στη πρώτη προσομοίωση έχει την μορφή που έχει παρουσιαστεί στο σύνολο των παραπάνω προσομοιώσεων. Στη δεύτερη περίπτωση το αρχείο διαμορφώθηκε έτσι ώστε να εισαχθεί το φάσμα της ακτινοβολίας.

Το φάσμα της μηχανής των ακτίνων X θα ληφθεί χρησιμοποιώντας το λογισμικό spekcalc.exe. Το πρόγραμμα παρέχει το φάσμα μηχανής ακτίνων-X συγκεκριμένων χαρακτηριστικών τόσο σε γραφική μορφή, όσο και σε μορφή αρχείου txt. Το λογισμικό διατίθεται ελεύθερα στην παρακάτω διεύθυνση: <http://spekcalc.weebly.com/>. Εκτελώντας το πρόγραμμα πρέπει να εισάγουμε κάποια δεδομένα όπως το υλικό ανόδου και μέγιστη ενέργεια εκπομπής. Τελικά ως

υλικό της ανόδου επιλέχθηκε το βολφράμιο με μέγιστη τιμή ενέργειας της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας τα 80 keV. Κατόπιν της εκτέλεσης του προγράμματος λαμβάνουμε αρχείο μορφής .txt, τμήμα του οποίου απεικονίζεται παρακάτω:

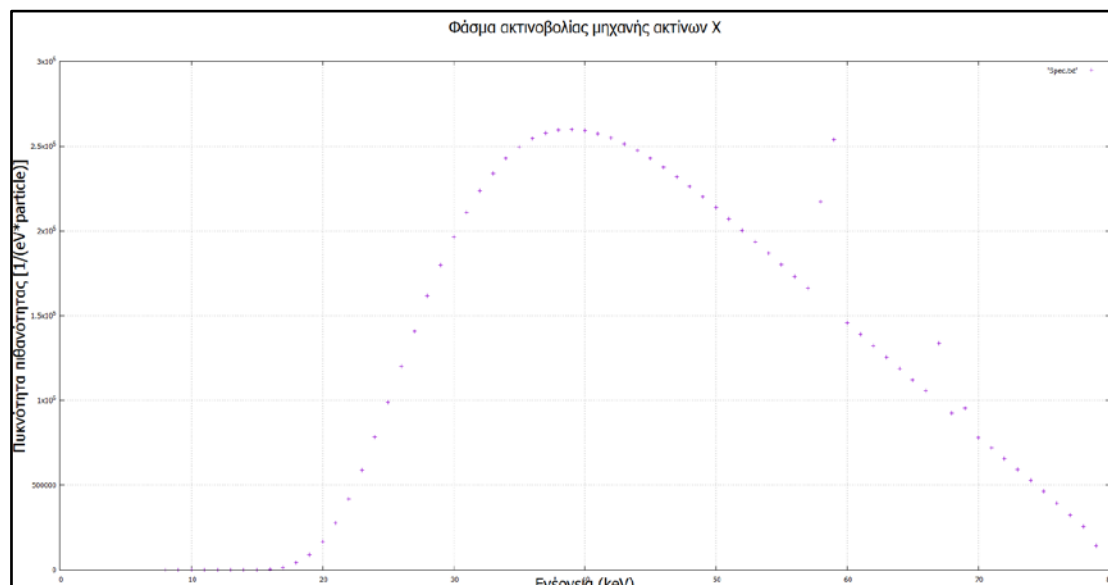
```

Unsaved1 - 80kVp 30deg 1000Air 0.8Be 1Al 0.11Cu 0Sn 0W 0Wa - Notepad
File Edit Format View Help
**** COMMENT ****
**** INPUTS ****
kvp [kV] hvMIN [keV] dhv [keV]
80 8 1
Angle [deg.]
30
t_AIR t_BE t_AL t_CU t_SN t_W t_Wa [mm]
1000 0.8 1 0.11 0 0 0
NF P
0.68 0.33
****CALCULATED OUTPUTS ****
Brem[uGy/mAs@1m] Char[uGy/mAs@1m]
42.94368 0.5968415
HVL1[cm AL] HVL2[cm AL] HVL1[cmCu] HVL2[cmCu] MeanE[keV] EffEA1[keV] EffECu[keV]
0.3711009 0.5090189 0.0133152 0.0217186 46.25671 36.6413 37.54565
**** CALCULATED SPECTRUM ****
Energy[keV] N[keV cm^2 mAs]^-1 @ 1 meter
8 0.0602061
9 1.149132e-9
10 7.626833e-6
11 0.0028995
12 0.2605424
13 8.911459
14 124.5044
15 945.8079
16 4580.281
17 15514.2
18 40825.72
19 88748.43
20 166065.5
21 275330.5
22 419164.7
23 589905.9
24 785049.2
25 989521.6
26 1.202662e+6
27 1.405928e+6
28 1.617270e+6

```

Σχήμα 5.71-Δοθέν φάσμα μηχανής ακτίνων X

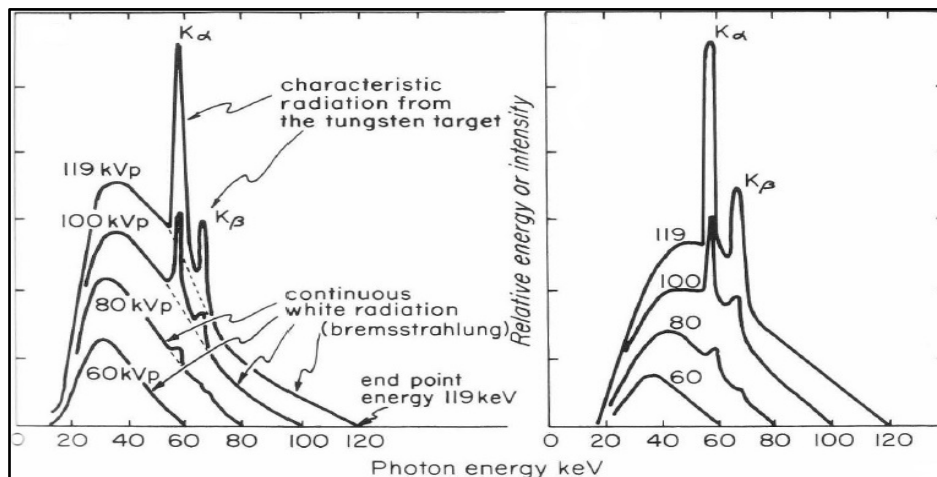
Στο παραπάνω αρχείο διακρίνουμε δύο στήλες, η πρώτη αφορά την τιμή της ενέργειας και η δεύτερη την πιθανότητα εκπομπής. Στη συνέχεια με τη χρήση του προγράμματος gnuplot.exe δημιουργήθηκε σχήμα με τα δεδομένα του παραπάνω αρχείου:



Σχήμα 5.72-Απεικόνιση δοθέντος φάσματος ακτινοβολίας

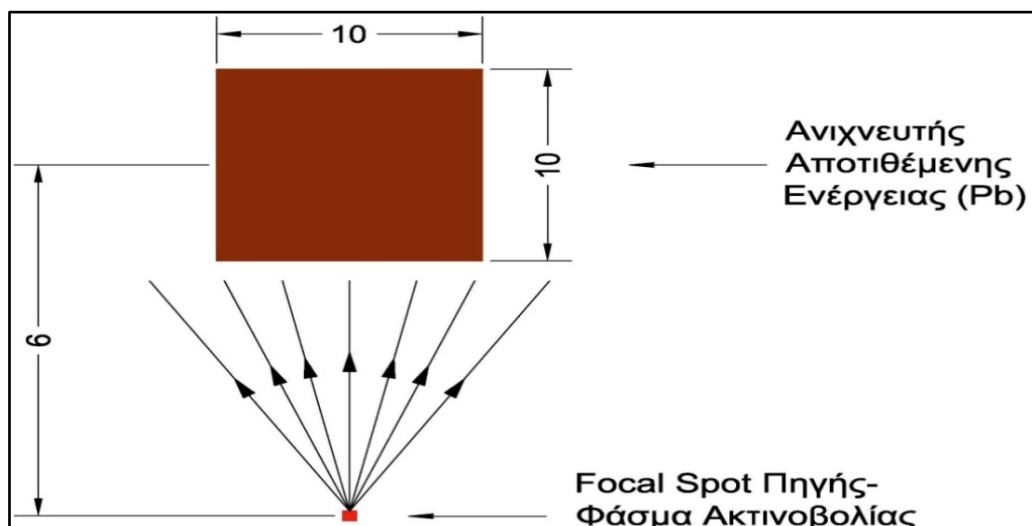
Πρόκειται για ένα τυπικό φάσμα μηχανής ακτίνων-Χ, το οποίο έχει υποστεί ελαφρύ φιλτράρισμα. Διακρίνονται τα κλασικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κατηγορίας φασμάτων, αφενός μεν το συνεχές τμήμα που αποδίδεται στην ακτινοβολία πέδησης, αφετέρου δε τις φωτοκορυφές που χαρακτηρίζουν το υλικό της ανόδου.

Συγκρίνοντας το παραπάνω φάσμα, με φάσματα από τη βιβλιογραφία επιβεβαιώνεται η ορθότητά του, τουλάχιστον σε γενικές γραμμές.



Σχήμα 5.73-Φάσμα μηχανής ακτίνων Χ για διάφορες τιμές τάσης λειτουργίας

Προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι το παραπάνω φάσμα εισάγεται με ορθό τρόπο στο πρόγραμμα προσομοίωσης, έγινε μία δοκιμαστική προσομοίωση με χρήση ανιχνευτή εναποτιθέμενης ενέργειας. Το ρόλο του ανιχνευτή παίζει ένα κυβικό σώμα διαστάσεων 10 x 10 x 10 (cm). Η διάταξη που προσομοιώθηκε απεικονίζεται στο σχήμα 5.74:



Σχήμα 5.74-Διάταξη προσομοίωσης

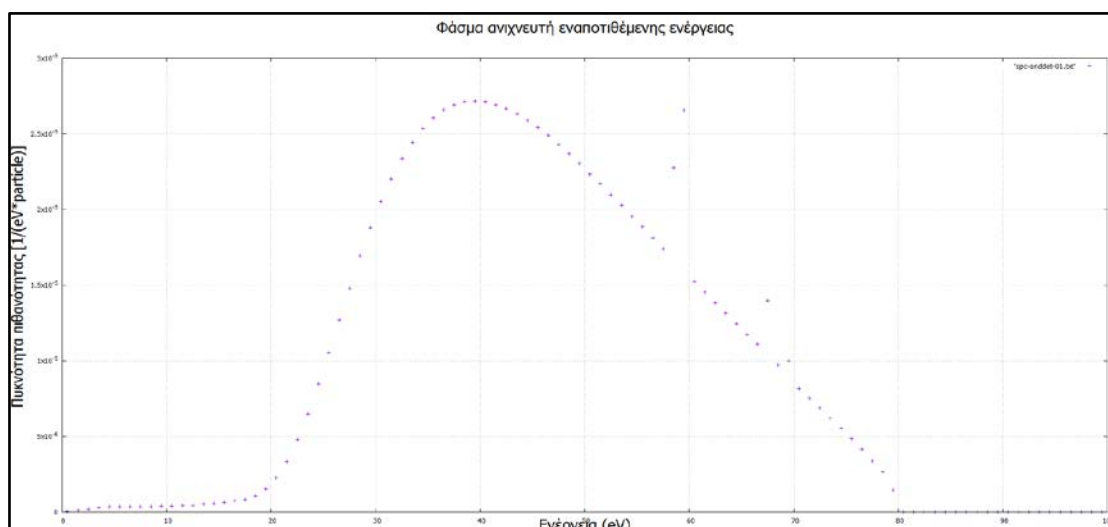
Για τις ανάγκες της προσομοίωσης το φάσμα εισήχθη στο αρχείο εισόδου δεδομένων, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα 5.75.

```

TITLE H2O cube
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR 2 [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SPECTR 8e3 0.0602061
SPECTR 9e3 1.149132e-9
SPECTR 10e3 7.626833e-6
SPECTR 11e3 0.0028995
SPECTR 12e3 0.2605424
SPECTR 13e3 8.911459
SPECTR 14e3 124.5044
SPECTR 15e3 945.8079
SPECTR 16e3 4580.281
SPECTR 17e3 15514.2
SPECTR 18e3 40825.72
SPECTR 19e3 88748.43
SPECTR 20e3 166065.5
SPECTR 21e3 275330.5
SPECTR 22e3 419164.7
SPECTR 23e3 589905.9
SPECTR 24e3 785049.2
SPECTR 25e3 989521.6
SPECTR 26e3 1.202662e+6
SPECTR 27e3 1.405928e+6
SPECTR 28e3 1.617270e+6
SPECTR 29e3 1.795919e+6
SPECTR 30e3 1.962535e+6
SPECTR 31e3 2.107815e+6
SPECTR 32e3 2.235936e+6
SPECTR 33e3 2.340853e+6
SPECTR 34e3 2.429571e+6
SPECTR 35e3 2.495934e+6
    
```

Σχήμα 5.75-Τμήμα αρχείου εισόδου δεδομένων

Με τη χρήση του προγράμματος gnuplot.exe σχεδιάστηκε το φάσμα που καταγράφεται στον ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας.

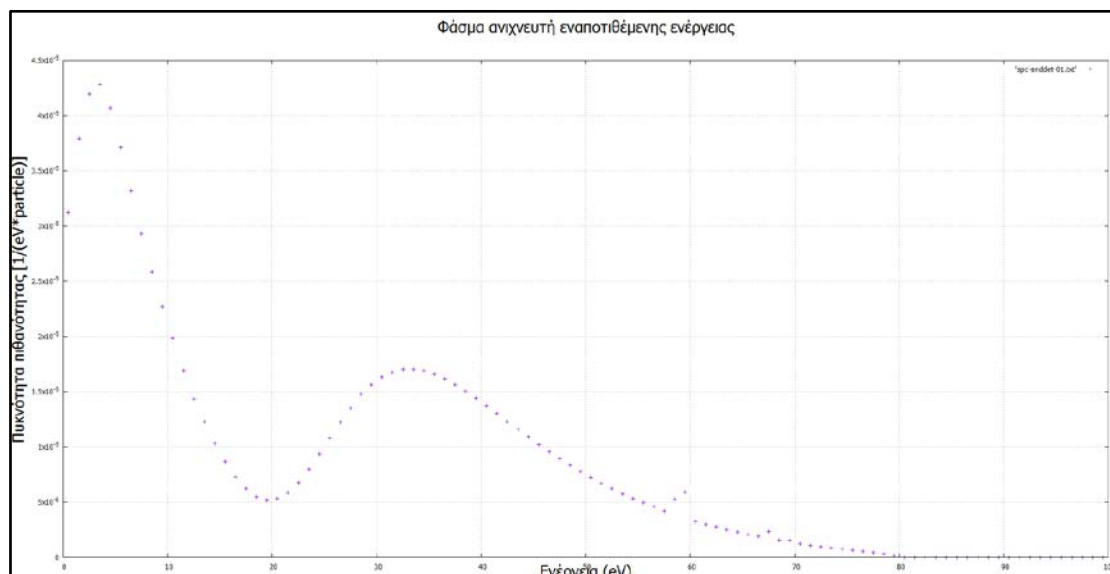


Σχήμα 5.76-Απεικόνιση φάσματος του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας με υλικό Pb

Συγκρίνοντας τα δύο παραπάνω γραφήματα προκύπτει μεγάλη ομοιότητα στη μορφή των δύο φασμάτων. Συνεπώς θεωρούμε πως η ανίχνευση του φάσματος πραγματοποιείται σωστά. Άρα μπορούμε να προχωρήσουμε στην έναρξη της προσομοίωσης.

Ωστόσο ενδιαφέρον προκύπτει και από μία προσπάθεια σχετική με την ανίχνευση του φάσματος. Εκτελέστηκε ακριβώς η ίδια προσομοίωση με στόχο την

ανίχνευση του φάσματος με τη μόνη διαφορά πως ως υλικό του ανιχνευτή ορίστηκε το νερό. Προέκυψε το φάσμα που απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 5.77:



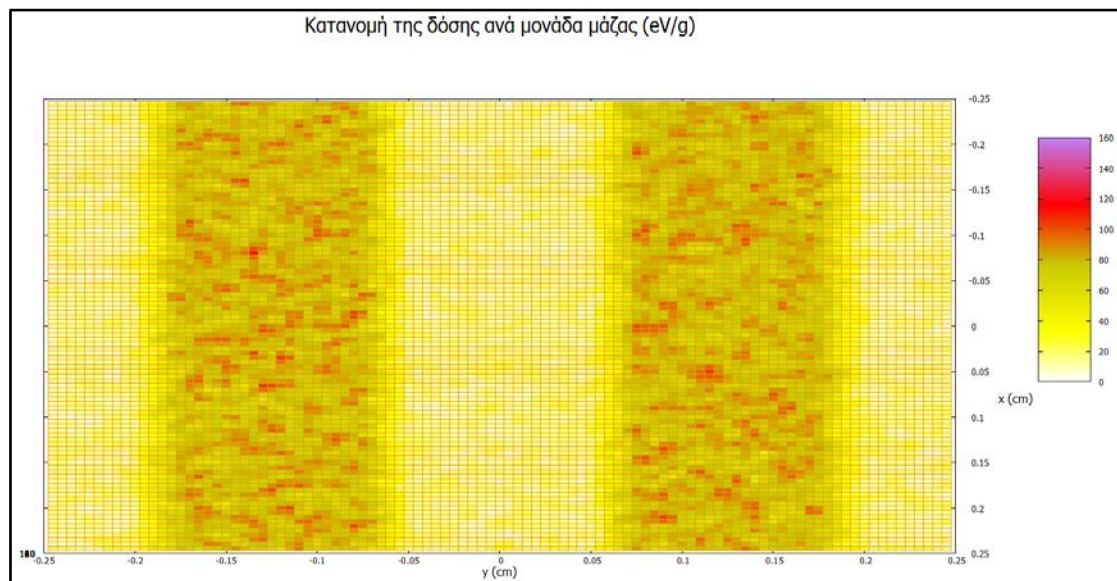
Σχήμα 5.77-Απεικόνιση φάσματος του ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας με υλικό H₂O

Όπως παρατηρείται το φάσμα του σχήματος 5.76 έχει σημαντική διαφορά από το φάσμα 5.77 για ενέργειες μέχρι 20 keV. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο φαινόμενο των ελαστικών σκεδάσεων, οι οποίες για χαμηλές ενέργειες παίζουν σημαντικό ρόλο σε ελαφρά υλικά, όπως το νερό.

Μετά την επιβεβαίωση ότι η προσομοίωση του φάσματος των ακτίνων-Χ γίνεται σωστά, ακολούθησε η προσομοίωση για τη μελέτη της επίδρασης του φάσματος πάνω στη διακριτική ικανότητα της διάταξης και τη σύγκριση με τα αποτελέσματα της μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων. Τα αποτελέσματα αρχικά συγκρίνονται ποιοτικά. Για το σκοπό αυτό παρατίθενται τα διαγράμματα 5.78, 5.79 και 5.80, όπου φαίνεται η απεικόνιση των δοκιμών για τις περιπτώσεις:

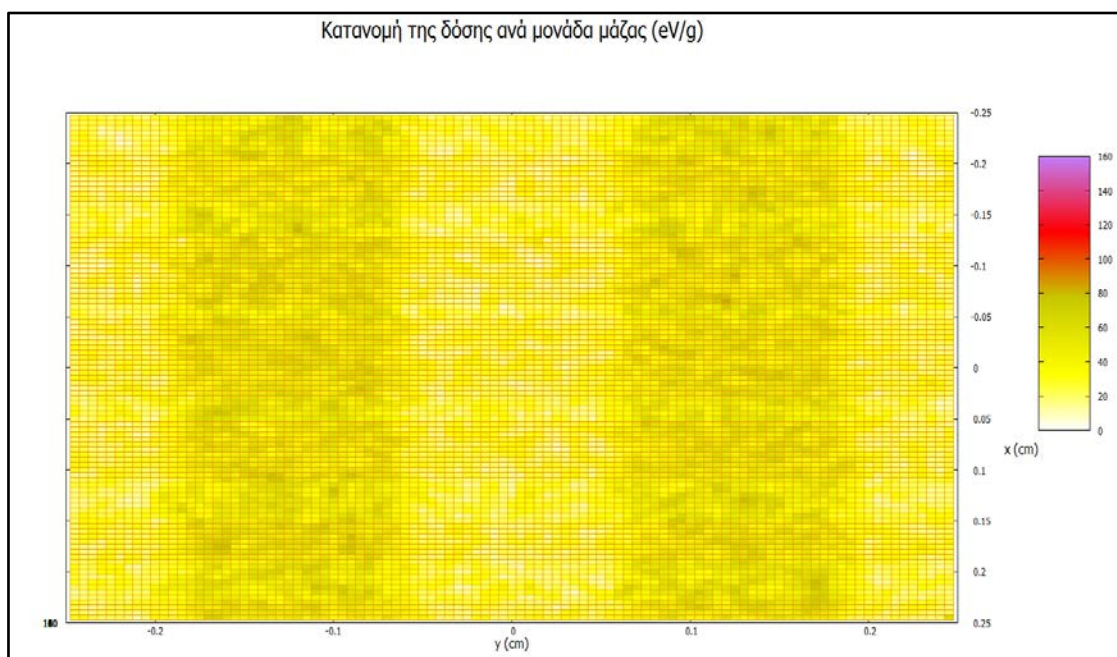
- Μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων 30keV.
- Φάσματος ακτίνων-Χ μέγιστης ενέργειας 80keV.
- Μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων 80keV.

- **Μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων 30 keV:**



Σχήμα 5.78-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με χρωματική κλίμακα για μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων 30 keV

- **Φάσμα ακτινοβολίας:**

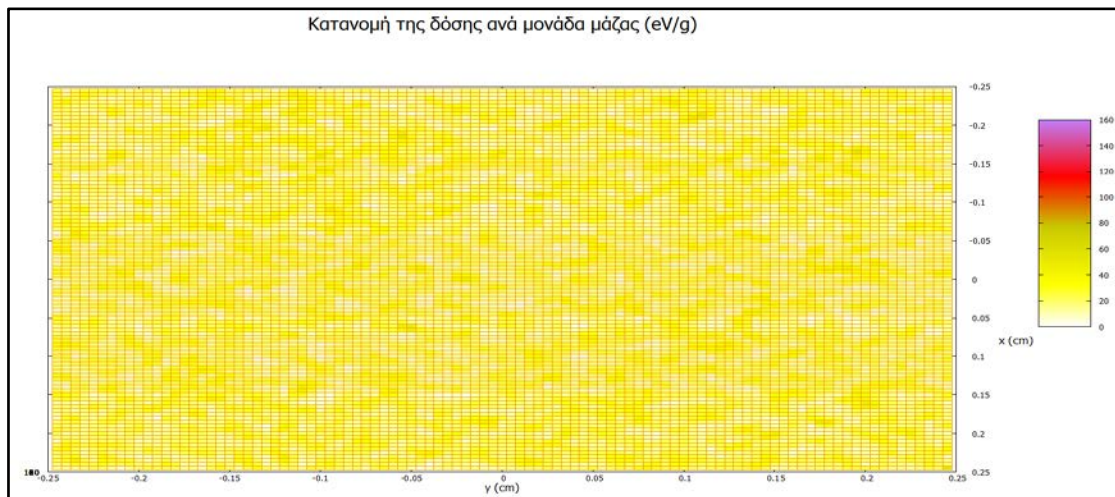


Σχήμα 5.79-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με χρωματική κλίμακα για φάσμα ακτινοβολίας.

