



ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΙΑΤΡΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΘΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΕΘΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΡΑΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΕΕΑΕ)
Ε.ΚΕ.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

Προσομοιώσεις και μετρήσεις της ροής νετρονίων στο θάλαμο θεραπείας και κατά μήκος του λαβυρίνθου ιατρικού γραμμικού επιταχυντή 18 MV

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΙΑΤΖΟΒΑΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ

Καλέφ-Εζρά Τζων, Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Σταματελάτος Ίων-Ευάγγελος, Ερευνητής Α', Διευθυντής Ερευνών, Ε.ΚΕ.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΑΘΗΝΑ 2018

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καλέφ-Εζρά Τζων, Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή,
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Σταματελάτος Ίων-Ευάγγελος, Ερευνητής Α', Διευθυντής Ερευνών,
Ε.ΚΕ.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

Καρίνου Ελευθερία, Προϊσταμένη Τμήματος Δοσιμετρίας και Βαθμονομήσεων,
Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Καλέφ-Εζρά Τζων, τον κύριο Σταματελάτο Ίωνα και την κυρία Καρίνου Ελευθερία για την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου έδωσαν κατά τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας και γενικότερα σε όλη την πορεία μου στο ΔΔΠΜΣ 'ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ –ΑΚΤΙΝΟΦΥΣΙΚΗ'. Επίσης τις κυρίες Βασιλοπούλου Θεοδώρα και Σάββα Μαρίλια για τη πολύ μεγάλη βοήθεια και συνεισφορά που είχαν στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ το συμφοιτητή μου Κωνσταντίνο Παπαδόπουλο για την άψογη συνεργασία μας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **6**

ABSTRACT **7**

Α. ΕΙΣΑΓΩΓΗ **8**

Β. ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ **10**

Β.1 Γραμμικοί επιταχυντές *10*
Β.2 Παραγωγή νετρονίων σε θάλαμο γραμμικού επιταχυντή *11*
Β.3 Αλληλεπιδράσεις νετρονίων και ύλης. *15*
Β.4 Θωράκιση θαλάμου γραμμικού επιταχυντή. *17*
Β.5 Θεωρητικές μέθοδοι υπολογισμού της ισοδύναμης δόσης νετρονίων. *20*
Β.6 Μέθοδος Monte Carlo. *22*
Β.7 Μέτρηση νετρονίων με τη χρήση ανιχνευτών ενεργοποίησης. *22*
Β.8 Ανιχνευτής HpGe. *23*

Γ. ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ **25**

Γ.1 Υπολογιστική Μέθοδος *25*
Γ.1.1 Κώδικας MCNP5 25
Γ.1.2 Υπολογισμός της ροής και της ισοδύναμης δόσης H*(10) νετρονίων στο θάλαμο θεραπείας και κατά μήκος του λαβυρίνθου. 26
Γ.1.3 Απόκριση ανιχνευτών ενεργοποίησης. 30
Γ.1.4 Εκτίμηση της ροής νετρονίων στη θύρα του θαλάμου θεραπείας. 33
Γ.1.5 Υλικά. 34
Γ.1.6 Βιβλιοθήκες διατομών. 34
Γ.1.7 Στατιστικοί έλεγχοι. 35
Γ.2 Πειραματική Μέθοδος *36*
Γ.2.1 Βαθμονόμηση ανιχνευτή HpGe 36
Γ.2.2 Μεταλλικά ελάσματα ενεργοποίησης (Activation Foils). 41
Γ.2.3 Επιβραδυντές-Moderators. 42
Γ.2.4 Ακτινοβόληση 43
Γ.2.5 Μέτρηση των ελασμάτων ενεργοποίησης στον ανιχνευτή HpGe. 46
Γ.2.6 Φασματοσκοπική ανάλυση 47
Γ.2.7 Υπολογισμός ροής νετρονίων. 48
Γ.3 Αποτελέσματα *49*
Γ.3.1 Αποτελέσματα υπολογισμών. 49
Γ.3.2 Πειραματικά αποτελέσματα. 58
Γ.3.3 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων. 60
Γ.3.4. Σύγκριση υπολογισμών ισοδύναμης δόσης νετρονίων στη θύρα με εμπειρικές μεθόδους. 62