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι η καλύτερη απεικόνιση διαπιστώνεται για μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων 30keV. Καθώς η εξασθένιση των φωτονίων αυτής της ενέργειας στα πλακίδια είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα για τη

μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων 80keV δίνει τη χειρότερη απεικόνιση. Ενδιάμεση ποιότητα εικόνας δίνει το φάσμα ακτίνων-Χ μέγιστης ενέργειας 80keV, κάτι που είναι αναμενόμενο, καθώς η μέση ενέργεια των φωτονίων στην περίπτωση αυτή είναι μεταξύ 30-80keV και ομοίως και η εξασθένηση της ακτινοβολίας στα πλακίδια μολύβδου.

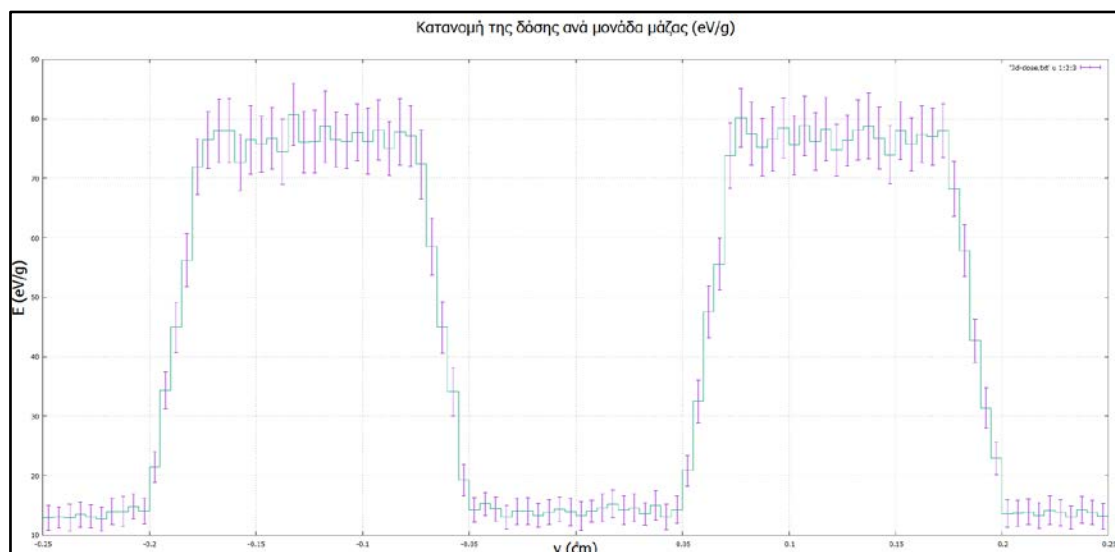
- **Μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων 80 keV:**



Σχήμα 5.80-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με χρωματική κλίμακα για μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων 80 keV

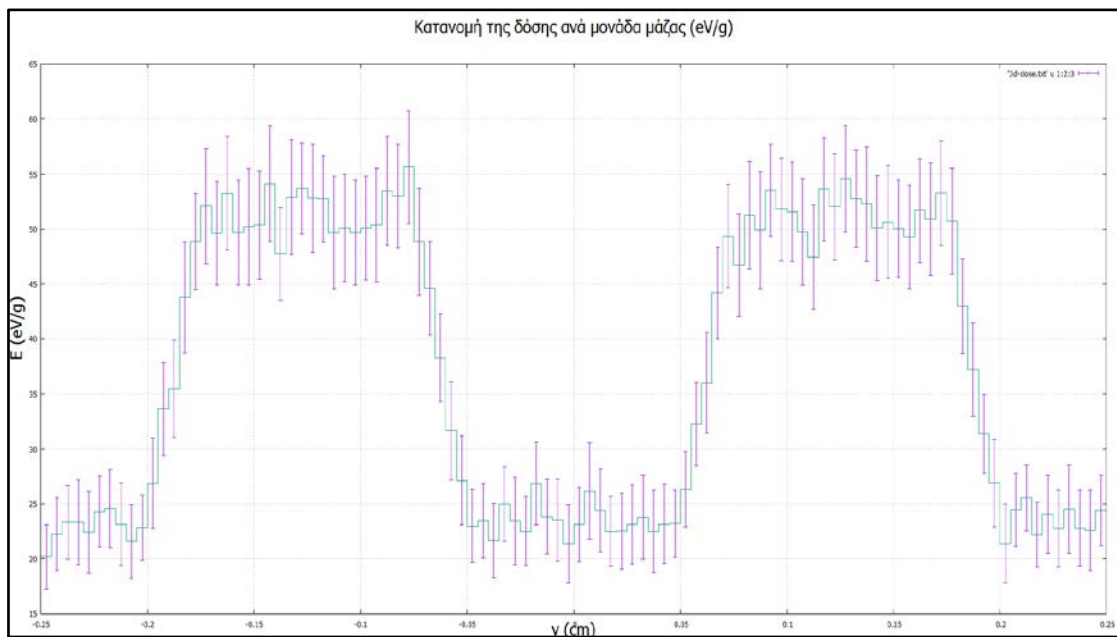
Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από τα διαγράμματα 5.81, 5.82 και 5.83 που ακολουθούν:

- **Μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων 30 keV:**



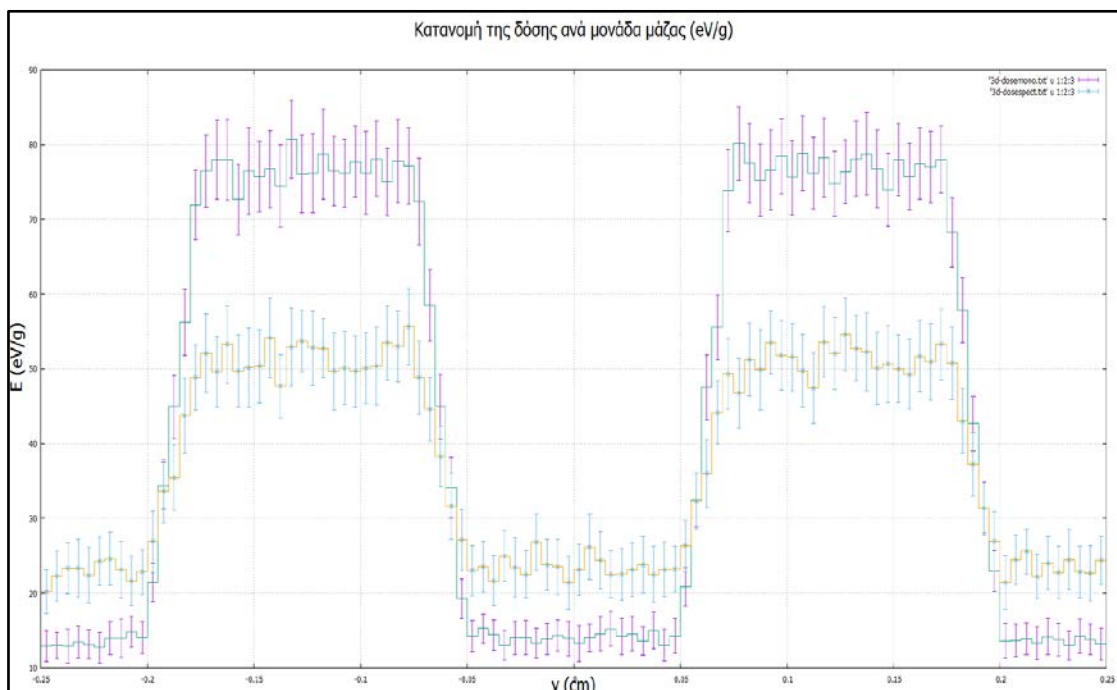
Σχήμα 5.81-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης για μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων 30 keV

- **Φάσμα ακτινοβολίας:**



Σχήμα 5.82-Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με φάσμα ακτινοβολίας

- **Συγκεντρωτικό σχήμα αποτελεσμάτων**



Σχήμα 5.83-Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων ενέργειας 30 keV και φάσματος ακτινοβολίας

6^ο Κεφάλαιο : Επίλογος

6.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί τη σύνοψη της Διπλωματικής Εργασίας. Θα πραγματοποιηθεί ανάλυση του περιεχομένου των κεφαλαίων της και θα τονιστούν τα σημεία, στα οποία υπήρξαν αξιόλογα συμπεράσματα.

Στόχος της εργασίας ήταν να διερευνηθεί κατά πόσον μπορεί να γίνει μελέτη των χαρακτηριστικών και ειδικότερα της διακριτικής ικανότητας μίας διάταξης απεικόνισης που χρησιμοποιεί μηχανή ακτίνων-Χ, χρησιμοποιώντας τεχνικές προσομοίωσης μέθοδο Monte Carlo. Αφού παρουσιασθεί η μελέτη που έγινε στα πλαίσια της Δ.Ε. θα ακολουθήσει αναφορά και στις προοπτικές που ενδεχομένως να δημιουργούνται μέσα από την εξέλιξη της παρούσας Δ.Ε.

6.2 Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας

Συνοψίζοντας το περιεχόμενο και τα αποτελέσματα της παρούσας Δ.Ε, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στο περιεχόμενο και τις έννοιες που πρόκειται να συναντήσει ο αναγνώστης διαβάζοντας την εργασία.

Αρχικά, στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μία ιστορική αναφορά στην ανακάλυψη των ακτίνων-Χ και ακολούθως αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους και οι ιδιότητές τους. Κατόπιν γίνεται προσπάθεια να γίνει όσον το δυνατόν πιο κατανοητό σε θεωρητικό επίπεδο, οι δυνατοί μηχανισμοί, με τους οποίους μπορεί να δημιουργηθούν οι ακτίνες-Χ. Επιπλέον, αναλύεται η μορφή του φάσματος των ακτίνων-Χ, ως αποτέλεσμα του συνεχούς φάσματος που εκπέμπουν τα επιβραδυνόμενα ηλεκτρόνια (ακτινοβολία πέδησης) αλλά και των χαρακτηριστικών φωτοκορυφών που προέρχονται την αποδιέγερση των ατόμων του υλικού της ανόδου. Στη συνέχεια πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στους μηχανισμούς, κάτω από τους οποίους πραγματοποιούνται αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ακτίνων-Χ και της ύλης. Παρουσιάστηκαν αναλυτικά και τα τέσσερα φαινόμενα (ελαστική σκέδαση, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, σκέδαση Compton, δίδυμη γένεση). Τέλος διατυπώθηκε ο νόμος της εξασθένησης και έγινε αναφορά στον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι τύποι των μηχανών που παράγουν ακτίνες-Χ. Εφόσον έχει αναλυθεί το θεωρητικό υπόβαθρο της παραγωγής στο προηγούμενο κεφάλαιο, τώρα είναι πιο άμεση η κατανόηση της

δομής και της λειτουργίας των μηχανών και δίνονται κατασκευαστικά στοιχεία για συνιστώσες της διάταξης που θα απασχολήσουν στα πλαίσια της Δ.Ε., όπως είναι το σημείο εστίασης. Επιπροσθέτως, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην έννοια της ποιότητας κατά την εκτέλεση απεικονιστικών τεχνικών και περιλαμβάνει πολλούς παράγοντες, από την σωστή τάση λειτουργίας της μηχανής των ακτίνων-Χ έως την σωστή μετάδοση της πληροφορίας και την όσο το δυνατόν καλύτερη απεικόνισής της σε οθόνη ή σε φιλμ ραδιογραφίας. Παράλληλα, εισάγονται και αναλύονται έννοιες όπως το Half Value Layer, η διάρκεια της ραδιογραφίας και τονίζεται η σημασία του μεγέθους του σημείου εστίασης. Επιπλέον περιγράφονται αναλυτικά τα δοκίμια δοκιμών (test objects), τα οποία χρησιμοποιούνται στα πλαίσια του περιοδικού ελέγχου που επιβάλλει το πρόγραμμα ποιότητας για τη λειτουργία της μηχανής ακτίνων-Χ. Για την ποιότητα της εικόνας της εκτελούμενης ραδιογραφίας πραγματοποιείται εκτενής αναφορά σε όλα τα μεγέθη που καθορίζουν την ορθότητα της πληροφορίας που προβάλλεται (ασάφεια, γεωμετρική ασάφεια, ανάλυση, θόρυβος, αντίθεση). Στο τελευταίο τμήμα του κεφαλαίου επικεντρώνεται στη Συνάρτηση Μεταφοράς Διαμόρφωσης (MTF), η οποία δείχνει με ποσοτικό τρόπο τη μεταβολή της πληροφορίας καθώς αυτή γίνεται αντικείμενο επεξεργασίας από τα διάφορα υποσυστήματα που συγκροτούν μία διάταξη διαγνωστικής ραδιογραφίας. Η ανάλυση περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της συνάρτησης τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά πληροφορίες για τον κώδικα προσομοίωσης Monte Carlo PENELOPE που χρησιμοποιήθηκε, τον τρόπο λειτουργίας του και το λογικό διάγραμμά του. Παράλληλα, καταγράφονται για λόγους πληρότητας τα τρία προγράμματα που περιλαμβάνει ο κώδικας (Penslab, Pencyl και Penmain). Ασφαλώς αναλύεται σε βάθος ο κώδικας Penmain και οι δυνατότητες που παρέχει στον χρήστη κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής του. Επιπλέον δίνεται αναλυτική περιγραφή των αρχείων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε προσομοίωση (αρχείο υλικού, αρχείο εισόδου δεδομένων, αρχείο γεωμετρίας) καθώς και της δυνατότητας που δίνει ο κώδικας στον ορισμό εικονικών ανιχνευτών. Στη συνέχεια δίνονται βασικές οδηγίες στην εκτέλεση του κώδικα Penmain και τέλος παρουσιάζονται τα αρχεία αποτελεσμάτων του κώδικα, με ιδιαίτερη έμφαση στο αρχείο που συνδέεται με τον εικονικό ανιχνευτή δόσης, το οποίο θα αποτελέσει την πηγή των δεδομένων βάσει των οποίων χαράχθηκαν τα περισσότερα γραφήματα της Δ.Ε. και από τα την επεξεργασία των οποίων προέκυψαν τα συμπεράσματα του 5^{ου} κεφαλαίου.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάστηκε το σύνολο των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. Αρχικά αναλύεται η διαδικασία στατιστικών υπολογισμών που χρειάστηκε να γίνουν και στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με διαφορετικές παραμέτρους του συστήματος απεικόνισης. Συγκρίθηκαν αποτελέσματα προσομοιώσεων με διαφορετικές ενέργειες αποκοπής και διαφορετικούς συντελεστές σκέδασης. Επιπροσθέτως έγινε σύγκριση προσομοιώσεων με διαφορετικό υλικό στο φιλμ ραδιογραφίας. Το σύνολο των παραπάνω προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε προκειμένου να απαντηθούν μία σειρά ερωτημάτων που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας και θεωρήθηκε πως θα έπρεπε να διερευνηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο.

Ωστόσο, βασικός στόχος της εργασίας ήταν η μελέτη της διακριτικής ικανότητας ενός απεικονιστικού συστήματος με μηχανή ακτίνων-Χ, με χρήση τεχνικών προσομοίωσης. Παρόλο που το πρόβλημα δεν ακούγεται πολύ δύσκολο, η κλίμακα των διαστάσεων της γεωμετρίας, για την οποία θα πρέπει να γίνει ο έλεγχος, και συγκεκριμένα του δοκιμίου ελέγχου δημιουργεί ορισμένους περιορισμούς. Για παράδειγμα κατά τη χρήση του ανιχνευτή δόσης το μέγεθος των κελιών πρέπει να είναι πολύ μικρό και ταυτόχρονα η ενέργεια που αποτίθεται σε κάθε κανάλι θα πρέπει να είναι επαρκής ώστε να συνοδεύεται από καλή στατιστική. Αυτό συνεπάγεται μεγάλη διάρκεια προσομοίωσης. Για τους σκοπούς της εργασίας επιλέχθηκαν μία σειρά από βασικές παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν το απεικονιστικό αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια του ελέγχου με δοκίμια ελέγχου (test objects), όπως: ενέργεια μονοενεργειακής ακτινοβολίας, μέγεθος focal spot, απόσταση δοκιμίων δοκιμής, χωρική πυκνότητα δοκιμίων δοκιμής. Για κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη παραμετρική μελέτη.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν τόσο τα αποτελέσματα της καταγραφής στον ανιχνευτή δόσης άμεσα, όσο και μετά από στατιστική επεξεργασία. Η άμεση απεικόνιση δίνει εικόνα που προσομοιάζει με την πραγματική εικόνα που αποτυπώνεται πάνω σε ένα φιλμ, ενώ διακρίνεται σαφώς και ο κβαντικός θόρυβος. Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων μετά από τη στατιστική επεξεργασία δίνει μία πιο καθαρή εικόνα, αφού μειώνει τη στατιστική κύμανση, ενώ παράλληλα επιτρέπει και τον υπολογισμό και μεγεθών όπως η ασάφεια των ορίων, η μεγέθυνση του αντικειμένου που απεικονίζεται κλπ.

Στα πλαίσια της Δ.Ε. διαπιστώθηκε μέσω της προσομοίωσης ότι μπορούν να επιβεβαιωθούν ικανοποιητικά οι τάσεις που παρουσιάζονται, ανάλογα από την επιλογή διαφόρων παραμέτρων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και μάλιστα για λογική χρονική διάρκεια προσομοίωσης. Για παράδειγμα, διαπιστώθηκε ότι η ικανότητα διάκρισης δύο πλακών μειώνεται όταν αυτές πλησιάζουν πολύ κοντά και μάλιστα σε πολύ μικρή απόσταση, κάτι που επιβεβαιώνεται από τη θεωρία. Τονίζεται ότι πρωταρχικός στόχος της Δ.Ε. δεν ήταν να γίνει ακριβής ποιοτικός έλεγχος μία διάταξης απεικόνισης, αλλά να εξεταστεί κατά πόσον είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η προσομοίωση προς την κατεύθυνση αυτή. Για αυτό το λόγο δεν δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που υπολογίζονται μέσω θεωρητικών σχέσεων, όπως για παράδειγμα το μέγεθος της ασάφειας. Άλλωστε, όπως διαπιστώθηκε δεν υπάρχει πάντα ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των δύο τιμών. Αυτό πιθανόν οφείλεται σε επιλογές που έγιναν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, όπως για παράδειγμα για τις ενέργειες αποκοπής, φωτονίων και ηλεκτρονίων. Η αναγκαστική επιλογή σχετικά υψηλών τιμών για τις ενέργειες αποκοπής, προκειμένου να επιταχυνθεί η προσομοίωση, ενδεχομένως εισάγει μικρή παραμόρφωση κατά την απεικόνιση, καθώς κατά την προσομοίωση η ενέργεια των φωτονίων και των ηλεκτρονίων ενδεχομένως δεν αποτίθεται ακριβώς εκεί που αποτίθεται στην πραγματικότητα.

6.3 Αξιολόγηση εργασίας - Μελλοντικά Βήματα

Στόχος της παρούσας Δ.Ε. ήταν η προσομοίωση της λειτουργίας μίας διάταξης ραδιογραφίας κατά τη διαδικασία ελέγχου της διακριτικής ικανότητας με δοκίμια ελέγχου. Έγινε δηλαδή προσπάθεια με ρεαλιστική επιλογή των διάφορων χαρακτηριστικών του συστήματος (διατομές, αποστάσεις, τιμές ενέργειες, επιλογή υλικών) να εκτιμηθούν η μεγέθυνση και η χωρική διακριτική ικανότητα, τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά. Διαπιστώθηκε ότι είναι δυνατό να γίνει με ικανοποιητικό τρόπο η προσομοίωση ακόμα και σε επίπεδο διαστάσεων κάτω του ενός χιλιοστού.

Φυσικά, το πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε ήταν αρκετά απλοποιημένο. Για παράδειγμα, τα δοκίμια ελέγχου είχαν πάντα το ίδιο πλάτος και ρυθμιζόταν μόνο η μεταξύ τους απόσταση. Επίσης τα δοκίμια ελέγχου βρισκόταν στον αέρα και δεν λήφθηκε υπόψη η συνεισφορά των σκεδάσεων που πραγματοποιούνται όταν το δοκίμιο ελέγχου τοποθετηθεί μέσα σε ένα phantom. Ακόμα δεν ελήφθη υπόψη η επίδραση άλλων παραμέτρων στη διακριτική ικανότητα της διάταξης, όπως η

ύπαρξη των κόκκων AgBr. Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα να μελετηθεί η διακριτική ικανότητα ενός τέτοιου συστήματος χρησιμοποιώντας διαφορετικά test objects που χρησιμοποιούνται σε ποιοτικούς ελέγχους.

Μελλοντικά, η εργασία αυτή θα μπορούσε να επεκταθεί προς την κατεύθυνση της προσομοίωσης πλέον πολύπλοκου, αλλά και ρεαλιστικού προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα αναφερόμενα στην προηγούμενη παράγραφο, τη μελέτη και άλλων παραμέτρων, όπως της αντίθεσης εικόνας (contrast), την εκτίμηση του λόγου signal-to-noise στην απεικόνιση κλπ. Επίσης, θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση της χρήσης ενισχυτικών οθονών κατά τη διάρκεια της απεικόνισης.

Σε ένα επόμενο βήμα θα μπορούσε να προσομοιωθεί και να μελετηθεί η διαδικασία απεικόνισης σε δοκίμια που προσομοιάζουν στο ανθρώπινο σώμα. Κατά την προσομοίωση αυτή θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη και η ύπαρξη κατευθυντή δέσμης και να εκτιμηθεί και η κατά βάθος κατανομή της δόσης στο ακτινοβολούμενο σώμα, με σκοπό τη συσχέτισή της με την ποιότητα της παραγόμενης εικόνας.