Δ. ΓΕΝΙΚΗ ΣΥΖΗΤΗΣΗ **63**

Ε. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ **66**

ΣΤ. ΒΙΒΙΟΓΡΑΦΙΑ **69**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α **72**

ΣΥΣΤΑΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ **72**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β **74**
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ **74**
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ **76**
ΚΩΔΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ (INPUT FILES) **76**
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ **78**
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ HPGE ΓΙΑ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ **78**
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε **79**
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ **79**
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ **80**
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΘΜΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΚΑΙ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ ΣΤΗ ΘΥΡΑ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ **80**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Γραμμικοί επιταχυντές υψηλής ενέργειας (>10 MV), παράγουν νετρόνια μέσω πυρηνικών αντιδράσεων (γ, n) με τα υλικά της κεφαλής τους. Αυτά τα νετρόνια πρέπει να παρθούν υπόψη στο σχεδιασμό της θωράκισης του θαλάμου θεραπείας. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η εκτίμηση της ροής νετρονίων στο θάλαμο θεραπείας, καθώς και κατά μήκος του λαβυρίνθου ενός ιατρικού γραμμικού επιταχυντή 18 MV. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις, με τη βοήθεια του Monte Carlo κώδικα MCNP, σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο προσομοιώθηκε η κεφαλή του γραμμικού επιταχυντή και το δωμάτιο θεραπείας. Η προσομοίωση της κεφαλής έγινε με τη βοήθεια απλουστευμένων γεωμετριών από τη βιβλιογραφία, ως σφαιρική πηγή από βολφράμιο, ακτίνας 10 cm (Carinou, et al. 1999) ή ως σημειακή πηγή στο κέντρο σφαιρικού κελιού από βολφράμιο (Vega-Carrillo, et al. 2012). Το ενεργειακό φάσμα νετρονίων της πηγής πάρθηκε από την αναλυτική σχέση που εξήγαγε ο (Tosi, et al. 1991). Στο δεύτερο στάδιο, η ροή νετρονίων που υπολογίστηκε στο πρώτο, χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της απόκρισης ελασμάτων ενεργοποίησης από ίνδιο και χρυσό. Τα ελάσματα ήταν τοποθετημένα στο κέντρο επιβραδυντών από πλεξιγκλάς. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκρίθηκαν με μετρήσεις που έγιναν με ελάσματα ενεργοποίησης καθώς και με εμπειρικές μεθόδους, για τον καθορισμό της ροής νετρονίων στο θάλαμο θεραπείας και στη θύρα του λαβυρίνθου. Η συμφωνία των αποτελεσμάτων κρίθηκε ικανοποιητική. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης επέτρεψαν την ανάπτυξη, μια απλής και συμφέρουσας σε υπολογιστικό χρόνο, μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της δόσης από νετρόνια στο θάλαμο θεραπείας και στο λαβύρινθο ιατρικών γραμμικών επιταχυντών υψηλής ενέργειας. Συνεπώς συνεισφέρουν στην προσπάθεια μείωσης της απορροφούμενης δόσης στο προσωπικό και στους ασθενείς κατά την ακτινοθεραπεία.

ABSTRACT

High-energy linear accelerators (>10 MV), produce neutrons via nuclear reactions (γ, n), with the materials on the linac head. These neutrons must be considered in the treatment room shielding designing. Scope of the present study is the estimation of neutron fluence in the treatment room and along the maze of an 18 MV medical linear accelerator. Simulations were performed using Monte Carlo code MCNP in two stages. In the first stage the linac head and treatment room were modeled. The linac head was simulated using two simplified geometries from the bibliography, either as a spherical cell source composed of tungsten, 10 cm in thickness (Carinou, et al. 1999) or as a point source in the center of a spherical cell composed of tungsten (Vega-Carrillo, et al. 2012). The neutron energy spectrum at the source was taken from the analytical expression given by (Tosi, et al. 1991). In the second simulation stage, the neutron fluence calculated in stage 1 was used to evaluate the response of In and Au activation foil detectors positioned within Plexiglas moderators. The results of the calculations were verified against measurements performed using activation foils and against empirical methods to determine the neutron fluence in the treatment room and the door of the maze and a very a good agreement was observed. The results of the study enabled the development of a simple and computational time effective methodology for the calculation of neutron dose in the treatment room and maze of high energy medical accelerators and therefore contribute to the effort to reduce radiation dose to the personnel and patients in radiation therapy.