Εν κατακλείδι, η παρούσα Δ.Ε. αποτελεί το εφαλτήριο για νέες Διπλωματικές Εργασίες και την επέκταση της μελέτης διαγνωστικών συστημάτων ραδιογραφίας μέσω της προσομοίωσης.

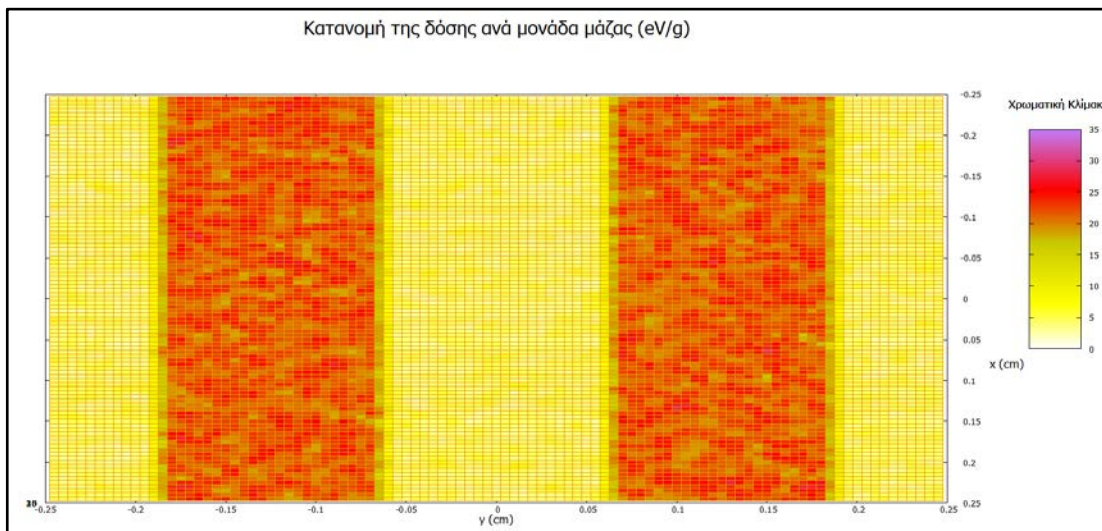
Παραρτήματα

1 Παράρτημα Α-Παρουσίαση όλων των προσομοιώσεων της παραμετρικής μελέτης με διαγράμματα χρωματικής κλίμακας

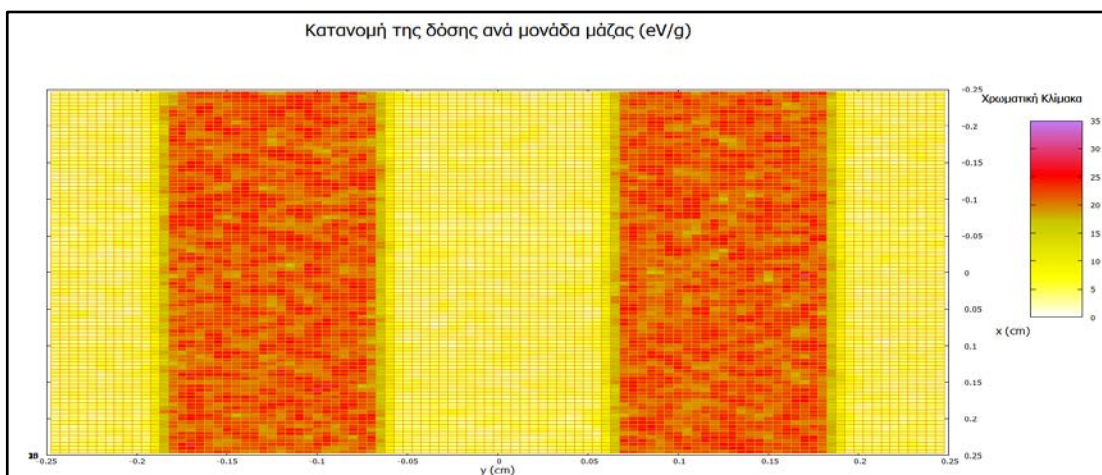
Όπως αναφέρθηκε στο 6^ο κεφάλαιο, σε αυτό το σημείο της εργασίας θα παρουσιαστούν όλα τα διαγράμματα με χρωματική κλίμακα που συνδέονται με το βασικό τμήμα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. (Παράγραφος 5.5-Μελέτη διακριτικής ικανότητας της μηχανής ακτίνων Χ)

1 Το μέγεθος του σημείου εστίασης:

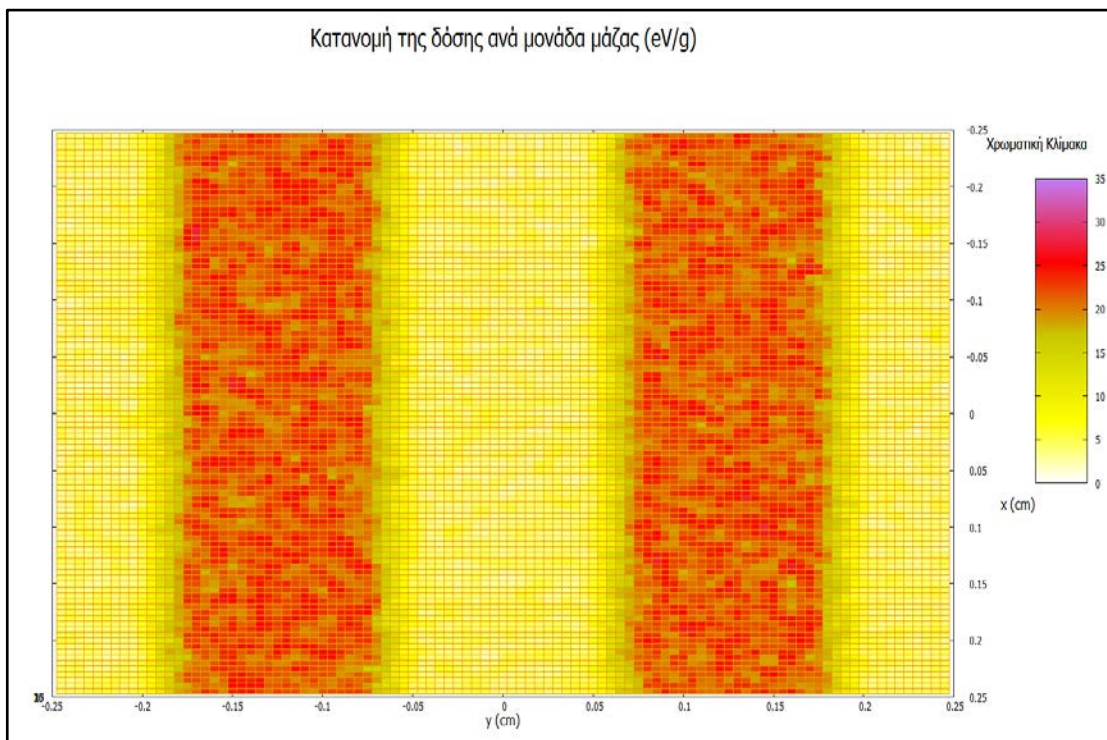
i. Διάσταση focal spot $0.03 \times 0.03 \text{ cm}^2$:



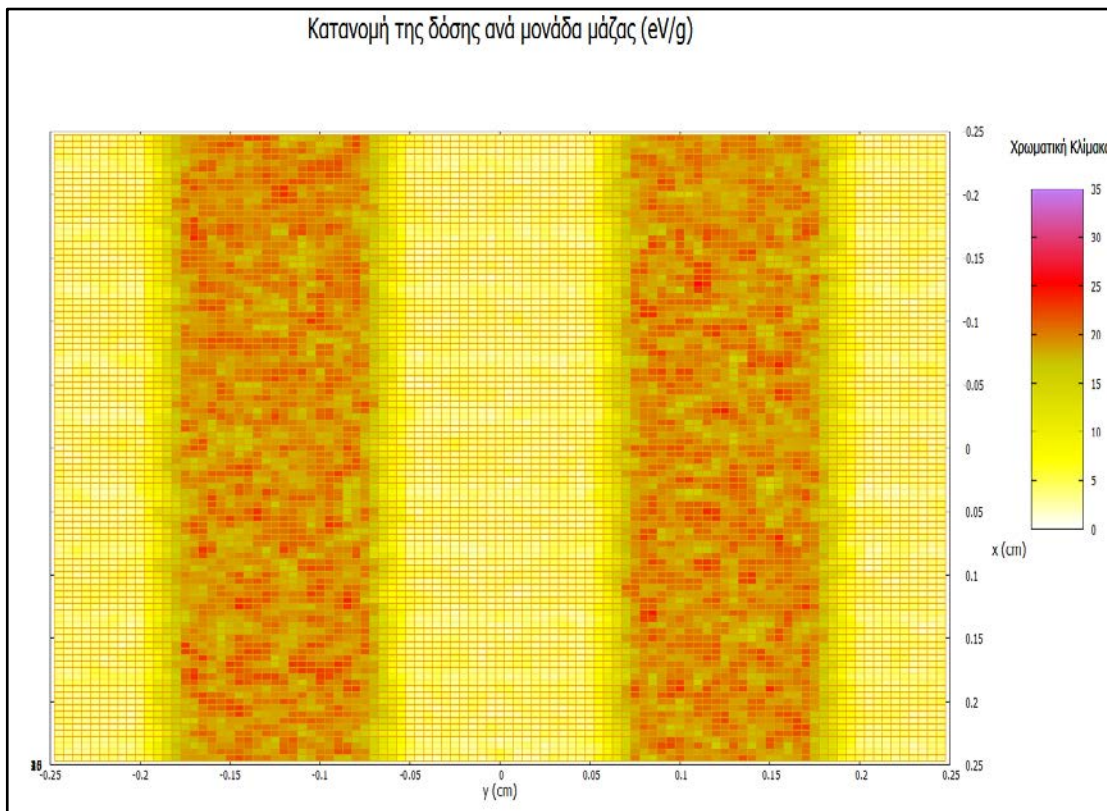
ii. Διάσταση focal spot $0.05 \times 0.05 \text{ cm}^2$:



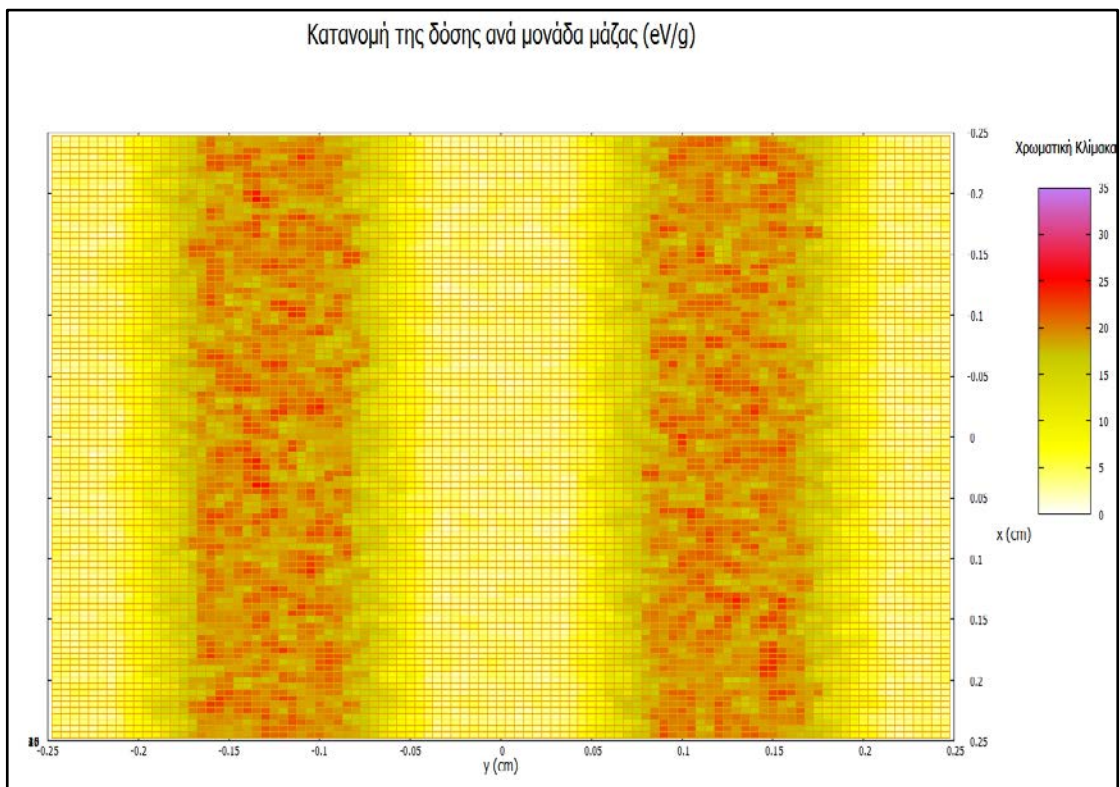
iii. Διάσταση focal spot $0.10 \times 0.10 \text{ cm}^2$:



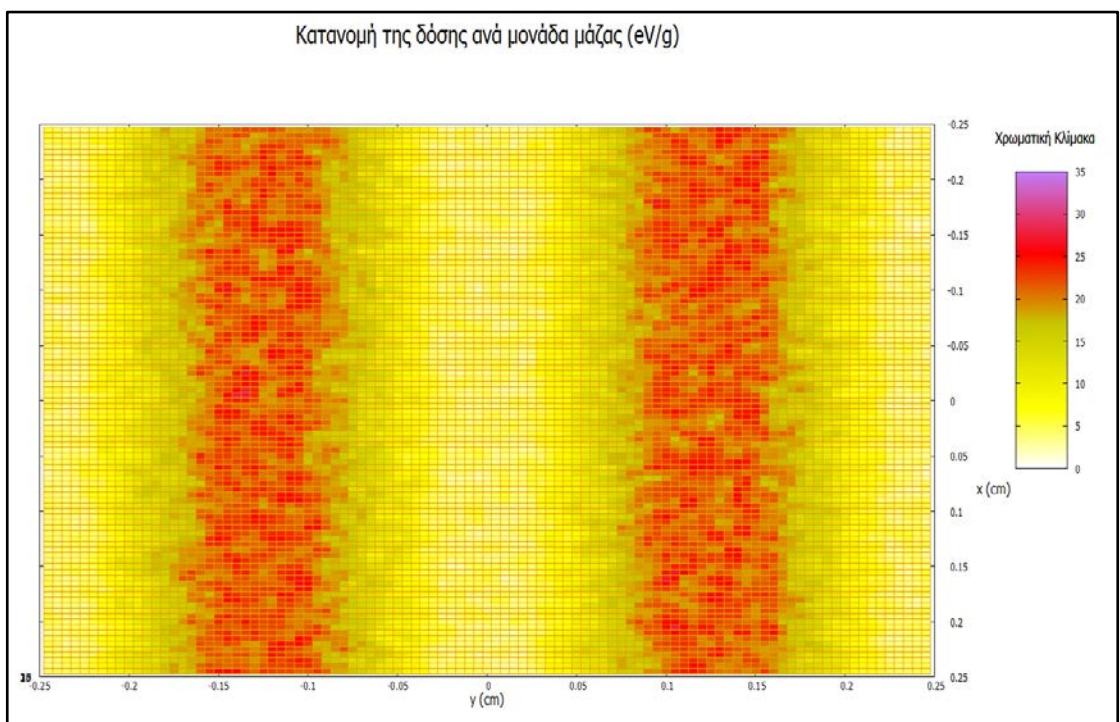
iv. Διάσταση focal spot $0.12 \times 0.12 \text{ cm}^2$:



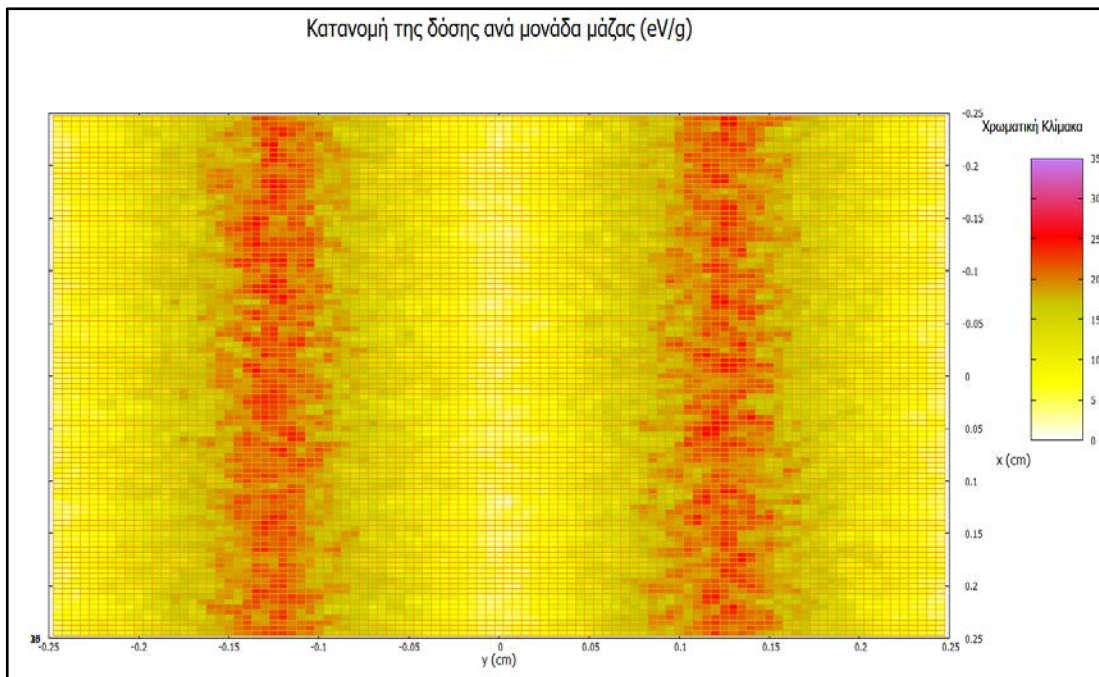
v. Διάσταση focal spot $0.20 \times 0.20 \text{ cm}^2$:



vi. Διάσταση focal spot $0.30 \times 0.30 \text{ cm}^2$:

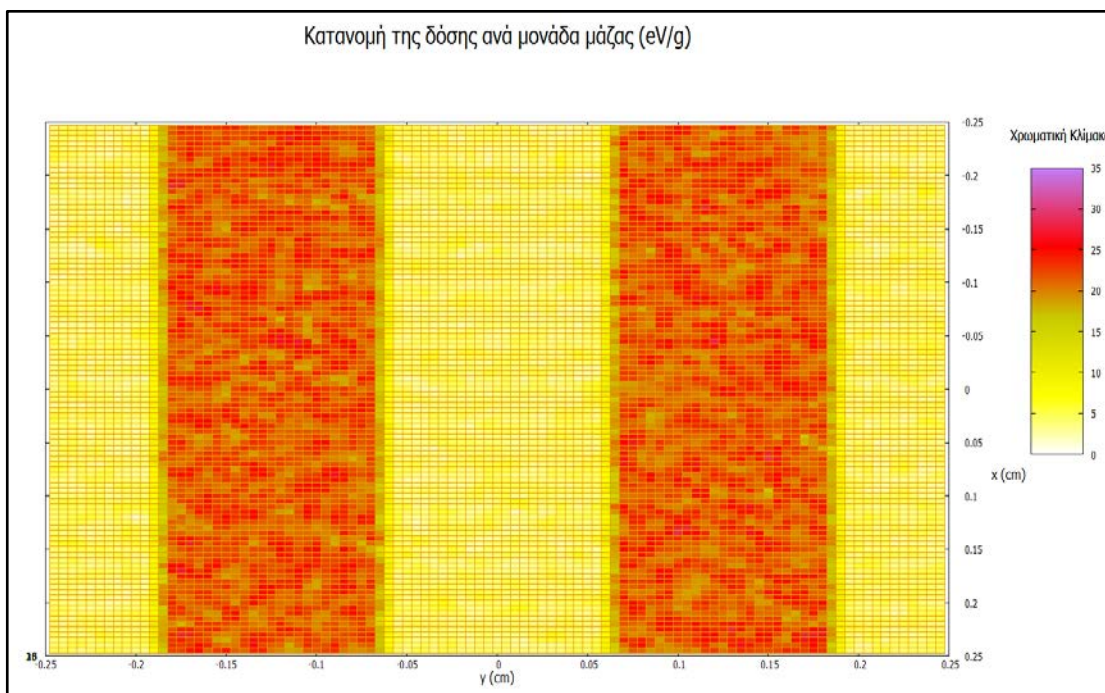


vii. Διάσταση focal spot $0.50 \times 0.50 \text{ cm}^2$:

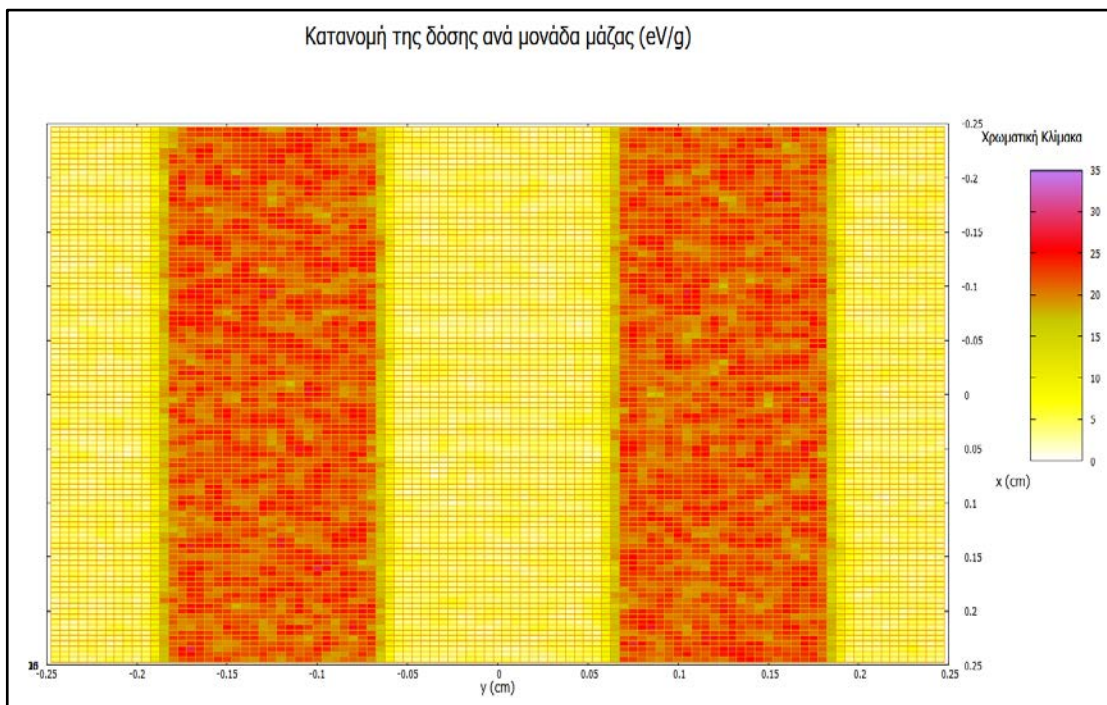


2 Η μεταβολή της απόστασης μεταξύ δοκιμίων δοκιμής και φιλμ

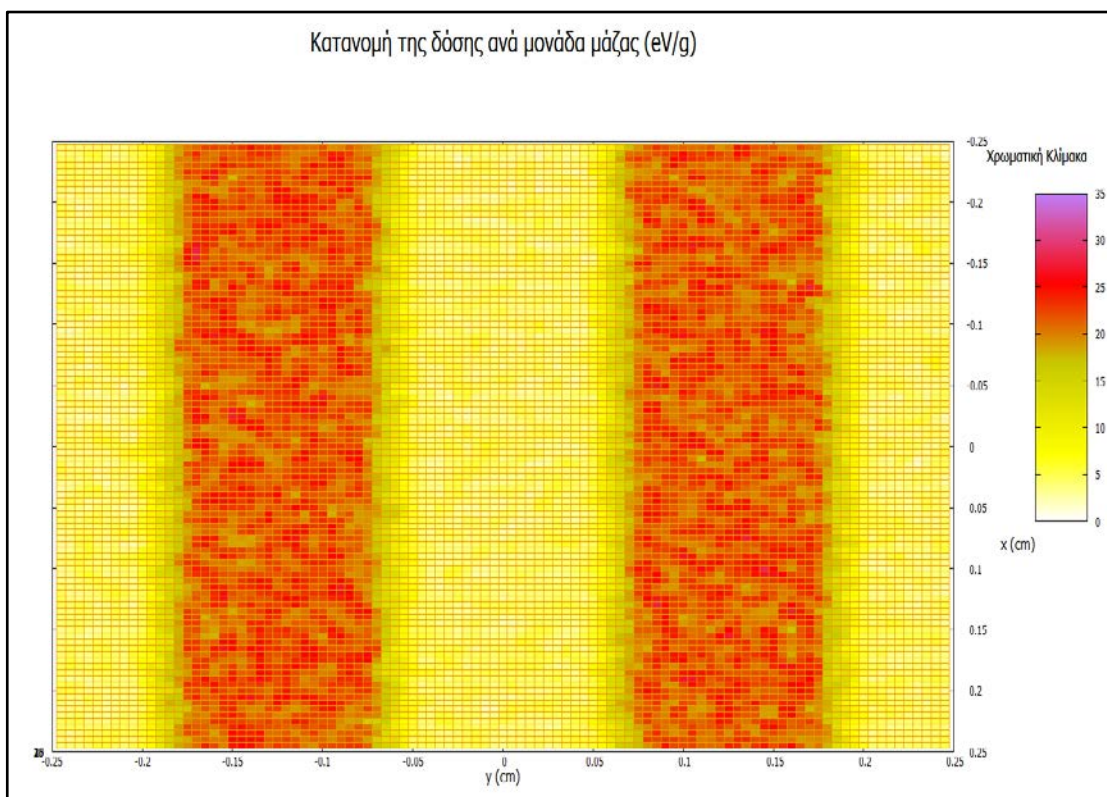
i. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 0 cm και απόσταση πηγής δοκιμίων 100 cm (το φιλμ βρίσκεται σε επαφή με τα δοκίμια) :



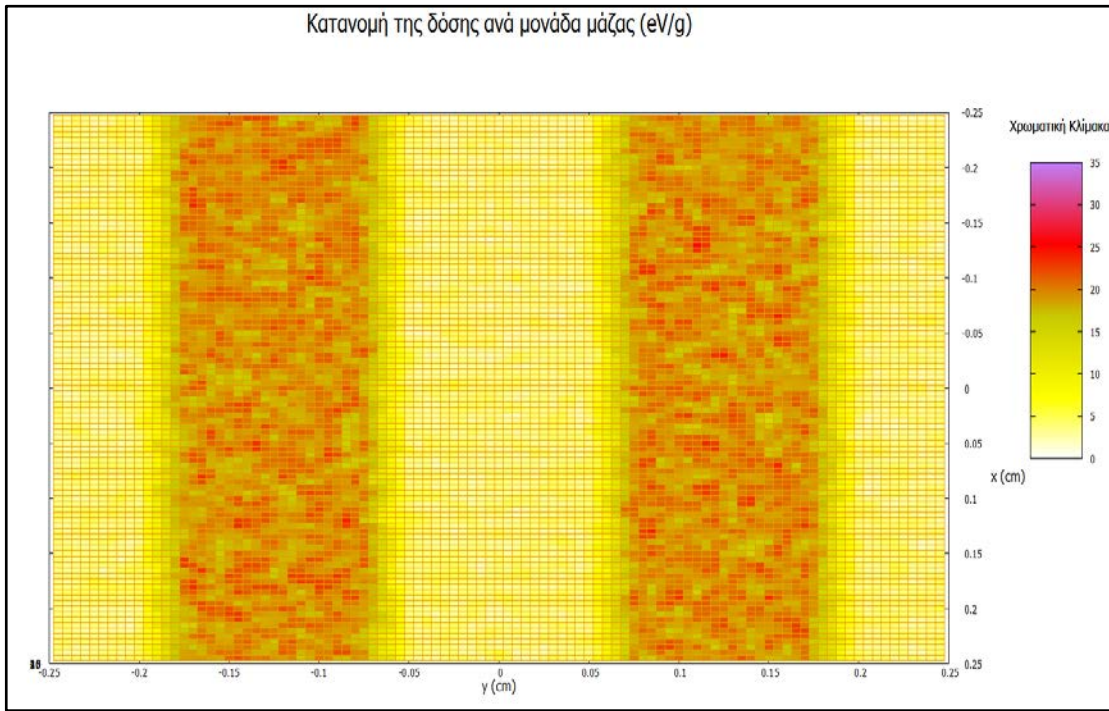
ii. Απόσταση δοκιμών-φιλμ 10 cm και απόσταση πηγής-δοκιμών 90 cm:



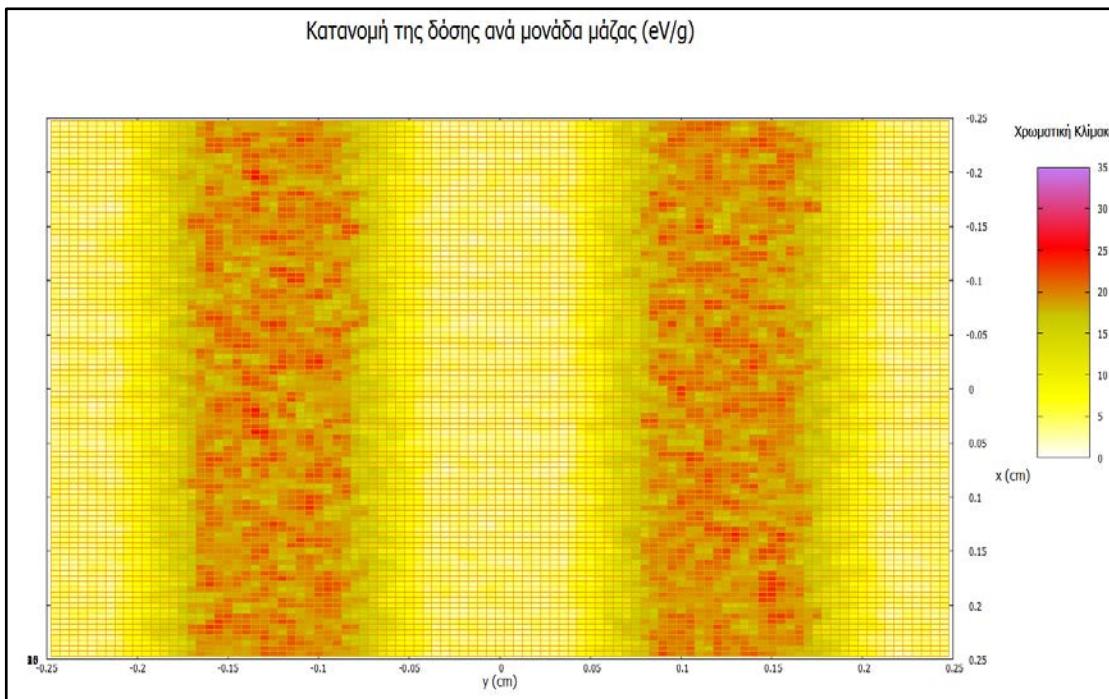
iii. Απόσταση δοκιμών-φιλμ 20 cm και απόσταση πηγής-δοκιμών 80 cm:



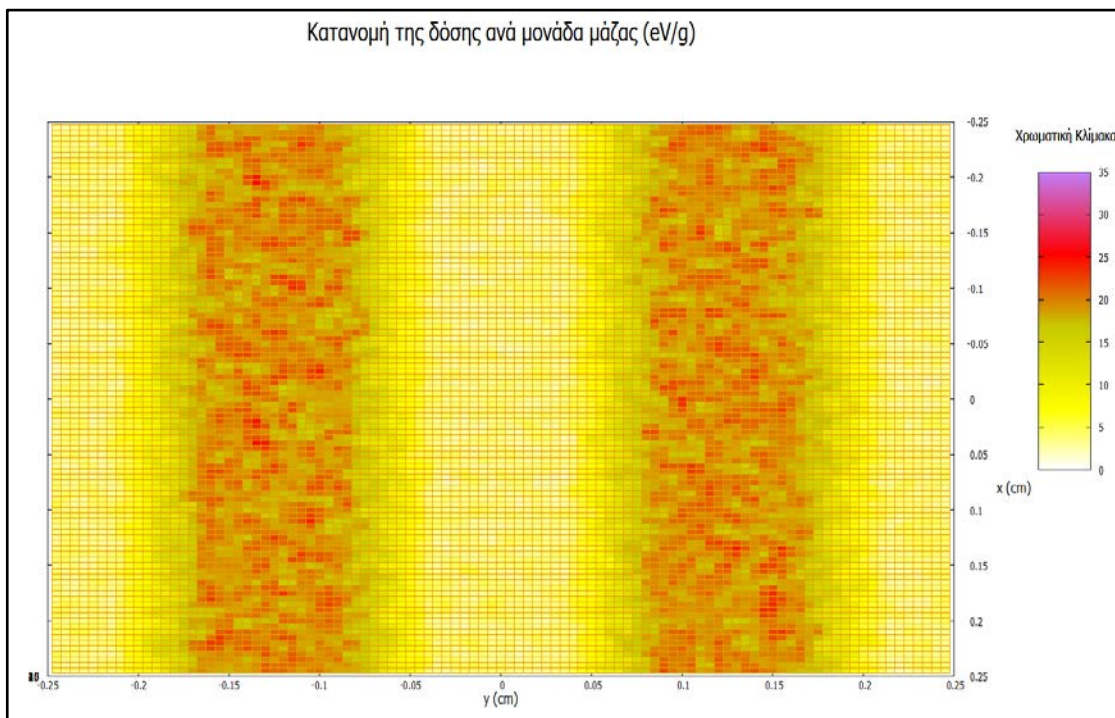
iv. Απόσταση δοκιμών-φιλμ 30 cm και απόσταση πηγής-δοκιμών 70 cm:



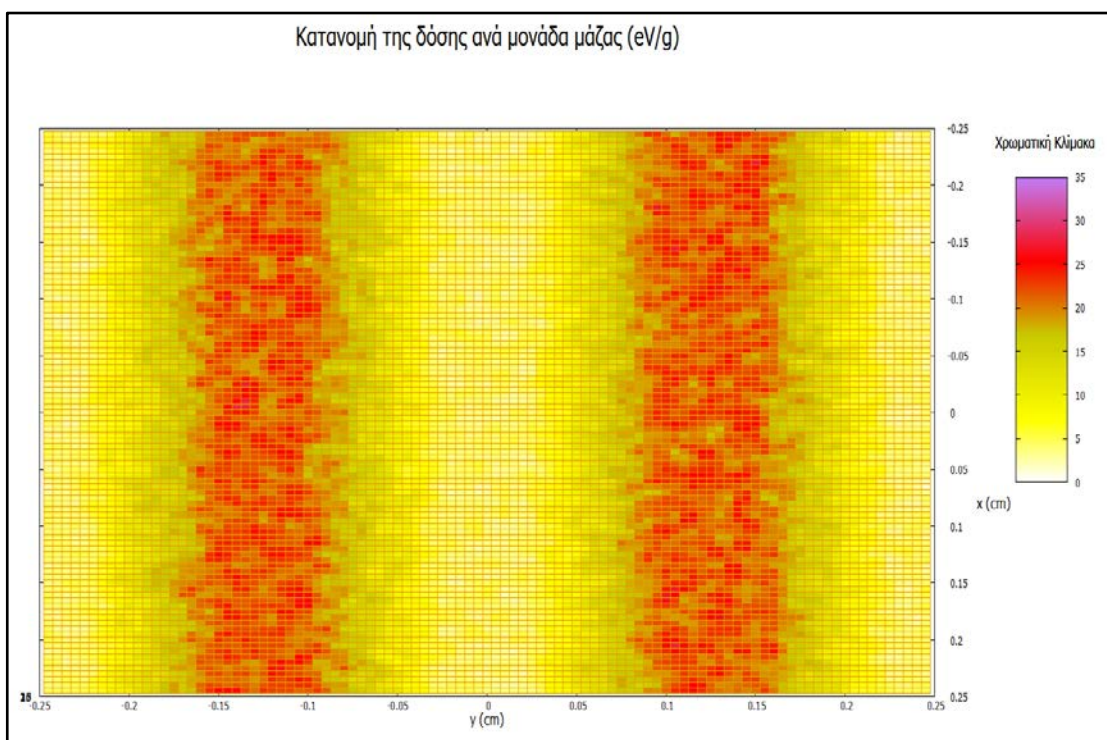
v. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 40 cm και απόσταση πηγής-δοκιμίων 60 cm:



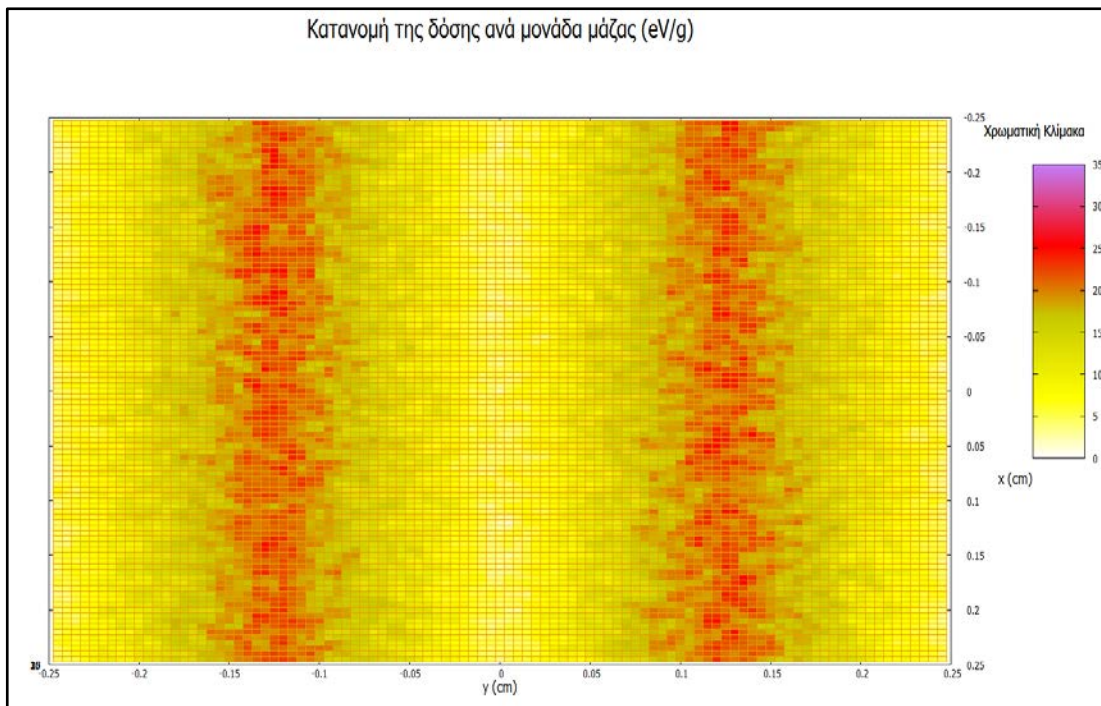
vi. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 50 cm και απόσταση πηγής-δοκιμίων 50 cm:



vii. Απόσταση δοκιμίων-φιλμ 40 cm και απόσταση πηγής-δοκιμίων 60 cm:

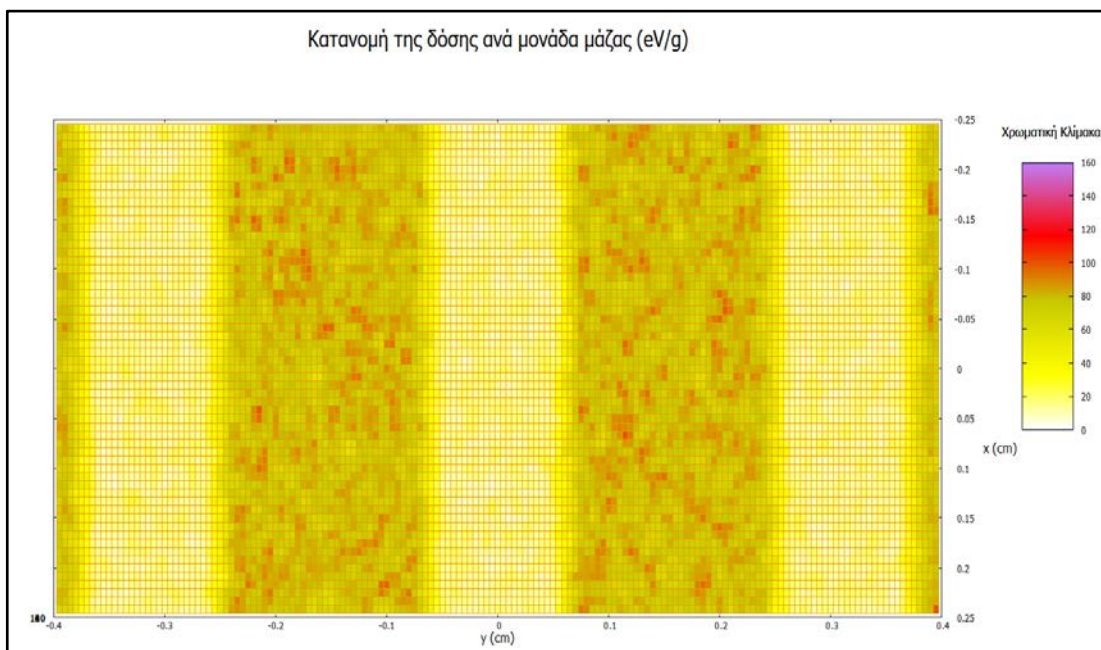


viii. Απόσταση δοκιμών-φιλμ 30 cm και απόσταση πηγής δοκιμών 70 cm:

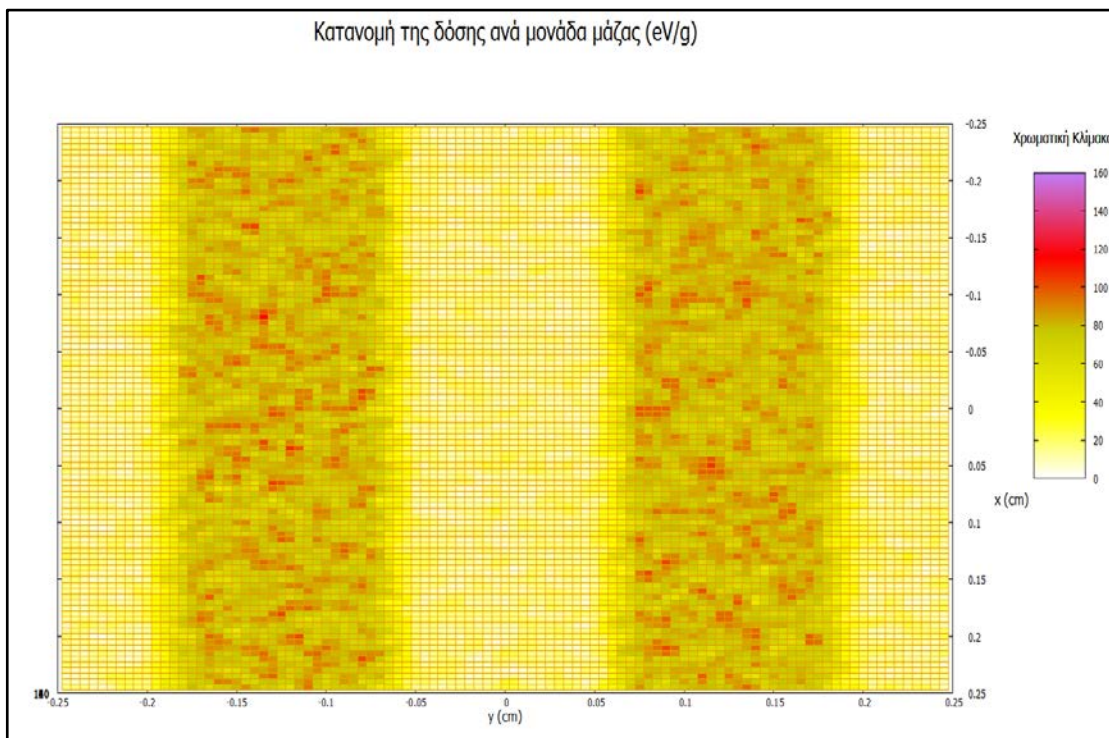


3 Η μεταβολή της απόστασης των δοκιμών δοκιμής

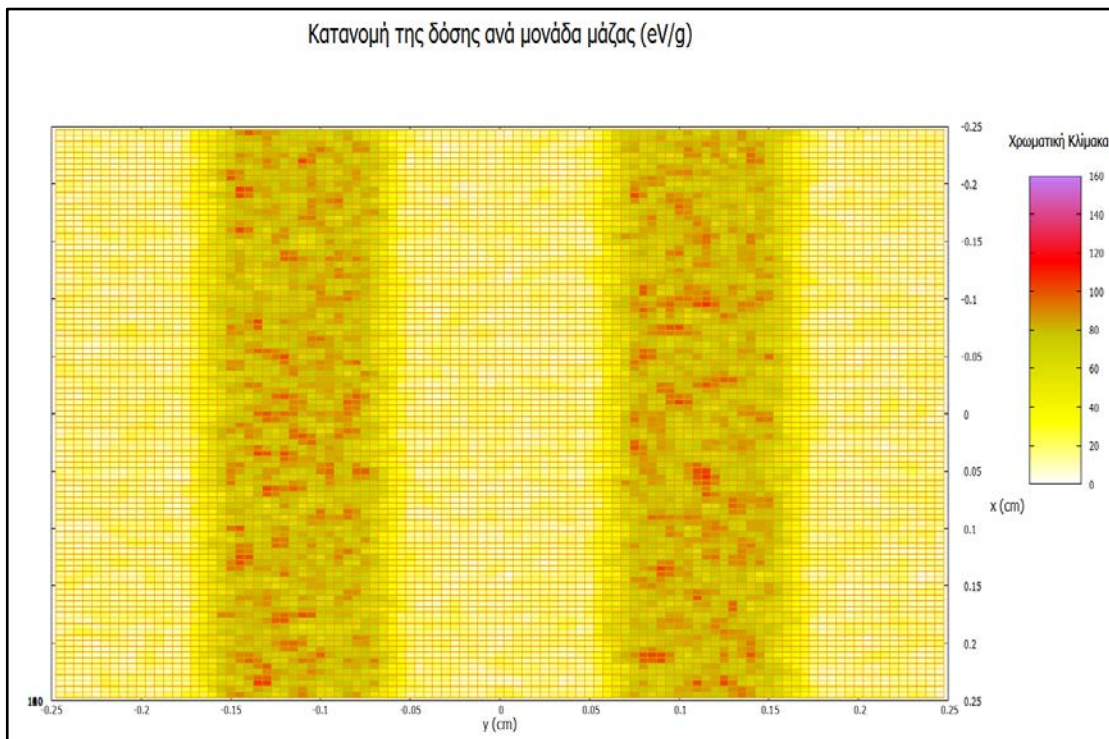
i. Απόσταση δοκιμών 1.5 mm :