Α. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αριθμός κρουσμάτων καρκίνου παγκοσμίως αυξάνονται (Vega-Carrillo, et al. 2012). Ωστόσο, σημαντική πρόοδος έχει επιτευχθεί στις μεθόδους θεραπείας του καρκίνου, που περιλαμβάνουν τη χρήση ακτινοβολίας ή και του συνδυασμού της με χημειοθεραπεία και επεμβατικές μεθόδους.

Η δέσμη της ακτινοβολίας κατευθύνεται στην πάσχουσα περιοχή (καρκινικό όγκο) καταστρέφοντας τα ακτινοευαίσθητα νεοπλασματικά κύτταρα, προστατεύοντας ταυτόχρονα τους παρακείμενους υγιείς ιστούς και κρίσιμα όργανα. Η σύγχρονη ακτινοθεραπεία εξελίσσεται συνεχώς και όλο και νέες τεχνικές εφαρμόζονται. Τέτοιες τεχνικές όπως η σύμμορφη τρισδιάστατη ακτινοθεραπεία (3D Conformal Radiotherapy, 3D-CRT), η ακτινοθεραπεία με πεδία ακτινοβολίας διαμορφούμενης έντασης (Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT) πραγματοποιούνται συνήθως με τη χρήση δεσμών ακτίνων-Χ που παράγονται σε γραμμικούς επιταχυντές για κλινική χρήση (medical linear accelerators) υψηλής τάσης 6-24 MV.

Στην περίπτωση γραμμικών επιταχυντών που παράγουν φωτόνια ενέργειας μεγαλύτερης από 10 MeV, η δόση προέρχεται από τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια που παράγονται κατά την λειτουργία του επιταχυντή, αλλά και από τα νετρόνια που παράγονται μέσω των αντιδράσεων τύπου (γ, n) και (e, n), που συμβαίνουν κυρίως κατά την αλληλεπίδραση των φωτονίων με τους πυρήνες των βαρέων υλικών (υψηλού Z) της κεφαλής και του στόχου του γραμμικού επιταχυντή. Επομένως, η συνεισφορά των νετρονίων πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη στην ακτινοπροστασία των ασθενών, του προσωπικού και του κοινού.

Συνήθως η θωράκιση που χρησιμοποιείται για την εξασθένηση της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας δέσμης φωτονίων, κρίνεται επαρκής και για τη θωράκιση των νετρονίων. Παρόλα αυτά, νετρόνια που σκεδάζονται στο θάλαμο θεραπείας και κατά μήκος του λαβυρίνθου, μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα ακτινοπροστασίας στην θύρα του θαλάμου και επομένως πρέπει να ληφθούν υπόψη στον σχεδιασμό της θωράκισης του θαλάμου, του λαβυρίνθου και της θύρας (Carinou, et al. 1999).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της ροής νετρονίων σε διάφορες θέσεις στο θάλαμο θεραπείας και κατά μήκος του λαβυρίνθου, γραμμικού επιταχυντή ELEKTA SYNERGY 18 MV, που είναι εγκατεστημένος στο νοσοκομείο ο ‘Άγιος Σάββας’.

Οι υπολογισμοί έγιναν με τη χρήση του Monte Carlo κώδικα MCNP. Το μοντέλο περιέλαβε λεπτομερή προσομοίωση του θαλάμου θεραπείας και του λαβυρίνθου. Ωστόσο η γεωμετρία της κεφαλής του γραμμικού απλουστεύτηκε σημαντικά και προσομοιώθηκε σαν σφαιρικός φλοιός ή σφαίρα από βολφράμιο. Οι γεωμετρίες επιλέχθηκαν βάση βιβλιογραφικών αναφορών από (Carinou, et al. 1999), (Vega-Carrillo, et al. 2012) και των αποτελεσμάτων πρόσφατης εργασίας που συνέκρινε απλές γεωμετρίες προσομοίωσης της κεφαλής γραμμικών επιταχυντών όσον αφορά στην παραγωγή νετρονίων (Παπαδόπουλος 2018).

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκρίθηκαν με μετρήσεις της ροής νετρονίων στο κύριο θάλαμο και κατά μήκος του λαβυρίνθου του θαλάμου με τη χρήση ανιχνευτών ενεργοποίησης (activation foils) από χρυσό και ίνδιο.

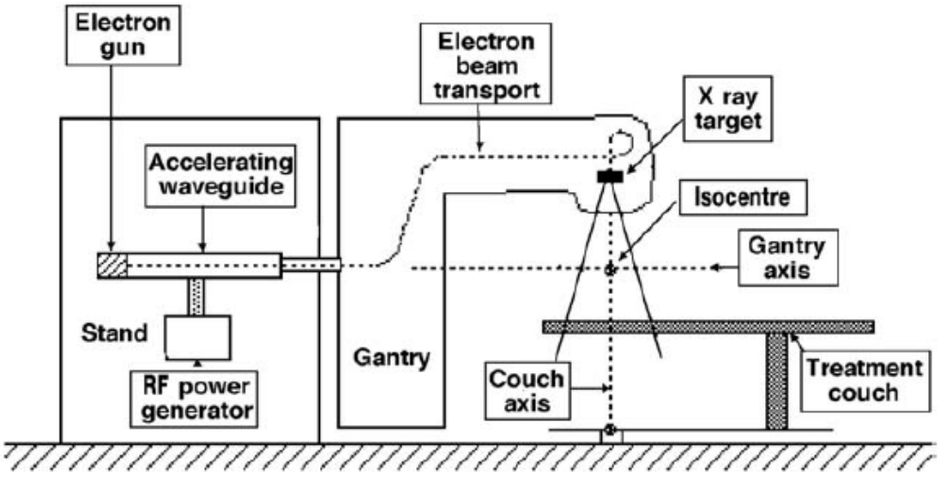
Επίσης, συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ροής στη θύρα του θαλάμου ιατρικών γραμμικών επιταχυντών από τη βιβλιογραφία.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έδειξαν ότι παρά την σημαντική απλούστευση της γεωμετρίας της κεφαλής, η ροή των νετρονίων εκτιμήθηκε με ικανοποιητική ακρίβεια. Επομένως, τα αποτελέσματα της εργασίας προσφέρουν δεδομένα για την αξιολόγηση της επάρκειας θωράκισης για νετρόνια γραμμικών επιταχυντών, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ακτινοπροστασίας των ασθενών και του προσωπικού. Η μέθοδος, μπορεί να γενικευτεί στις μελέτες θωράκισης νετρονίων και σε άλλους θαλάμους ακτινοθεραπείας που διαθέτουν αντίστοιχο εξοπλισμό.

Β. ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Β.1 Γραμμικοί επιταχυντές

Οι ιατρικοί γραμμικοί επιταχυντές είναι επιταχυντές, οι οποίοι μπορούν να επιταχύνουν ηλεκτρόνια, κάνοντας χρήση μη συντηρητικών RF πεδίων στο εύρος συχνοτήτων από 10^3 MHz έως 10^4 MHz. Τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια αποκτούν κινητική ενέργεια από 4 έως και 25 MeV. Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται ακολουθώντας ευθείες τροχιές κατά το μήκος κυματοδηγών (waveguides). Τα υψηλής ισχύος RF πεδία, που χρησιμοποιούνται για την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων μέσα στους κυματοδηγούς, παράγονται σε ειδικές πηγές μικροκυματικής ισχύος όπως είναι η λυχνία Magnetron ή Klystron. Τέλος η δέσμη των ηλεκτρονίων μετά την εκτροπή της από ένα κατάλληλο μαγνητικό πεδίο (bending magnet) κατευθύνεται προς μεταλλικό στόχο (υψηλού Z) συνήθως από κράμα βολφραμίου. Τα ηλεκτρόνια επιβραδύνονται από το στόχο, παράγοντας ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung), η οποία στη συνέχεια διαμορφώνεται ώστε να είναι κλινικά χρήσιμη (Σχήμα 1). Τυπικές τιμές ενέργειας γραμμικών επιταχυντών για κλινική χρήση είναι 6-22 MV για δέσμες φωτονίων και 4-22 MeV για δέσμες ηλεκτρονίων.