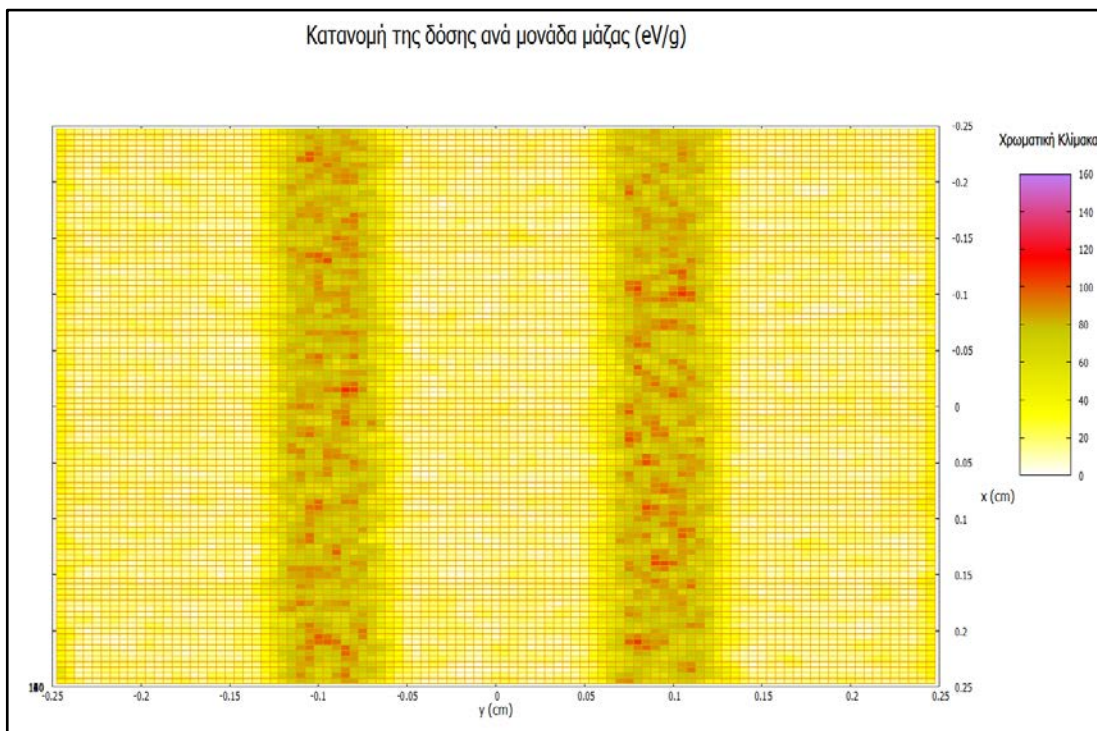
ii. Απόσταση δοκιμών 1.0 mm:



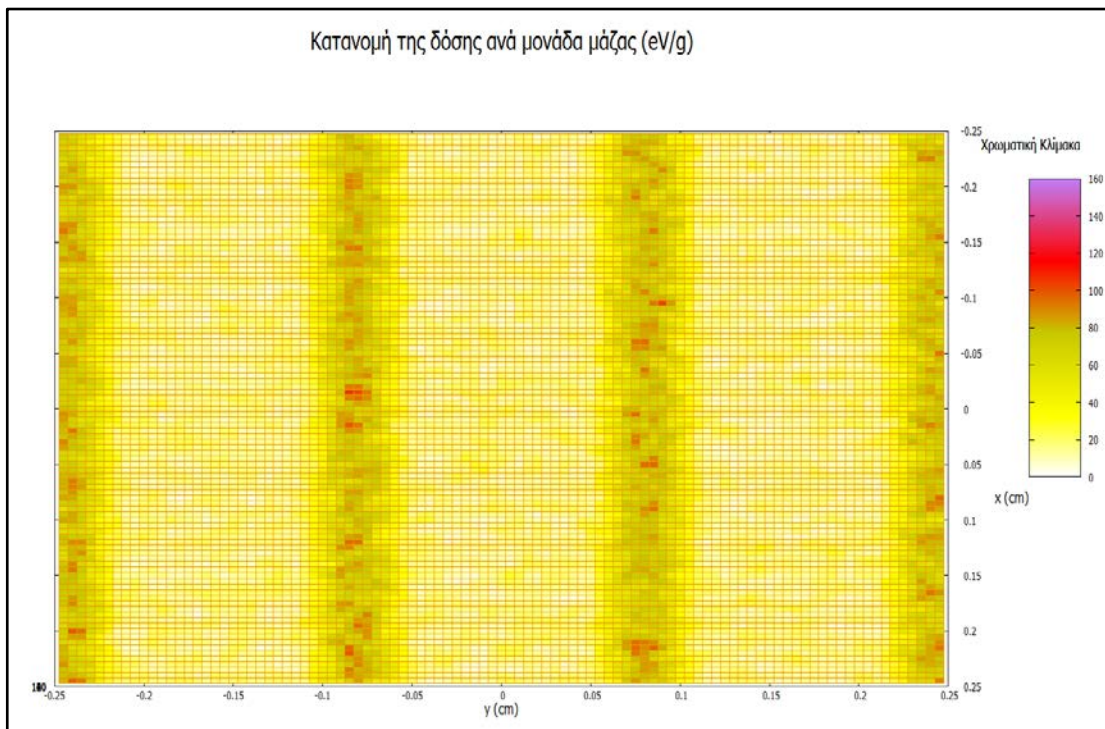
iii. Απόσταση δοκιμών 0.8 mm:



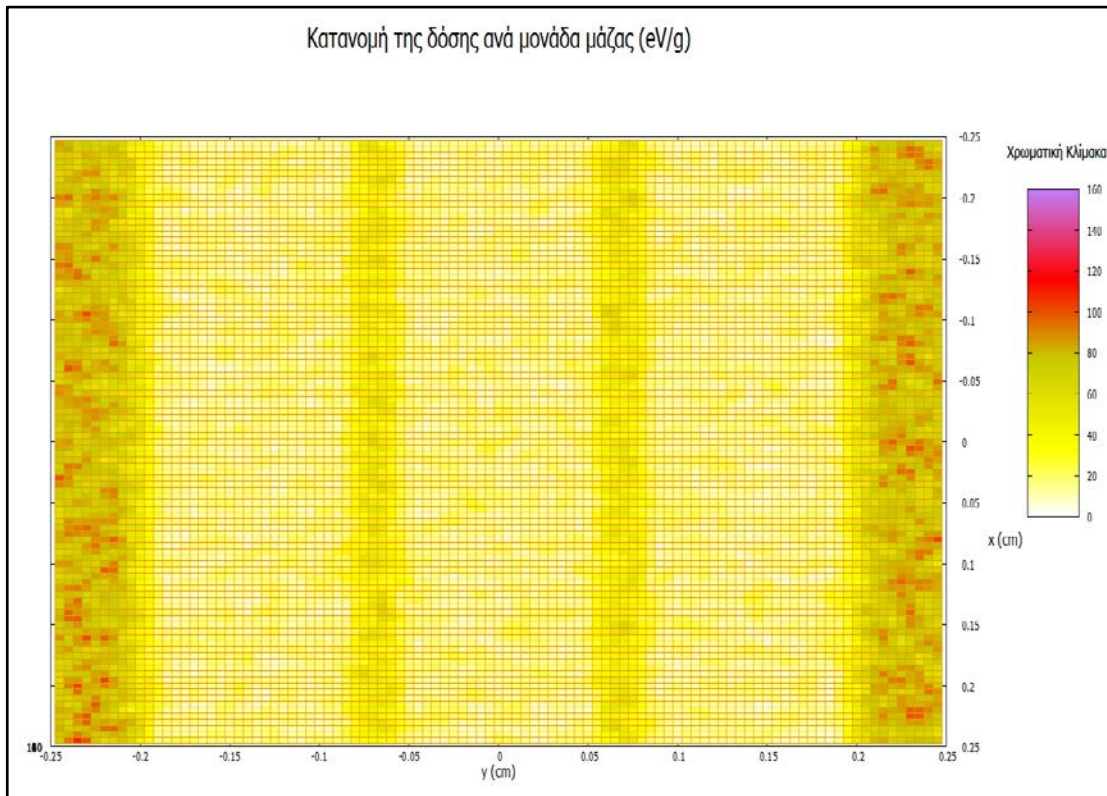
iv. Απόσταση δοκιμών 0.5 mm:



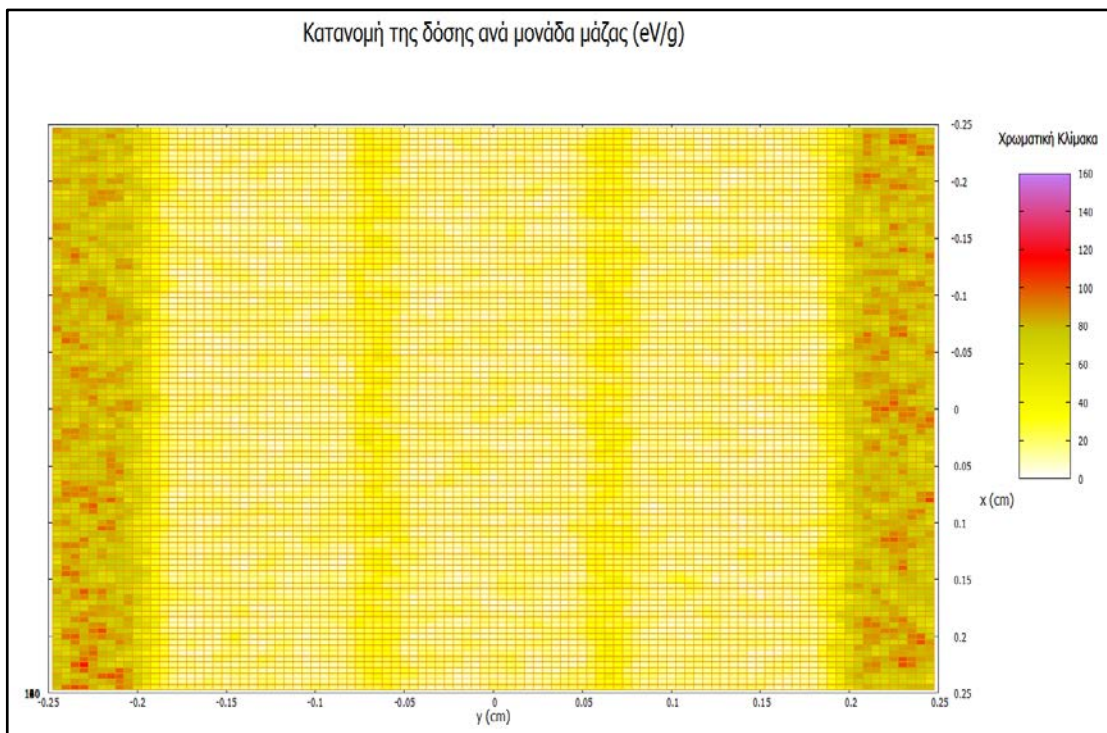
v. Απόσταση δοκιμών 0.3 mm:



vi. Απόσταση δοκιμών 0.1 mm:

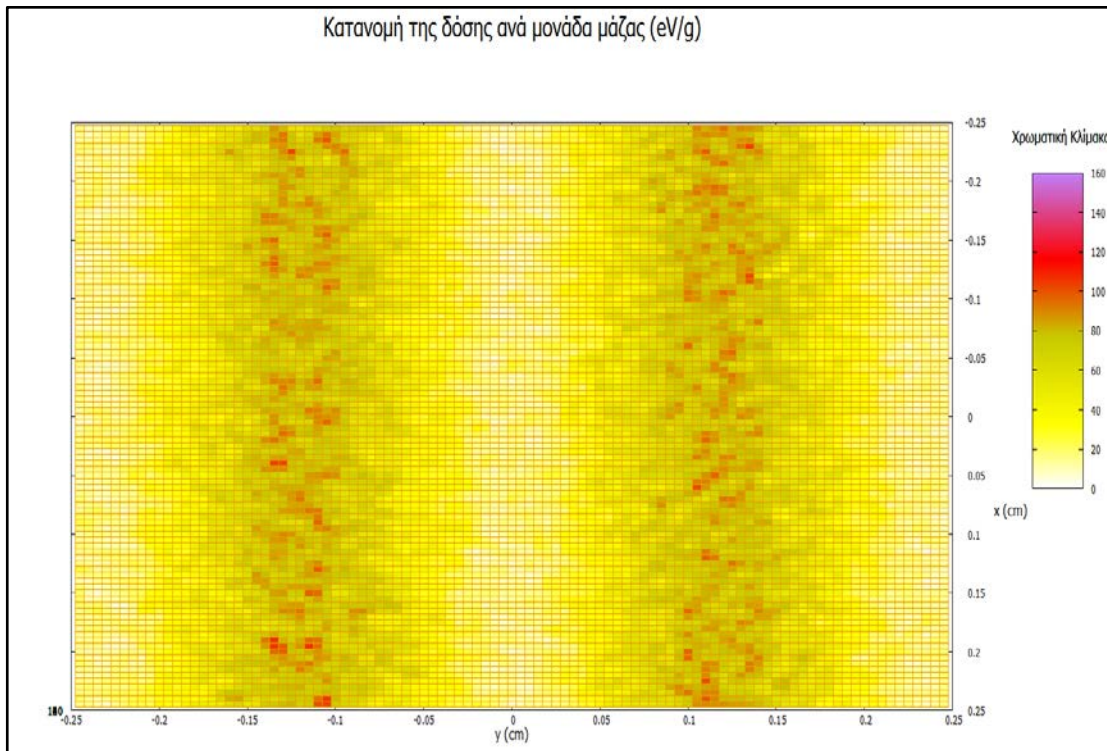


vii. Απόσταση δοκιμών 0.05 mm:

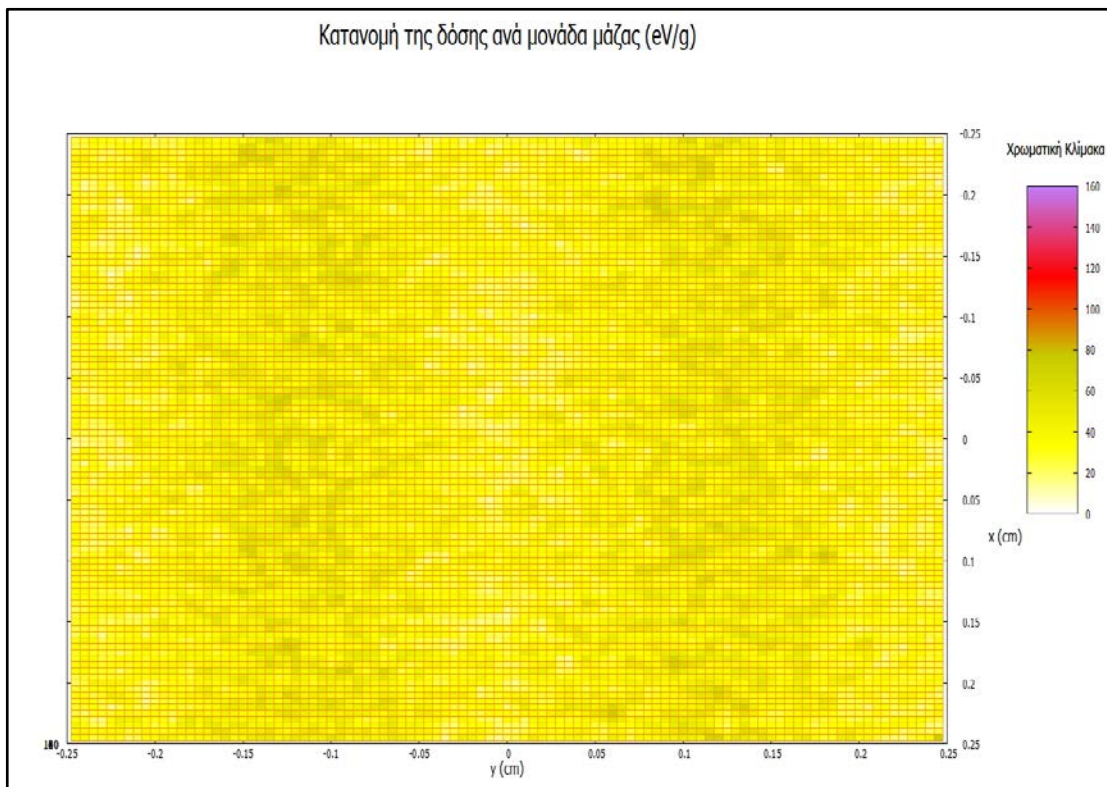


4 Η ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας

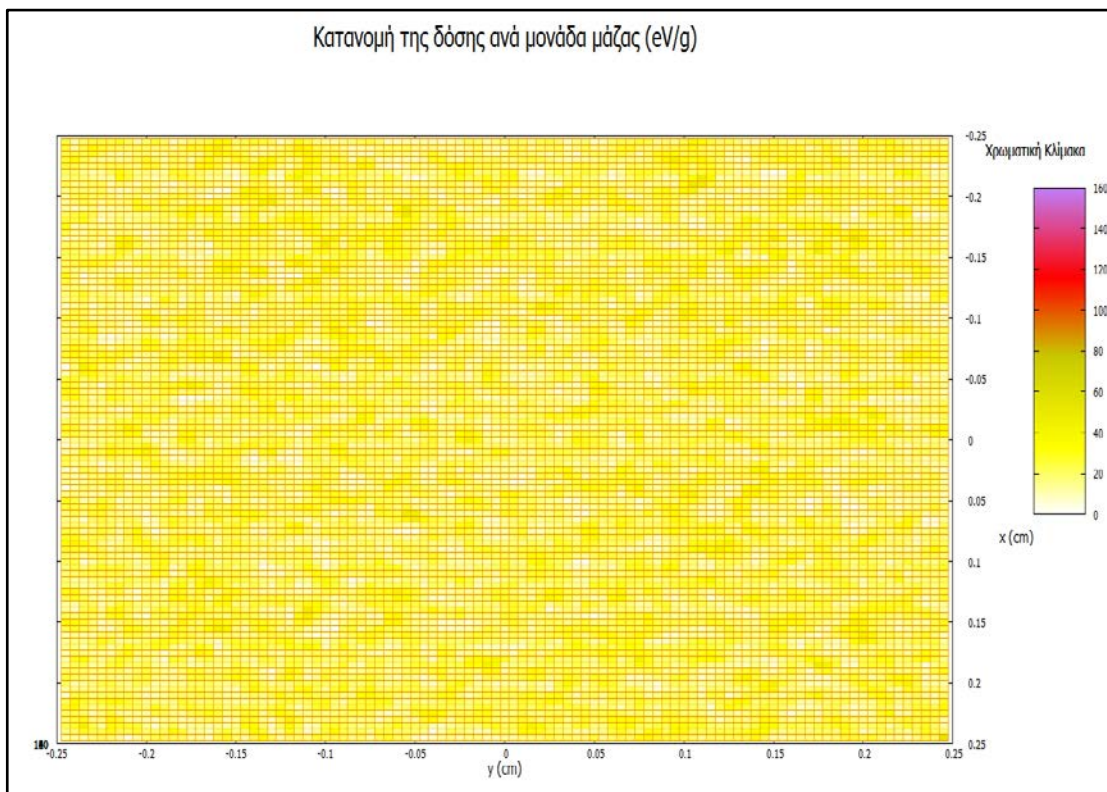
i. Ενέργεια ακτινοβολίας 30 keV:



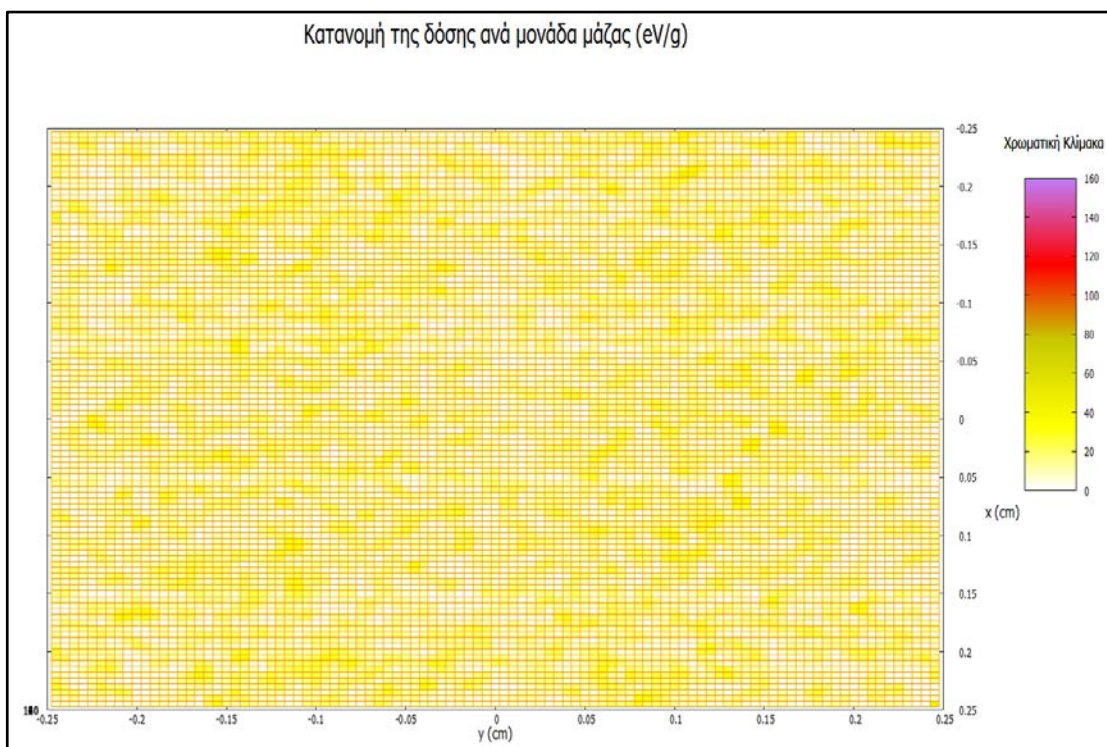
ii. Ενέργεια ακτινοβολίας 50 keV:



iii. Ενέργεια ακτινοβολίας 80 keV:



iv. Ενέργεια ακτινοβολίας 100 keV:



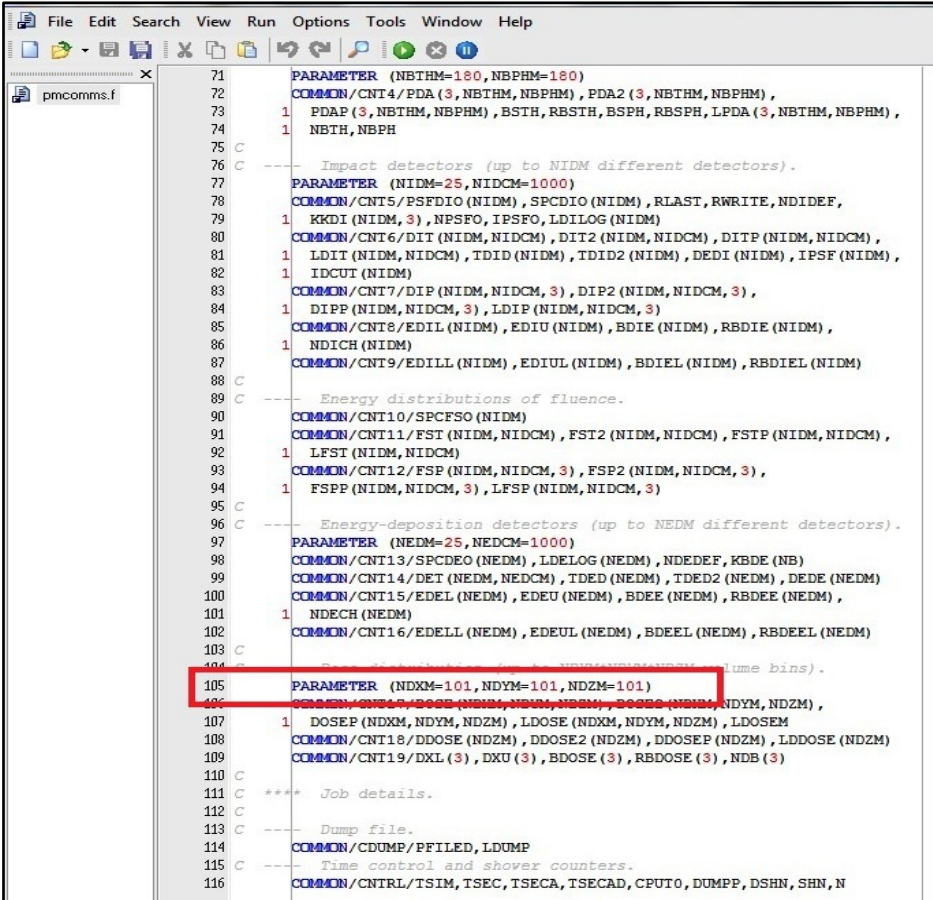
2 Παράρτημα Β-Διαδικασία αλλαγής κώδικα για τον ορισμό ανιχνευτών με μεγαλύτερη διαμέριση

Όπως αναφέρθηκε στο 5^ο κεφάλαιο, υπήρξε ανάγκη για αύξηση της ανάλυσης του ανιχνευτή δόσης με στόχο να παρουσιαστούν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Ωστόσο ο κώδικας Penmain δεν επιτρέπει τον ορισμό ανιχνευτή με περισσότερα voxels ανά διάσταση. Συνεπώς χρειάστηκε παρέμβαση στον κώδικα με στόχο να αυξήσουμε την ανάλυση κατά τον άξονα που μας ενδιαφέρει.

Για την αλλαγή στον κώδικά θα πρέπει να μεταβάλλουμε το περιεχόμενο του αρχείου pmcomms.f που βρίσκεται στην ακόλουθη θέση:

penelope / mains / penmain

Ανοίγουμε το αρχείο με τη βοήθεια προγράμματος επεξεργασίας αρχείο fortran και αλλάζουμε τα ανώτατα όρια του ανιχνευτή που βρίσκονται στη γραμμή 105 του κώδικα fortran όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα:



```
71 PARAMETER (NBTHM=180, NBPHM=180)
72 COMMON/CNT4/PDA (3, NBTHM, NBPHM), PDA2 (3, NBTHM, NBPHM),
73 1 PDA2 (3, NBTHM, NBPHM), BSTH, RBSTH, BSPH, RBSPH, LPDA (3, NBTHM, NBPHM),
74 1 NBTH, NBPH
75 C
76 C --- Impact detectors (up to NIDM different detectors).
77 PARAMETER (NIDM=25, NIDCM=1000)
78 COMMON/CNT5/PSFDIO (NIDM), SPCDIO (NIDM), RLAST, RWRITE, NDIDEF,
79 1 KKDI (NIDM, 3), NPSFO, IPSFO, LDILOG (NIDM)
80 COMMON/CNT6/DIT (NIDM, NIDCM), DIT2 (NIDM, NIDCM), DITP (NIDM, NIDCM),
81 1 LDIT (NIDM, NIDCM), TDID (NIDM), TDID2 (NIDM), DEDI (NIDM), IPSF (NIDM),
82 1 IDCUT (NIDM)
83 COMMON/CNT7/DIP (NIDM, NIDCM, 3), DIP2 (NIDM, NIDCM, 3),
84 1 DIPP (NIDM, NIDCM, 3), LDIP (NIDM, NIDCM, 3)
85 COMMON/CNT8/EDIL (NIDM), EDIU (NIDM), BDIE (NIDM), RBDIE (NIDM),
86 1 NDICH (NIDM)
87 COMMON/CNT9/EDILL (NIDM), EDIUL (NIDM), BDIEL (NIDM), RBDIEL (NIDM)
88 C
89 C --- Energy distributions of fluence.
90 COMMON/CNT10/SPCFSO (NIDM)
91 COMMON/CNT11/FST (NIDM, NIDCM), FST2 (NIDM, NIDCM), FSTP (NIDM, NIDCM),
92 1 LFST (NIDM, NIDCM)
93 COMMON/CNT12/FSP (NIDM, NIDCM, 3), FSP2 (NIDM, NIDCM, 3),
94 1 FSPP (NIDM, NIDCM, 3), LFSP (NIDM, NIDCM, 3)
95 C
96 C --- Energy-deposition detectors (up to NEDM different detectors).
97 PARAMETER (NEDM=25, NEDCM=1000)
98 COMMON/CNT13/SPCDEO (NEDM), LDELOG (NEDM), NDEDEF, KBDE (NB)
99 COMMON/CNT14/DET (NEDM, NEDCM), TDED (NEDM), TDED2 (NEDM), DEDE (NEDM)
100 COMMON/CNT15/EDEL (NEDM), EDEU (NEDM), BDEE (NEDM), RBDEE (NEDM),
101 1 NDECH (NEDM)
102 COMMON/CNT16/EDELL (NEDM), EDEUL (NEDM), BDEEL (NEDM), RBDEEL (NEDM)
103 C
104 C --- Energy-deposition detectors (up to NDXM different detectors).
105 PARAMETER (NDXM=101, NDYM=101, NDZM=101)
106 COMMON/CNT17/DOSE (NDXM, NDYM, NDZM), DOSE2 (NDXM, NDYM, NDZM),
107 1 DOSEP (NDXM, NDYM, NDZM), LDOSE (NDXM, NDYM, NDZM), LDOSEM
108 COMMON/CNT18/DDOSE (NDZM), DDOSE2 (NDZM), DDOSEP (NDZM), LDDOSE (NDZM)
109 COMMON/CNT19/DXL (3), DXU (3), BDOSE (3), RBDOSE (3), NDB (3)
110 C
111 C **** Job details.
112 C
113 C --- Dump file.
114 COMMON/CDUMP/PFILED, LDUMP
115 C --- Time control and shower counters.
116 COMMON/CNTRL/TSIM, TSEC, TSECA, TSECAD, CPUTO, DUMPP, DSHN, SHN, N
```

Σχήμα 2.1-Μεταβολή Κώδικα για ορισμό ανιχνευτή με περισσότερα voxels

Στη συνέχεια αποθηκεύουμε την αλλαγή και δημιουργούμε το αντίστοιχο εκτελέσιμο αρχείο. Για γίνει αυτό θα πρέπει στον ίδιο φάκελό να βρίσκονται όλα τα βασικά αρχεία fortran που βρίσκονται στη θέση:

penelope/ fsource

Η δημιουργία του εκτελέσιμου αρχείου θα πραγματοποιηθεί με την ακόλουθη εντολή:

```
> gfortran -Os -Wall penmain.f -o penmain1.exe
```

Με βάση την παραπάνω εντολή δημιουργήθηκε καινούριο εκτελέσιμο πρόγραμμα penmain1.exe στο οποίο τα ανώτατα όρια επιλογής voxel για τον ανιχνευτή δόσης είναι εναρμονισμένα με τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν. Το όνομα του εκτελέσιμου αρχείου είναι διαφορετικό από το αρχικό έτσι ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα με το αρχικό εκτελέσιμο. Στο ίδιο αρχείο μπορούμε να πραγματοποιήσουμε αλλαγές και για τα άλλα είδη εικονικών ανιχνευτών.

3 Παράρτημα Γ-Βοηθητικά προγράμματα προγράμματος Penelope

Στο 4^ο κεφάλαιο και συγκεκριμένα στην παράγραφο 4.3 παρουσιάστηκε η δομή του κώδικα Penelope. Ακολουθώντας στον explorer τη διαδρομή:

penelope/ other / tables / LEA

καταλήγουμε σε ένα φάκελο που περιέχει τα αρχεία LEA.f και mutren.f. Θα συνδέσουμε τα δύο αρχεία με τα αντίστοιχα αρχεία LEA.exe και mutren.exe με τις ακόλουθες εντολές:

```
> gfortran -Os -Wall LEA.f -o LEA.exe
```

```
> gfortran -Os -Wall mutren.f -o mutren.exe
```

Τα εκτελέσιμα αρχεία LEA.exe και mutren.exe πραγματοποιούν τον υπολογισμό του ολικού μαζικού αριθμού απορρόφησης για δοθέν υλικό. Για παράδειγμα θα εκτελέσουμε το εκτελέσιμο αρχείο mutren.exe για την περίπτωση του μολύβδου. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να βρίσκεται και το αρχείο υλικού

(Pb.mat) στον ίδιο φάκελο. Εκτελώντας το αρχείο επιλέγεται το επιθυμητό ποσοστό αβεβαιότητας, στο οποίο θα σταματήσει η προσομοίωση. Επιλέγεται ενέργεια 1 MeV και όριο αβεβαιότητας το 0.1. Τμήμα της εκτέλεσης του προγράμματος φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:

```

Enter the name of the material data file...
Pb.mat
# Material data file:      Pb.mat

To allow using input files with a generic format,
please, press the 'enter' key...

and, press the 'enter' key again...

Thank you!

Initialising PENELOPE ...
Tolerance? (in %, typically 0.1)
0.1
# Tolerance= 1.000000E-01 %

Photon energy (in eV)?
1000000
# E0= 1.000000E+06 eV
# EABS(e1)= 2.822366E+04 eU
# EABS(ph)= 5.000000E+01 eU
# EABS(po)= 1.000000E+03 eU
# mu/rho= 7.063596E-02 cm**2/g

#
#      N      mu_en/rho      unc (%)      <1-g>*f      f
3.539E+03  3.680E-02  9.7E-01  5.209E-01  5.537E-01
7.086E+03  3.648E-02  6.9E-01  5.164E-01  5.498E-01
1.066E+04  3.632E-02  5.7E-01  5.142E-01  5.483E-01
1.416E+04  3.630E-02  4.9E-01  5.140E-01  5.481E-01
1.760E+04  3.634E-02  4.4E-01  5.144E-01  5.489E-01
2.122E+04  3.627E-02  4.0E-01  5.135E-01  5.481E-01
2.464E+04  3.635E-02  3.7E-01  5.146E-01  5.497E-01
2.818E+04  3.637E-02  3.5E-01  5.148E-01  5.497E-01
3.166E+04  3.643E-02  3.3E-01  5.157E-01  5.507E-01
3.521E+04  3.637E-02  3.1E-01  5.149E-01  5.497E-01
3.875E+04  3.634E-02  3.0E-01  5.144E-01  5.493E-01
4.223E+04  3.639E-02  2.8E-01  5.151E-01  5.500E-01
4.572E+04  3.643E-02  2.7E-01  5.157E-01  5.505E-01
4.926E+04  3.642E-02  2.6E-01  5.156E-01  5.504E-01
5.258E+04  3.644E-02  2.5E-01  5.159E-01  5.508E-01
5.594E+04  3.647E-02  2.5E-01  5.163E-01  5.511E-01
5.949E+04  3.646E-02  2.4E-01  5.161E-01  5.509E-01
6.306E+04  3.647E-02  2.3E-01  5.163E-01  5.511E-01
6.661E+04  3.648E-02  2.3E-01  5.165E-01  5.513E-01
7.014E+04  3.650E-02  2.2E-01  5.168E-01  5.516E-01
7.372E+04  3.651E-02  2.1E-01  5.169E-01  5.516E-01
7.729E+04  3.652E-02  2.1E-01  5.170E-01  5.517E-01
8.088E+04  3.651E-02  2.0E-01  5.168E-01  5.516E-01
8.448E+04  3.650E-02  2.0E-01  5.167E-01  5.515E-01
8.809E+04  3.648E-02  2.0E-01  5.165E-01  5.512E-01
9.166E+04  3.649E-02  1.9E-01  5.166E-01  5.514E-01
9.520E+04  3.651E-02  1.9E-01  5.169E-01  5.516E-01
9.878E+04  3.651E-02  1.9E-01  5.168E-01  5.516E-01
1.024E+05  3.650E-02  1.8E-01  5.168E-01  5.516E-01
1.060E+05  3.650E-02  1.8E-01  5.168E-01  5.515E-01
1.095E+05  3.651E-02  1.8E-01  5.169E-01  5.516E-01
1.131E+05  3.651E-02  1.7E-01  5.169E-01  5.516E-01
1.167E+05  3.652E-02  1.7E-01  5.170E-01  5.516E-01
1.202E+05  3.652E-02  1.7E-01  5.170E-01  5.518E-01
1.238E+05  3.652E-02  1.7E-01  5.170E-01  5.518E-01
1.274E+05  3.652E-02  1.6E-01  5.170E-01  5.519E-01
1.307E+05  3.654E-02  1.6E-01  5.173E-01  5.521E-01
1.341E+05  3.652E-02  1.6E-01  5.171E-01  5.519E-01
1.376E+05  3.652E-02  1.6E-01  5.171E-01  5.520E-01
1.411E+05  3.652E-02  1.6E-01  5.171E-01  5.519E-01

```

Σχήμα 3.1-Τμήμα εκτέλεσιμου αρχείου

Προκύπτει ολικός μαζικός συντελεστής απορρόφησης ίσος με 3.653×10^{-2} cm²/gr. Συγκεντρωτικά λαμβάνοντας πληροφορίες και από άλλες πηγές προκύπτουν τα εξής:

A/A	Πηγή	Ολικός Μαζικός Συντελεστής Απορρόφησης για το Pb (cm ² /gr)
1	Αλληλεπιδράσεις Ακτινοβολιών & Ύλης - Δοσιμετρία -Θωράκιση - Δ.Λεωνίδου	4.02 x 10 ⁻²
2	Εκτελέσιμο αρχείο mutren.exe	3.653 x 10 ⁻²
3	Ιστοσελίδα NIST (National Institute of Standards and Technology)	3.654 x 10 ⁻²

Σχήμα 3.2-Συγκριτικός πίνακας υπολογισμού ολικού μαζικού συντελεστή απορρόφησης

Πραγματοποιούμε την ίδια διαδικασία ακολουθώντας τη διαδρομή:

penelope/ other / tables

Θα συνδέσουμε το αρχείο tables.f με το αντίστοιχο εκτελέσιμο αρχείο πληκτρολογώντας:

> gfortran -Os – tables.f -o tables.exe

Με την εκτέλεση του αρχείου tables.exe μπορούμε να υπολογίσουμε τόσο τους ολικούς συντελεστές εξασθένησης (γραμμικός, μαζικός), όσο και τους αντιστοίχους μερικούς συντελεστές για κάθε είδος αλληλεπίδρασης για δεδομένο υλικό. Κατόπιν εκτελούμε το αρχείο έχοντας στον ίδιο φάκελο και το αντίστοιχο αρχείο υλικού. Επιλέγουμε το εύρος σωματιδίου, πληκτρολογούμε 1 και εισάγουμε ως είδος ακτινοβολίας τα φωτόνια πληκτρολογώντας το 2. Επιπλέον θεωρούμε ενέργεια ακτινοβολίας 1 MeV. Πατώντας enter διαβάζουμε:

Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης : 8.0172 x 10⁻¹ cm⁻¹

και

Ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης : 7.0636 x 10⁻² cm²/gr

Στη συνέχεια πατάμε exit και εκτελούμε εκ νέου το πρόγραμμα επιλέγοντας τις ελεύθερες διαδρομές πληκτρολογώντας στη λίστα που παρουσιάζεται το νούμερο 2.

Κατόπιν εισάγουμε το είδος της ακτινοβολίας, την ενέργεια της ακτινοβολίας, το είδος της αλληλεπίδρασης. (1-ελαστική σκέδαση, 2-σκέδαση Compton, 3-φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, 4- δίδυμη γένεση) και διαβάζουμε τους αντίστοιχους συντελεστές. Προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

A/A	Είδος Αλληλεπίδρασης	Μερικός Γραμμικός Συντελεστής Εξασθένησης για το Pb (cm^{-1})	Μερικός Μαζικός Συντελεστής Εξασθένησης για το Pb (cm^2/gr)
1	Ελαστική Σκέδαση	3.0179×10^{-2}	2.6589×10^{-3}
2	Σκέδαση Compton	5.6606×10^{-2}	4.9873×10^{-2}
3	Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο	2.0548×10^{-2}	1.8104×10^{-2}
4	Δίδυμη γένεση	0	0

Σχήμα 3.3-Πίνακας υπολογισμού συντελεστών απορρόφησης για κάθε είδος αλληλεπίδρασης

Αθροίζοντας τους παραπάνω συντελεστές προκύπτει:

$$\text{Ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης : } 8.0172 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$$

και

$$\text{Ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης : } 7.0636 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{gr}$$

Προκύπτει πως το άθροισμα των συντελεστών ταυτίζεται με τους ολικούς συντελεστές που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Τμήμα της διαδικασίας παρουσιάζεται στα ακόλουθα σχήματα:

```

Enter the name of the material data file...
Pb.mat
Material data file:      Pb.mat
Processing material data. Please, wait...
The output file 'tables.dat' has been generated.
To continue, select one option:
  1: Calculate particle ranges,
  2: Calculate mean free paths,
  3: Exit the program.
1
Enter KPAR, E ...
2
1000000
Photon.      E = 1.00000E+06 eU
mean free path = 1.2473E+00 cm
              = 1.4157E+01 g/cm**2
      att. coeff. = 8.0172E-01 1/cm
mass att. coeff. = 7.0636E-02 cm**2/g
Enter KPAR, E ...
exit
At line 155 of file tables.f (unit = 5, file = 'stdin')
Fortran runtime error: Bad integer for item 1 in list input
C:\Users\Kakalos13\Monte Carlo\LEA>tables.exe
Enter the name of the material data file...
Pb.mat
Material data file:      Pb.mat
Processing material data. Please, wait...
The output file 'tables.dat' has been generated.
To continue, select one option:
  1: Calculate particle ranges,
  2: Calculate mean free paths,
  3: Exit the program.
2
Enter KPAR, E, ICOL ...
2
1000000
1
Photon.      E = 1.00000E+06 eU.      Rayleigh scattering
mean free path = 3.3136E+01 cm
              = 3.7609E+02 g/cm**2
      inverse mfp = 3.0179E-02 1/cm
              = 2.6589E-03 cm**2/g
      cross section = 9.1484E-25 cm**2
Enter KPAR, E, ICOL ...
2
1000000
2
Photon.      E = 1.00000E+06 eU.      Compton scattering
mean free path = 1.7666E+00 cm
              = 2.0051E+01 g/cm**2
      inverse mfp = 5.6606E-01 1/cm
              = 4.9873E-02 cm**2/g
      cross section = 1.7159E-23 cm**2

```

Σχήμα 3.4- Διαδικασία υπολογισμού συντελεστών απορρόφησης για κάθε είδος αλληλεπίδρασης

```

Enter KPAR, E, ICOL ...
2
1000000
3
Photon.      E = 1.00000E+06 eU.      photoelectric absorption
mean free path = 4.8666E+00 cm
              = 5.5236E+01 g/cm**2
      inverse mfp = 2.0548E-01 1/cm
              = 1.8104E-02 cm**2/g
      cross section = 6.2290E-24 cm**2
Enter KPAR, E, ICOL ...
2
1000000
4
Photon.      E = 1.00000E+06 eU.      pair production
mean free path = 1.0000E+35 cm
              = 1.1350E+36 g/cm**2
      inverse mfp = 1.0000E-35 1/cm
              = 8.8106E-37 cm**2/g
      cross section = 3.0314E-58 cm**2
Enter KPAR, E, ICOL ...
exit
At line 199 of file tables.f (unit = 5, file = 'stdin')
Fortran runtime error: Bad integer for item 1 in list input

```

Σχήμα 3.5- Διαδικασία υπολογισμού συντελεστών απορρόφησης για κάθε είδος αλληλεπίδρασης

4 Παράρτημα Δ-Συνοπτική παρουσίαση προγραμμάτων προβολής των αρχείων γεωμετρίας GVIEW 2d και GVIEW 3d

Στο παράρτημα Δ περιγράφεται συνοπτικά το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε κατά την επεξεργασία των αρχείων δεδομένων και εξόδου του προγράμματος Penelope, δηλαδή το πρόγραμμα οπτικής παρουσίασης των αρχείων γεωμετρίας (*.geo) GVIEW.

Το λογισμικό αυτό χρησιμεύει τόσο για την απεικόνιση της γεωμετρίας που κατασκευάζεται για την επίλυση των προβλημάτων στο αρχείο γεωμετρίας (*.geo), όσο και για τον έλεγχο μιας υπό κατασκευή γεωμετρίας στα διάφορα στάδιά της με στόχο να αποφευχθούν τυχόν λάθη ή παραλείψεις. Ειδικότερα όταν κατασκευάζονται σύνθετες και πολύπλοκες γεωμετρίες με τον τακτικό έλεγχο της γεωμετρίας δια μέσου του λογισμικού αποφεύγεται η συσσώρευση λαθών στο αρχείο γεωμετρίας και είναι ευκολότερη η επίλυσή τους.

Στο πακέτο διανομής του προγράμματος Penelope περιλαμβάνεται το λογισμικό GVIEW, το οποίο αποτελείται από ένα ζεύγος υπολογιστικών προγραμμάτων. Τα προγράμματα ονομάζονται GVIEW2d και GVIEW3d, με τα οποία δημιουργούνται δισδιάστατες και τρισδιάστατες πολυχρωματικές (24-bit color) εικόνες. Επιπροσθέτως, μαζί με τον κώδικα παρέχονται εκτελέσιμα αρχεία (*.exe) των δύο προγραμμάτων, τα οποία είναι συμβατά με λογισμικό Windows, χωρίς να απαιτείται η εγκατάσταση του προγράμματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί πως αν και το πρόγραμμα GVIEW είναι εύχρηστο για την απεικόνιση των αρχείων γεωμετρίας και την πραγματοποίηση των απαιτούμενων ελέγχων, εν τούτοις δεν παρέχει ευελιξία στην ικανοποιητική παρουσίαση των εικόνων που παράγει. Προς αυτή την κατεύθυνση τονίζεται πως η παρουσίαση των πειραματικών διατάξεων στο 5^ο κεφάλαιο έγινε με διαφορετικό σχεδιαστικό πακέτο.

4.1 Το πρόγραμμα GVIEW 2d

Το πρόγραμμα GVIEW2d απεικονίζει την προς μελέτη γεωμετρία σε δύο διαστάσεις. Κατά την εκτέλεση του προγράμματος, ζητείται το όνομα του αρχείου γεωμετρίας και ο φάκελος (directory) στον οποίο βρίσκεται (path + name). Όταν γράφεται το όνομα του αρχείου γεωμετρίας πρέπει να υπάρχει η κατάληξη .geo. Εν συνεχεία, ζητείται ο καθορισμός των συντεταγμένων του κέντρου του παραθύρου με την πληκτρολόγηση τριών αριθμών, οι οποίοι αντιστοιχούν στις συντεταγμένες του

κατά τους τρεις άξονες σε εκατοστά. Τέλος, ο χρήστης επιλέγει αν η γεωμετρία θα απεικονιστεί κατά υλικά (materials) ή κατά σώματα (bodies), πληκτρολογώντας τον αριθμό '1' ή '2' αντίστοιχα. Στη συνέχεια απεικονίζονται οι δυνατές εντολές που μπορεί να πληκτρολογήσει ο χρήστης:

x	αλλαγή προσανατολισμού εικόνας, κατά άξονα x
y	αλλαγή προσανατολισμού εικόνας, κατά άξονα y
z	αλλαγή προσανατολισμού εικόνας, κατά άξονα z
r ή →	μετατόπιση δεξιά
i ή ←	μετατόπιση αριστερά
u ή ↑	μετατόπιση πάνω
d ή ↓	μετατόπιση κάτω
f ή rgup	μετατόπιση μπροστά
b ή rgdn	μετατόπιση πίσω
i ή +	εστίαση (zoom in)
o ή -	απομάκρυνση (zoom out)
1	αρχικό μέγεθος
h ή ?	βοήθεια
enter	επανάληψη προηγούμενης εντολής
q	έξοδος

Σχήμα 4.1-Πίνακας εντολών GVIEW 2d

4.2 Το πρόγραμμα GV1EW 3d

Το πρόγραμμα GVIEW3d πραγματοποιεί τρισδιάστατη απεικόνιση του αρχείου γεωμετρίας. Κατά την έναρξη του προγράμματος, ζητείται από το χρήστη το όνομα του αρχείου γεωμετρίας και ο φάκελος (directory) στον οποίο βρίσκεται (path + name). Όπως και με το πρόγραμμα GVIEW2d, έτσι και εδώ είναι βολικό το αρχείο γεωμετρίας και το εκτελέσιμο αρχείο να τοποθετούνται στον ίδιο φάκελο. Επίσης, το αρχείο γεωμετρίας πρέπει να γράφεται με την κατάληξη .geo. Ακολούθως,

καθορίζεται η απόσταση, από την οποία γίνεται η απεικόνιση πληκτρολογώντας μία αριθμητική τιμή σε εκατοστά (cm). Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να απεικονίσει τη γεωμετρία σε τομή δίνοντας δύο (2) αριθμητικές τιμές σε μοίρες χωρισμένες μεταξύ τους με κόμμα (,), δηλαδή της μορφής PHI1, PHI2. Επισημαίνεται, πως η παράμετρος PHI1 δεν μπορεί να λάβει τιμή μικρότερη από -90° και η τιμή της παραμέτρου PHI2 δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την τιμή της $PHI1+180^\circ$.

Μετά την τελευταία επιλογή, παρουσιάζεται η εικόνα της γεωμετρίας στην οθόνη. Η αρχική εικόνα είναι χαμηλής ευκρίνειας, αλλά με πληκτρολόγηση των αριθμητικών πλήκτρων 1-9 η ευκρίνεια βελτιώνεται (1υψηλότερη ευκρίνεια , 9 χαμηλότερη/αρχική ευκρίνεια). Στη συνέχεια απεικονίζονται οι δυνατές εντολές που μπορεί να πληκτρολογήσει ο χρήστης:

r ή →	μετατόπιση δεξιά
i ή ←	μετατόπιση αριστερά
u ή ↑	μετατόπιση πάνω
d ή ↓	μετατόπιση κάτω
l ή +	εστίαση (zoom in)
o ή -	απομάκρυνση (zoom out)
r	
enter	επανάληψη προηγούμενης εντολής
q	έξοδος

Σχήμα 4.2-Πίνακας εντολών GVIEW 3d

Η περιστροφή της απεικόνισης επιτυγχάνεται με την πληκτρολόγηση τριών αριθμητικών τιμών που χωρίζονται με κόμμα (,). Είναι της μορφής OMEGA, THETA, PHI και οι τιμές μετρώνται σε μοίρες (deg). Η συγκεκριμένη δυνατότητα του προγράμματος GVIEWS3d βοηθά το χρήστη να καταλάβει την επίδραση των γωνιών στο σχήμα, έτσι ώστε να μπορεί να ορίσει σωστά τις γωνίες στο αρχείο γεωμετρίας με σκοπό την περιστροφή των σχημάτων.

5 Παράρτημα Ε-Συνοπτική παρουσίαση του προγράμματος δημιουργίας απεικονίσεων gnuplot.exe

Στο παράρτημα Ε περιγράφεται συνοπτικά το πρόγραμμα Gnuplot, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία γραφημάτων. Η δημιουργία απεικονίσεων επιτυγχάνεται με την εισαγωγή εντολών χρησιμοποιώντας ως βάση δεδομένων αρχεία σε μορφή ASCII. Στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι είτε αρχεία που δημιουργούσε κατά την εκτέλεσή του ο κώδικας Penelope είτε αρχεία που προέκυπταν από επεξεργασία των αποτελεσμάτων του κώδικα. Όπως έχει τονιστεί στο βασικό τμήμα της Δ.Ε., η απεικόνιση διαγραμμάτων αφορούσε αρχεία που δημιουργούσε ο κώδικας και αφορούσαν τον ανιχνευτή δόσης. Για αυτό δημιουργήθηκαν αρχεία δύο αξόνων, αλλά και αρχεία που χρησιμοποιήθηκε χρωματική κλίμακα.

Το πρόγραμμα Gnuplot είναι ελεύθερο λογισμικό και διατίθεται στη σελίδα <http://gnuplot.sourceforge.net/>. Επιπλέον μπορεί να εκτελεστεί είτε σε παράθυρο εντολών με την εντολή `gnuplot *gnu`, διαβάζοντας τα δεδομένα από το αντίστοιχο αρχείο τύπου `.gnu`, είτε ανοίγοντας το εκτελέσιμο αρχείο (`wgnuplot.exe`), το οποίο παρέχεται μαζί με το πρόγραμμα.

Στο πρόγραμμα GNUPLOT οι εντολές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- εντολή `set`, όπου ο χρήστης ορίζει τις παραμέτρους σχεδίασης (τίτλους, υποδιαιρέσεις αξόνων, κλίμακες, μέγεθος γραμματοσειρών κτλ). Αν ο χρήστης επιθυμεί ακυρώνει την `set` με την εντολή `unset`
- εντολή `show`, όπου ο χρήστης ζητάει από το πρόγραμμα να εμφανιστούν στο παράθυρο του προγράμματος οι προεπιλογές που έχουν γίνει με τις εντολές τύπου `set`
- εντολή `splot`, όπου ο χρήστης ζητάει την απεικόνιση της γραφικής παράστασης

Ακολουθούν συνοπτικά οι βασικές εντολές του προγράμματος. Αναλυτικότερα στοιχεία μπορούν να βρεθούν στο εγχειρίδιο του προγράμματος:

- `set mouse`: με την εντολή αυτή καθορίζεται η λειτουργία ή όχι του ποντικιού

του H/Y. Μπορεί να την ακολουθούν επιπλέον λέξεις, οι οποίες καθορίζουν με λεπτομέρεια της κινήσης του ποντικιού.

- `set zero <αριθμός>`: καθορίζεται η τιμή κάτω από την οποία οι τιμές θεωρούνται μηδενικές.
- `set style line <αριθμός> lt <αριθμός> lc <χρώμα> lw <αριθμός> pt <αριθμός> ps <αριθμός> pi <αριθμός>` : η εντολή αυτή καθορίζει τα χαρακτηριστικά των γραμμών και των σημείων. Υπάρχει μία πληθώρα διαμορφωμένων γραμμών στη βάση δεδομένων του προγράμματος, τις οποίες ο χρήστης μπορεί να δει πατώντας την εντολή `test`. Ο αριθμός που ακολουθεί την εντολή αποτελεί τον κωδικό της γραμμής. Η επιλογή 'lt' αναφέρεται στο είδος της γραμμής (π.χ. συνεχής, διακεκομμένη κτλ.), ενώ με την 'lc' καθορίζεται το χρώμα της και με την 'lw' το πάχος της γραμμής. Οι επόμενες επιλογές 'pt' και 'ps' καθορίζουν τον τύπο και το μέγεθος των σημείων αντίστοιχα. Τέλος, με την εντολή 'pi' καθορίζεται το βήμα σχεδίασης, δηλαδή αριθμός των δεδομένων με τα οποία θα σχεδιαστεί ένα σημείο. Τονίζεται, πως αν δεν αναγραφεί μία επιλογή η τιμή καθορίζεται αυτόματα στη default τιμή.
- `set view <αριθμός>, <αριθμός>, <αριθμός>, <αριθμός>`: με την εντολή αυτή καθορίζεται η οπτική γωνία παρουσίασης μίας γραφικής παράστασης. Ο πρώτος αριθμός καθορίζει την περιστροφή γύρω από τον X άξονα, με εύρος 0-180° και ο δεύτερος την περιστροφή γύρω από τον Z άξονα, με εύρος 0-360°. Ο τρίτος αριθμός καθορίζει την κλίμακα ολόκληρου του γραφήματος και ο τέταρτος αυτή του Z άξονα μόνο. Οι default τιμές είναι 60, 30, 1, 1.
- `set (x, y ή z) label "επιθυμητή ονομασία" offset <αριθμός>, <αριθμός> font <αριθμός>, <αριθμός> tc <χρώμα>`: Αρχικά καθορίζεται η ονομασία του αντιστοιχού άξονα. Στη συνέχεια με την εντολή `offset` καθορίζεται η θέση του κειμένου στην οθόνη και εν συνεχεία με τη `font` καθορίζεται το είδος (πρώτος αριθμός) και το μέγεθος (δεύτερος αριθμός) της γραμματοσειράς. Τέλος με την εντολή `tc` καθορίζεται το χρώμα του κειμένου
- `set (no)logscale "x, y ή z" <αριθμός>`: με την εντολή αυτή καθορίζεται η κλίμακα του αντίστοιχου άξονα σε λογαριθμική ή όχι και από τον αριθμό ορίζεται η βάση του λογαρίθμου. Αν δεν δοθεί αριθμός θεωρείται δεκαδικός

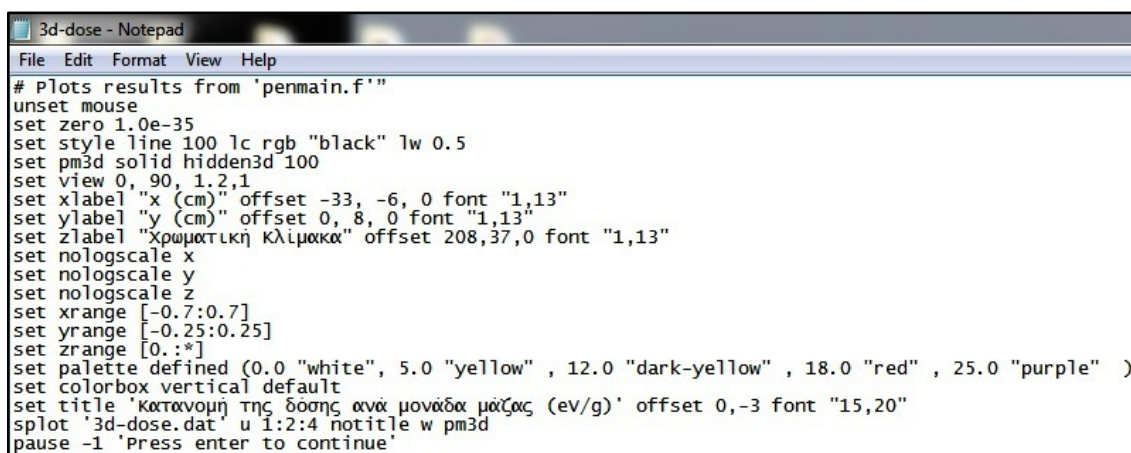
(10) λογάριθμός.

- `set (x,y ή z)range` [αριθμός, αριθμός] {no}reverse {no}writeback: οι δύο αριθμοί αποτελούν το σύνολο τιμών του αντίστοιχου άξονα (εύρος). Αν δοθεί ο συμβολισμός `[*, *]` τότε το πρόγραμμα καθορίζει αυτόματα το εύρος βάσει τιμών. Η εντολή `reverse` αντιστρέφει τον άξονα, ενώ με την εντολή `writeback` αποθηκεύεται το εύρος τιμών και με την εντολή `set (x,y ή z)range [] restore` ανακτάται.
- `set palette defined` (αριθμός "χρώμα", . . , αριθμός "χρώμα"): με χρήση αυτής της εντολής επιτυγχάνεται η χρωματική απεικόνιση του Z άξονα σε ένα τρισδιάστατο σχήμα. Με την εισαγωγή του αριθμού καθορίζεται η αριθμητική τιμή, πάνω από την οποία τα αντίστοιχα σημεία έχουν το χρώμα, το όνομα του οποίου εισάγεται μετά από αυτή. Αν καθοριστεί σε ένα εύρος τιμών ένα χρώμα, τότε το χρώμα από έντονο εξασθενεί μέσα στα πλαίσια του εύρους. Με την εντολή `show palette colornames` ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει τα χρώματα που υπάρχουν στη βάση δεδομένων του προγράμματος μαζί με τα αντίστοιχα ονόματά τους.
- `set colorbox vertical/horizontal default/user`: η εντολή αυτή αναφέρεται στην εισαγωγή του ορθογώνιου που περιέχει την χρωματική κλίμακα. Με την εισαγωγή της λέξης `vertical` ή `horizontal` το ορθογώνιο σχεδιάζεται κάθετα ή οριζόντια αντίστοιχα. Η επιλογή `default` ή `user` καθορίζει το μέγεθος και τη θέση του ορθογωνίου. Αν επιλεγθεί η πρώτη τότε το μέγεθος και η θέση είναι οι προεπιλεγμένες από το πρόγραμμα. Στην περίπτωση της δεύτερης επιλογής η εντολή ακολουθείται από τις εντολές `origin <αριθμός>`, `<αριθμός>`, οι οποίες καθορίζουν τη θέση του ορθογωνίου, και `size <αριθμός>`, `<αριθμός>`, με την οποία ορίζεται το μέγεθος του. Αν οι εντολές αυτές δίνονται χωριστά αναφέρονται σε όλο το γράφημα. Με την εντολή `front/back` καθορίζεται αν το ορθογώνιο θα σχεδιαστεί μπροστά ή πίσω από το γράφημα αντιστοίχως και με την εντολή `border <αριθμός>` καθορίζεται από τον αριθμό το είδος της γραμμής που αποτελεί το περίγραμμα του ορθογωνίου (ο αριθμός αντιστοιχεί σε κάποιο `style line` όπως αυτό αναλύεται παραπάνω).
- `set (x,y,z ή cb)tics <αριθμός>`: με αυτή την εντολή καθορίζεται η κλίμακα του αντίστοιχου άξονα (x,y,z) ή του χρωματικού άξονα (cb). Μπορεί να

ακολουθείται από μια πληθώρα άλλων εντολών, όπως για παράδειγμα από την εντολή font.

- `set title` 'επιθυμητή ονομασία': καθορίζεται η ονομασία του γραφήματος. Η εντολή μπορεί να ακολουθείται από άλλες εντολές με σκοπό την αλλαγή μεγέθους και είδους γραμματοσειράς, θέσης κτλ.
- `splot` 'όνομα αρχείου δεδομένων' u <αρ. στήλης> : <αρ. στήλης> : <αρ. στήλης> w <ιδιότητα>: με την `splot` δίνεται η εντολή στο πρόγραμμα να απεικονίσει τα επιθυμητά δεδομένα, τα οποία καθορίζονται από τον αριθμό της στήλης μέσω της εντολής u. Με την εντολή w προσδίδονται διάφορες ιδιότητες όπως η απεικόνιση των σφαλμάτων (w errorbars) ή η μετατροπή ενός γραφήματος σε ιστόγραμμα (w histogram) ή η δημιουργία τρισδιάστατου γραφήματος (w pm3d). Τονίζεται πως η εντολή `splot` μπορεί να συνοδευθεί από πλήθος άλλων εντολών.. Αναλυτικές πληροφορίες μπορεί κανείς να βρει στο εγχειρίδιο του προγράμματος.
- `pause -1` 'επιθυμητό κείμενο': η εντολή αυτή εμφανίζει στην οθόνη το επιθυμητό κείμενο και δεν εκτελείται καμία άλλη εντολή αν ο χρήστης δεν πατήσει το πλήκτρο ENTER ή επιλέξει με τον κέρσορα την επιλογή 'OK'.

Τέλος παρουσιάζονται οι δύο τύποι αρχείων μορφής gnu που χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Η πρώτη αφορά τη δημιουργία γραφημάτων με χρωματική κλίμακα και η δεύτερη τη δημιουργία γραφημάτων δύο αξόνων απεικονίζοντας και τη στατιστική αβεβαιότητα. Είναι βασικό να τονιστεί πως για την απεικόνιση των γραφημάτων χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο αρχείο gnu πληκτρολογούμε την εντολή load.



```
3d-dose - Notepad
File Edit Format View Help
# Plots results from 'penmain.f'
unset mouse
set zero 1.0e-35
set style line 100 lc rgb "black" lw 0.5
set pm3d solid hidden3d 100
set view 0, 90, 1, 2, 1
set xlabel "x (cm)" offset -33, -6, 0 font "1,13"
set ylabel "y (cm)" offset 0, 8, 0 font "1,13"
set zlabel "Χρωματική κλίμακα" offset 208,37,0 font "1,13"
set nologscale x
set nologscale y
set nologscale z
set xrange [-0.7:0.7]
set yrange [-0.25:0.25]
set zrange [0:*]
set palette defined (0.0 "white", 5.0 "yellow", 12.0 "dark-yellow", 18.0 "red", 25.0 "purple" )
set colorbox vertical default
set title 'Κατανομή της δόσης ανά μονάδα μάζας (ev/g)' offset 0,-3 font "15,20"
splot '3d-dose.dat' u 1:2:4 notitle w pm3d
pause -1 'Press enter to continue'
```

Σχήμα 5.1-Μορφή αρχείου .gnu για δημιουργία γραφημάτων με χρωματική κλίμακα


```

3d-dose1 - Notepad
File Edit Format View Help
# Plots results from 'penmain.f'|
set title 'Κατανομή της δόσης ανά μονάδα μάζας (ev/g)' offset 0,1 font "15,20"
set nologscale y
set xrange [*:*]
set yrange [*:*]
set ylabel 'E (ev/g)' offset 0,1 font "15,20"
set xlabel 'y (cm)' offset 0,1 font "15,20"
plot '3d-dose.txt' u 1:2:3 w errorbars, '3d-dose.txt' u 1:2 notitle w histeps

```

Σχήμα 5.1-Μορφή αρχείου .gnu για δημιουργία γραφημάτων με στατιστική αβεβαιότητα

6 Παράρτημα ΣΤ-Παρουσίαση της δομής του αρχείου δεδομένων του κώδικα Penmain και αναλυτική επεξήγηση των διάφορων παραμέτρων του αρχείου εισόδου

Στο σχήμα 6.1 και παρουσιάζεται η δομή του αρχείου δεδομένων του κώδικα Penmain ενώ στο σχήμα 6.2 αναλύονται οι διάφορες παράμετροι του αρχείου εισόδου.

```

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7
TITLE Title of the job, up to 65 characters.
  (the dot prevents editors from removing trailing blanks)
>>>>>> Source definition.
SKPAR KPARP [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SENERG SEO [Initial energy (monoenergetic sources only)]
SPECTR E1,P1 [E bin: lower-end and total probability]
SGPOL SP1,SP2,SP3 [Stokes parameters for polarised photons]
SPOSIT SK0,SY0,SZ0 [Coordinates of the source]
SBOX SSX,SSY,SSZ [Source box dimensions]
SBODY KB [Active source body; one line for each body]
SCONE THETA,PHI,ALPHA [Conical beam; angles in deg]
SPYRAM THETA,THETAU,PHIL,PHIU [Rectangular beam; angles in deg]
.
>>>>>> Input phase-space file (psf).
IPSFN psf-filename.ext [Input psf name, up to 20 characters]
IPSPLI NSPLIT [Splitting number]
WGTWIN WGMEN,WGMAX [Weight window, RR & spl of psf particles]
EPMAX EPMAX [Maximum energy of particles in the psf]
.
>>>>>> Material data and simulation parameters.
Up to MAXMAT materials; 2 lines for each material.
MFNAME mat-filename.ext [Material file, up to 20 chars]
MSIMPA EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>> Geometry and local simulation parameters.
GEOMFN geo-filename.ext [Geometry file, up to 20 chars]
DSMAX KB,DSMAX(KB) [KB, maximum step length in body KB]
EABSB KB,EABSB(1:3,KB) [KB, local absorption energies, EABSB(1:3)]
.
>>>>>> Interaction forcing.
IFORCE KB,KPAR,ICOL,FORCER,WLOW,WHIG [KB,KPAR,ICOL,FORCER,WLOW,WHIG]
.
>>>>>> Emerging particles. Energy and angular distributions.
NBE EL,EU,NBE [Energy window and no. of bins]
NBNANGL NBTH,NBPH [Nos. of bins for the angles THETA and PHI]
.
>>>>>> Impact detectors (up to 25 different detectors).
IPSF=0; no psf is created.
IPSF=1; the psf is created.
IDCUT=0; tracking is discontinued at the detector entrance.
IDCUT=1; the detector does not affect the tracking.
IDCUT=2; the detector does not affect tracking, the energy
distribution of particle fluence (averaged over the
volume of the detector) is calculated.
IMPDET EL,EU,NBE,IPSF,IDCUT [E-window, no. of bins, IPSF, IDCUT]
IDSPC spc-impdet-##.dat [Spectrum file name, 20 chars]
IDPSF fln-impdet-##.dat [Phase-space file name, 20 chars]
IDFLNC fln-impdet-##.dat [Fluence spectrum file name, 20 chars]
IDBODY KB [Active body; one line for each body]
IDKPAR KPAR [Kind of detected particles, one line each]
.
>>>>>> Energy-deposition detectors (up to 25).
ENDETC EL,EU,NBE [Energy window and number of bins]
EDSPC spc-eneddet-##.dat [Output spectrum file name, 20 chars]
EDBODY KB [Active body; one line for each body]
.
>>>>>> Dose distribution.
GRIDY YL,YU [Y coordinates of the dose box vertices]
GRIDZ ZL,ZU [Z coordinates of the dose box vertices]
GRIDBN NDBX,NDBY,NDBZ [Numbers of bins]
.
>>>>>> Job properties.
RESUME dump1.dump [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO dump2.dump [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP DUMPP [Dumping period, in sec]
.
RSEED ISEED1,ISEED2 [Seeds of the random-number generator]
NSIMSH DSHN [Desired number of simulated showers]
TIME TIMEA [Allotted simulation time, in sec]
END [Ends the reading of input data]
.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7

```

Σχήμα 6.1-Δομή αρχείου εισόδου δεδομένων

TITLE	Ορίζεται ο τίτλος της εκάστοτε εργασίας (μπορεί να περιέχει αριθμούς και γράμματα, έως 120 χαρακτήρες).
SKPAR	Ορίζεται το είδος της πρωτεύουσας ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την πηγή.
SENERG	Ορίζεται η ενέργεια των σωματιδίων ή φωτονίων για μονοενεργειακή πηγή.
SPECTR	Για πηγή με συνεχές ή διακριτό φάσμα, ορίζει το φάσμα ενεργειών μέσω δύο μεταβλητών, των E_i και P_i . Η πρώτη ορίζει την ενέργεια της ακτινοβολίας και συγκεκριμένα το κάτω όριο του ενεργειακού καναλιού και η δεύτερη την πιθανότητα P_i εκπομπής σωματιδίου με ενέργεια στο κανάλι $[E_i, E_{i+1}]$. Μπορούν να εισαχθούν έως και 200 γραμμές SPECTR. Το ανώτερο όριο του φάσματος έχει ενέργεια ίση με τη μεγαλύτερη ενέργεια του φάσματος και πιθανότητα με αρνητική τιμή.
SGPOL	Ενεργοποιείται η προσομοίωση των επιδράσεων πόλωσης στη σκέδαση των φωτονίων (τα ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια υποτίθεται ότι είναι μη πολωμένα). SP1, SP2, SP3 είναι οι παράμετροι Stokes των πρωτογενών φωτονίων, τα οποία καθορίζουν τη γωνία της γραμμικής πόλωσης των φωτονίων με αξιμούθιο ίσο με 45 μοίρες, τη γωνία της κυκλικής πόλωσης των φωτονίων και τη γωνία της γραμμικής πόλωσης των φωτονίων με αξιμούθιο ίσο με 0 μοίρες. Υποτίθεται ότι τα δευτερεύοντα φωτόνια εκπέμπονται με μηδενική πόλωση.
SPOSIT	Ορίζονται οι συντεταγμένες της σημειακής πηγής σε καρτεσιανό σύστημα.
SBOX	Ορίζονται οι διατάσεις της πηγής στα όρια της οποίας η πηγή παρουσιάζει ομοιόμορφα χαρακτηριστικά.
SBODY	Ορίζεται ενεργό σώμα πηγής.
SCONE	Ορίζεται κωνική δέσμη ακτινοβολίας. Η πολική και αξιμουθιακή γωνία THETA και PHI καθώς και η γωνία της δέσμης ALPHA

SPYRAM	Ορίζεται πυραμιδική δέσμη ακτινοβολίας.
IPSFN	Ορίζεται το όνομα ενός αρχείου φάσης που σχετίζεται με τα πρωτογενή σωματίδια (έως 20 χαρακτήρες). Οι αρχικές μεταβλητές κατάστασης των πρωτογενών σωματιδίων μπορούν να διαβαστούν άμεσα από ένα σύνολο αρχείων που περιέχουν υπολογισμούς. Όταν αυτή η επιλογή είναι ενεργή, οι προηγούμενοι ορισμοί για τη πηγή αγνοούνται. Επιπλέον, τα φωτόνια υποτίθεται ότι δεν είναι πολωμένα.
IPSPLI	Ορίζεται το πλήθος διαμερίσεων. Κάθε σωματίδιο στο psf αρχείο χωρίζεται σε NSPLIT ισοδύναμα σωματίδια με βάρος WGHT/NSPLIT.
WGWIN	Ορίζεται το όριο του συντελεστή βαρύτητας (WGMIN, WGMAX).
EPMAX	Ορίζεται η μέγιστη ενέργεια της ακτινοβολίας στο psf αρχείο. Η ενέργεια αυτή αποτελεί το άνω όριο στο ενεργειακό διάστημα των πινάκων της προσομοίωσης. Για να περιορισθούν τα σφάλματα λόγω γραμμικής παρεμβολής, η μεταβλητή EPMAX δεν πρέπει να παίρνει τιμές κατά πολύ μεγαλύτερες από τη μέγιστη ενέργεια που όντως εμφανίζεται στην προσομοίωση. Αν ο κώδικας βρει ένα σωματίδιο ή φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη της EPMAX τότε σταματάει η προσομοίωση.
Καθορισμός Χαρακτηριστικών Υλικών	
MFNAME	Ορίζεται το όνομα του υλικού αρχείο δεδομένων εισόδου (έως 20 χαρακτήρες). Αυτό αρχείο πρέπει να δημιουργηθεί εκ των προτέρων εκτελώντας το υλικό του προγράμματος.
MSIMPA	Ορίζονται μία σειρά από παραμέτρους προσομοίωσης στο M υλικό. Οι παράμετροι EABS(1:3, M) ορίζουν τις ενέργειες απορρόφησης για τα 3 είδη ακτινοβολίας (ηλεκτρόνια, φωτόνια και ποζιτρόνια), οι παράμετροι C1(M), C2(M) αφορούν στις ελαστικές σκεδάσεις και οι παράμετροι WCC(M) και WCR(M) είναι οι ενέργειες αποκοπής (cut-off energies) για τις μη

	<p>ελαστικές σκεδάσεις και την ακτινοβολία πέδησης αντίστοιχα. Στο εγχειρίδιο του κώδικα Penelope συνιστάται να χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τιμές:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $EABS(1,M)=EABS(3,M)=0.01*EPMAX$ • $EABS(2,M)=0.001*EPMAX$ • $C1(M)=C2(M)=0.1$ • $WCC=EABS(1,M)$ • $WCR=EABS(2,M)$
<i>Καθορισμός Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών</i>	
GEOMFN	Ορίζεται το όνομα του αρχείου γεωμετρίας του προγράμματος Pengeom.
DSMAX	Ζητείται το μέγιστο μήκος βήμα DS MAX (KB) (σε cm) των ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων στο σώμα KB. Αυτή η παράμετρος είναι σημαντική μόνο για πολύ λεπτά σώματα.
EABSB	Ορίζονται οι τοπικές ενέργειες απορρόφησης ABS (PAR, KB) των σωματιδίων του τύπου KPAR σε σώμα KB.
IFORCE	Ενεργοποιείται η αλληλεπίδραση τύπου ICOL από σωματίδια ή φωτόνια KPAR μέσα σε κυλινδρικό σώμα . Ο παράγοντας εξαναγκασμού FORCER πρέπει να είναι μεγαλύτερος της μονάδας όταν εφαρμόζεται η εξαναγκασμένη αλληλεπίδραση.
NBE	Ορίζεται το κάτω και το άνω όριο EMIN και EMAX αντίστοιχα, της ενέργειας των εξερχόμενων φωτονίων ή σωματιδίων που θα καταγράφονται. Η παράμετρος NBE καθορίζει τον αριθμό των καναλιών στα οποία διαιρείται η περιοχή EMIN έως EMAX.
NBANGL	Ορίζεται ο αριθμός των καναλιών για την πολική και την αζιμουθιακή γωνία.

Ορισμός Ανιχνευτών Αλληλεπίδρασης

IMPDET	Ορίζεται ανιχνευτής αλληλεπίδρασης. Υπάρχει δυνατότητα ορισμού έως και 25 τέτοιων ανιχνευτών. Συγκεκριμένα οι παράμετροι EL και EU καθορίζουν το κάτω και το άνω όριο του παράθυρου της ενέργειας που ανιχνεύεται, η παράμετρος NBE καθορίζει τον αριθμό των καναλιών που διαμερίζεται η ενεργειακή περιοχή του ανιχνευτή, ο αριθμός των οποίων μπορεί να είναι έως και 1000 και η παράμετρος IPSF καθαρίζει τη δημιουργία ή όχι αρχείου psf. Η παράμετρος IPSF μπορεί να πάρει τις τιμές 0, όπου το αρχείο δεν δημιουργείται, 1 όπου το αρχείο δημιουργείται. Η παράμετρος IDCUT σχετίζεται με τη διακοπή της παρακολούθησης των σωματιδίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή.
IDPSF	Ορίζεται το όνομα του psf αρχείου(το όνομα δεν πρέπει να ξεπερνά τους 20 χαρακτήρες) τα σωματίδια ή φωτόνια που μπαίνουν στον ανιχνευτή συνεχίζουν κανονικά τη διάδοσή τους και τέλος την τιμή -1, όπου το αρχείο psf δημιουργείται αλλά η προσομοίωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας σταματάει όταν αυτή διέλθει στο σώμα του ανιχνευτή.
IDSPC	Ορίζεται το όνομα του αρχείου εξόδου, που περιέχει το ενεργειακό φάσμα του ανιχνευτή.
IDFLNC	Ορίζεται το όνομα του αρχείου εξόδου, που περιέχει την ενεργειακή κατανομή της ροής των σωματιδίων.
IDBODY	Ορίζεται το σώμα του ανιχνευτή.
IDKPAR	Ορίζεται το είδος των σωματιδίων που θα ανιχνεύονται.
Ορισμός Ανιχνευτών Αποτιθέμενης Ενέργειας	
ENDETC	Ορίζεται ο εικονικός ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας . Μπορούν να ορισθούν έως και 25 διαφορετικοί ανιχνευτές. Οι παράμετροι EL και EU καθορίζουν το κάτω και το άνω όριο

	αντίστοιχα του ενεργειακού εύρους του ανιχνευτή. Η παράμετρος NBE καθορίζει τον αριθμό των καναλιών του ανιχνευτή, όπου ο αριθμός τους μπορεί να φτάσει και τα 1000.
EDSPC	Ορίζεται το όνομα του αρχείου εξόδου, στο οποίο καταγράφεται το ενεργειακό φάσμα του ανιχνευτή.
EDBODY	Ορίζεται το σώμα που αντιστοιχεί στον ανιχνευτή.
Ορισμός Ανιχνευτών Δόσης	
GRIDX	Ορίζονται οι διαστάσεις κατά τον άξονα x του ανιχνευτή αποτιθέμενης δόσης.
GRIDY	Ορίζονται οι διαστάσεις κατά τον άξονα y του ανιχνευτή δόσης.
GRIDZ	Ορίζονται οι διαστάσεις κατά τον άξονα z του ανιχνευτή αποτιθέμενης δόσης.
GRIDBN	Καθορίζεται η διαμέριση του πλέγματος του ανιχνευτή αποτιθέμενης δόσης κατά τους άξονες x,y, z.
Καθορισμός Παραμέτρων Προσομοίωσης	
RESUME	Δίνεται εντολή στο πρόγραμμα για να διαβάσει το αρχείο dump, το οποίο δημιουργείται με την παρακάτω εντολή DUMPTO, ούτως ώστε να συνεχιστεί η προσομοίωση από το σημείο στο οποίο είχε σταματήσει ή μείνει.
DUMPTO	Δίνεται εντολή στο πρόγραμμα για τη δημιουργία αρχείου dump κατά το τέλος της προσομοίωσης. Αυτό επιτρέπει τη συνέχισή της, εάν είναι επιθυμητή η βελτίωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.
DUMPP	Καθορίζει τη χρονική περίοδο καταγραφής των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στα αρχεία εξόδου και στο αρχείο dump.
RSEED	Ορίζονται οι τιμές εκκίνησης της γεννήτριας τυχαίων αριθμών

NSIMSH	Καθορίζεται το πλήθος των ιστοριών που θα προσομοιωθούν.
TIME	Καθορίζεται ο συνολικός χρόνος που θα διαρκέσει η προσομοίωση.
END	Δίνεται εντολή για να σταματήσει η εισαγωγή δεδομένων από το αρχείο εισόδου.

Σχήμα 6.2-Αναλυτική επεξήγηση των διάφορων παραμέτρων του αρχείου εισόδου

7 Σεμινάριο Gate

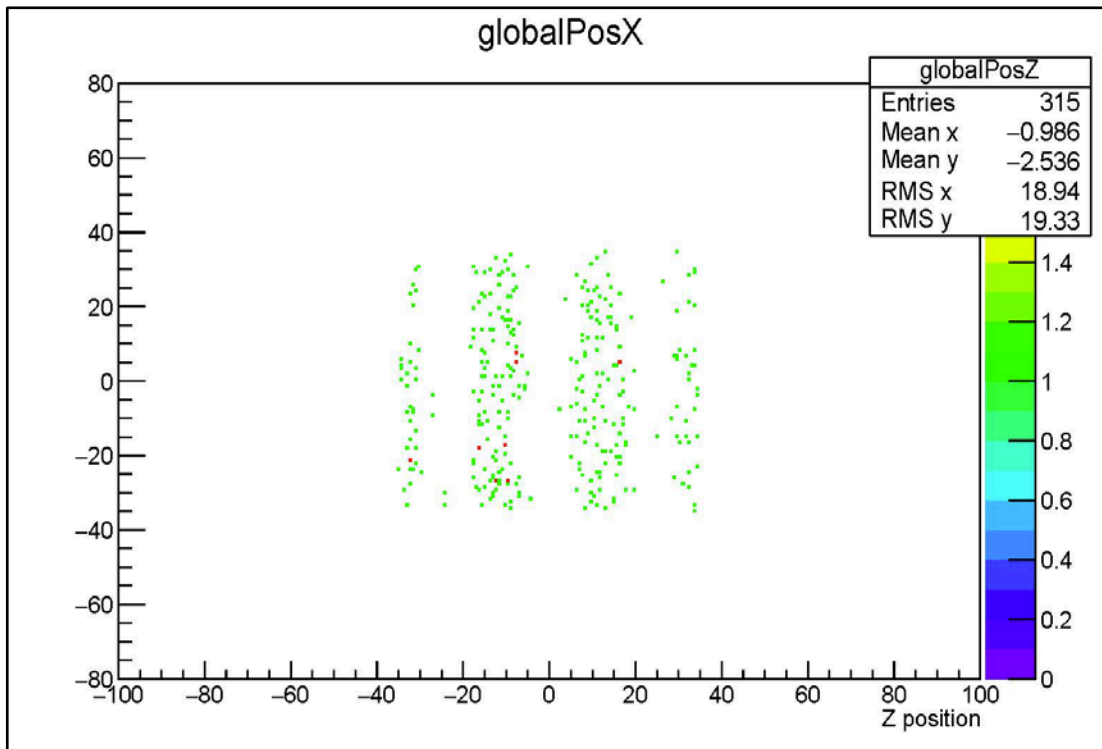
Το χρονικό διάστημα από 19/9/2016 έως 23/9/2016 έλαβα μέρος σε σεμινάριο γνωριμίας και εκμάθησης του λογισμικού Gate (Geant4 Application for Tomographic Emission). Το σεμινάριο Gate έλαβε στο Jülich Campus στην πόλη Jülich της Γερμανίας. Το Jülich Campus αποτελεί παράρτημα του πανεπιστημίου του Άαχεν (FH Aachen University of Applied Sciences).

Το λογισμικό Gate αποτελεί ένα πρόγραμμα προσομοίωσης και απεικόνισης τεχνικών διαγνωστικής ραδιολογίας και ακτινοθεραπείας. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια του σεμιναρίου δεν πραγματοποιήθηκε αναφορά στο κομμάτι της ακτινοθεραπείας. Το Gate αποτελεί ένα σύνθετο λογισμικό με πολλές δυνατότητες προσομοίωσης. Σε αντίθεση με το πρόγραμμα PENELOPE, το οποίο έχει αναπτυχθεί σε Fortran, η ανάπτυξη του κώδικά του Gate έχει πραγματοποιηθεί σε γλώσσα C++. Παράλληλα το Gate έχει και τη δυνατότητα απευθείας απεικόνισης χωρίς τη χρήση προγράμματος απεικόνισης όπως το gnuplot.

Αναμφίβολα πρόκειται για ένα πολυσύνθετο και πολυδιάστατο πρόγραμμα που χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε εφαρμογές διαγνωστικής ραδιογραφίας (PET, SPET, CT) και ακτινοθεραπείας. Ωστόσο, η πολυπλοκότητά του πολλές φορές συνιστά εμπόδιο για την ορθή διεξαγωγή προσομοιώσεων, διότι απαιτούνται πάρα πολλά δεδομένα εισόδου που αυξάνουν τη πιθανότητα κάποιου σφάλματος από το χρήστη. Εκτός αυτού, οι προσομοιώσεις απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης ακόμα για μία απλή διάταξη.

Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά μία προσπάθεια προσομοίωσης που έγινε με το λογισμικό Gate, με σκοπό την επίλυση προβλήματος αντίστοιχου με αυτά που αντιμετωπίστηκαν στα πλαίσια της ΔΕ με το λογισμικό Penelope. Ειδικότερα απεικονίζονται τα αποτελέσματα που

καταγράφονται στον ανιχνευτή δόσης που είχε οριστεί για την περίπτωση μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων.



Σχήμα 7.1-Ανιχνευτής δόσης με μονοενεργειακή πηγή ακτινοβολίας

Βιβλιογραφία

- 1 Αλληλεπιδράσεις Ακτινοβολιών & Ύλης-Δοσιμετρία-Θωράκιση
Δ. Λεωνίδου-Καθηγητής Ε.Μ.Π
Ε.Μ.Π. Αθήνα 1984
- 2 Απεικονίσεις και Θεραπευτικές Ακτινοβολήσεις Βιοϊατρικής
Τεχνολογίας- Βοήθημα στο Μάθημα
Μ.Ι. Αναγνωστάκης
Ε.Μ.Π. Αθήνα Μάρτιος 2006
- 3 Αλληλεπιδράσεις Ακτινοβολιών με την Ύλη-Παρουσιάσεις
Μαθήματος Μ.Ι.Αναγνωστάκης
Ε.Μ.Π. 2014
- 4 The Physics of Medical Imaging
Steve Webb
Medical Science Series
- 5 The Physics of Radiology
Harold Elford Johns- John Robert Cunnigham
4th Edition
- 6 Δ.Ε - Προσομοίωση της Αλληλεπίδρασης Φωτονιακών
Ακτινοβολιών και Ύλης με Χρήση του Κώδικα Penelope-
Εφαρμογή σε Προβλήματα Υπολογισμού, Θωρακίσεων και
Βαθμονόμησης Ανιχνευτικών Διατάξεων
Νικολάου Αθανάσιος.
Αθήνα 2006
- 7 Δ.Ε - Μελέτη της Λειτουργίας Διάταξης ΧRF με Χρήση Κώδικα
Προσομοίωσης Monte Carlo -Δ.Ε
Χαυλής Σπυρίδωνας
Αθήνα 2011

-
- 8** Δ.Ε - Ανάπτυξη της Μεθοδολογίας του Ρυθμού Δόσης εξαιτίας του ^{137}Cs στο Έδαφος με τη Μέθοδο Προσομοίωσης Monte Carlo
Μαρούδη Αικατερίνη Ελικωνίδα
Αθήνα 2009
- 9** Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών-Β Έκδοση
Σ.Ε. Σιμόπουλος
Αθήνα 1989
- 10** Penelope, a code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport (Version 2011)
Francesc Salvat
Jose M. Fernandez-Varea
Josep Sempau
Manual του κώδικα Penelope
- 11** Tutorial for Penelope (version 2011)