Σχήμα 1. Αναπαράσταση ενός γραμμικού επιταχυντή για ιατρική χρήση (Podgorsak 2005)

Η χρήση γραμμικών επιταχυντών υψηλής ενέργειας προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα όπως για παράδειγμα απορρόφηση χαμηλότερης δόσης στο δέρμα του ασθενούς, μπορεί να δοθεί υψηλή δόση σε μεγάλο βάθος στο σώμα, μείωση της δόσης λόγω σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στους γειτονικούς υγιείς ιστούς γύρο από τον όγκο, μείωση της καμπυλότητας των ισοδοσιακών καμπυλών.

Β.2 Παραγωγή νετρονίων σε θάλαμο γραμμικού επιταχυντή

Προηγουμένως αναφέρθηκαν βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης γραμμικών επιταχυντών υψηλής ενέργειας. Ωστόσο, η χρήση επιταχυντών ενέργειας μεγαλύτερης από 8-10 MV εισάγει ένα επιπλέον πρόβλημα όσον αφορά στην ακτινοπροστασία του ασθενούς και του προσωπικού. Για ενέργειες φωτονίων μεγαλύτερες των 8-10 MeV έχουμε παραγωγή νετρονίων τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση της απορροφούμενης δόσης από τον ασθενή, το προσωπικό ακόμα και το κοινό.

Η παραγωγή νετρονίων πραγματοποιείται σε έναν γραμμικό επιταχυντή είτε αυτός λειτουργεί με δέσμη φωτονίων είτε με δέσμη ηλεκτρονίων. Οι αντίστοιχες αντιδράσεις είναι οι εξής:

$$\gamma + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-1}_{Z}X + \mathrm{n}, \qquad \text{αντιδράσεις (γ, n)} \tag{1}$$

$$\mathrm{e} + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-1}_{Z}X + \mathrm{n} + \mathrm{e}', \quad \text{αντιδράσεις (e, e΄n)} \tag{2}$$

Τα νετρόνια σε γραμμικούς επιταχυντές παράγονται κυρίως μέσω πυρηνικών αντιδράσεων (γ,n), καθώς η ενεργός διατομή της αντίδρασης (1) είναι περίπου 100 φορές μεγαλύτερη της αντίδρασης (2). Για αυτό το λόγο θα αναφερθούμε μόνο στα νετρόνια λόγω αντιδράσεων (γ, n). Αυτά παράγονται κατά τη αλληλεπίδραση των φωτονίων με έναν πυρήνα με δύο διαδικασίες. Κατά την πρώτη, η ενέργεια του φωτονίου κατανέμεται μεταξύ των νουκλεονίων του πυρήνα, με αποτέλεσμα ένα νετρόνιο κοντά στην επιφάνεια του να αποκτήσει ικανή ενέργεια ώστε να αποσπαστεί από αυτόν. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως «εξάτμιση» (evaporation). Η εκπομπή των νετρονίων μέσω αυτής της διαδικασίας είναι ισοτροπική. Η δεύτερη διαδικασία αφορά τα λεγόμενα νετρόνια άμεσης απόσπασης (knock-on neutrons). Αυτά εκπέμπονται από την πλήρη μεταφορά της ενέργειας ενός φωτονίου σε ένα νετρόνιο του πυρήνα, με αποτέλεσμα το τελευταίο να αποσπαστεί από αυτόν με κατεύθυνση συνήθως ίδια με του προσπίπτοντος φωτονίου (Vega-Carrillo, et al. 2012). Η ενέργεια του εκπεμπόμενου νετρονίου (E_n) δίνεται από την εξής σχέση:

$$\mathrm{E_n} = \mathrm{E_\gamma} - \mathrm{E_b} - \mathrm{E^*} \tag{3}$$

Όπου:

E_γ , η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου

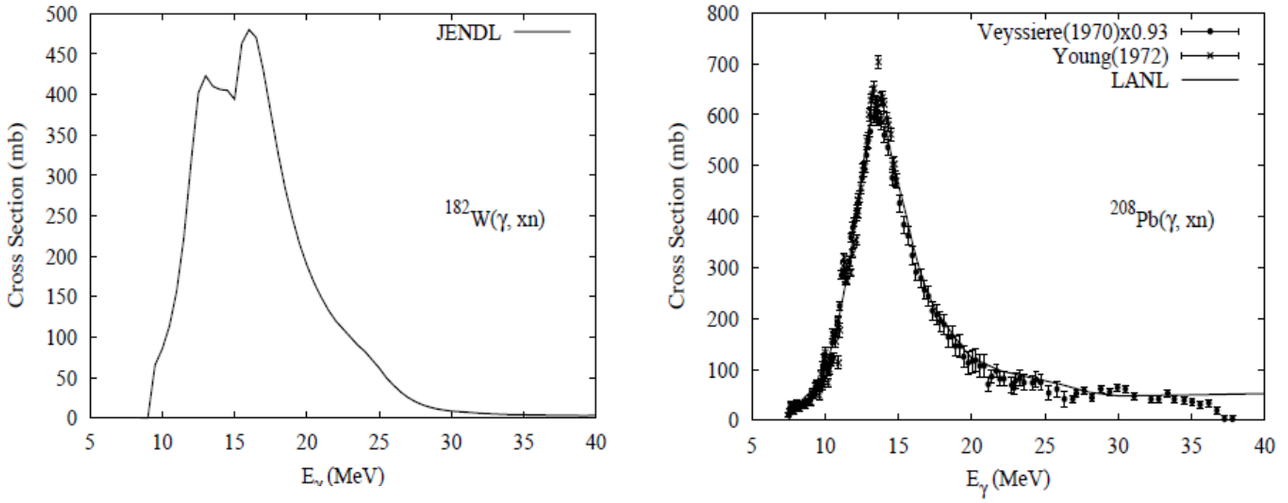
E_b , η ενέργεια δέσμευσης (binding energy) του νετρονίου στον πυρήνα

E*, η πιθανή ενέργεια διέγερσης του πυρήνα (excitation state energy)

Η διαδικασία της εξάτμισης είναι επικρατέστερη για βαρείς πυρήνες, ενώ η διαδικασία άμεσης απόσπασης για ελαφρύτερους πυρήνες. Να προσθέσουμε ότι φωτονετρόνια μπορούν να παραχθούν και μέσω αντιδράσεων (γ, 2n) και (γ, pn). Ωστόσο, το ενεργειακό κατώφλι των αντιδράσεων αυτών είναι υψηλότερο και επομένως έχουν μικρή σημασία στην περιοχή των ενεργειών που εξετάζοντα στην παρούσα εργασία (<18 MeV). Τα νετρόνια προερχόμενα από εξάτμιση (evaporation neutrons) χαρακτηρίζονται από ενεργειακή κατανομή Maxwell, η οποία εμφανίζει μέγιστο για ενέργεια ίση με τη θερμοκρασία T (MeV) του πυρήνα που έγινε η αντίδραση (γ,n) και μέση ενέργεια

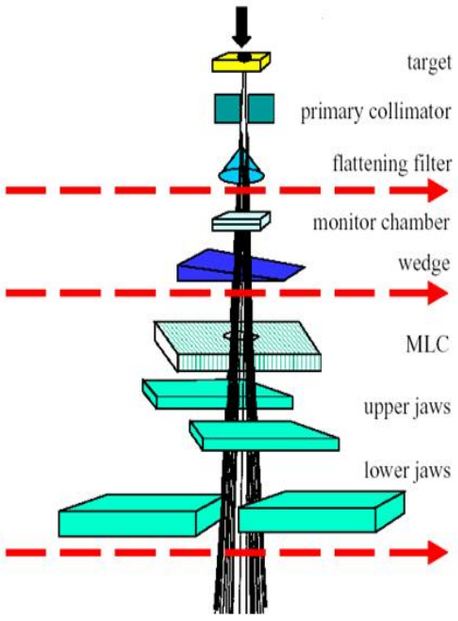
ίση με 2T (McCall and Swanson 1979). Αντιθέτως τα νετρόνια άμεσης απόσπασης (knock-on neutrons), τα οποία αποτελούν το 15% του συνολικού φάσματος φωτονετρονίων σε ένα γραμμικό επιταχυντή, διαθέτουν μεγαλύτερη ενέργεια από τα πρώτα (Facure, et al. 2005). Τα φωτονετρόνια προερχόμενα από εξάτμιση συνθέτουν την περιοχή του Γιγάντιου Διπολικού Συντονισμού (Giant Dipole Resonance) στην γραφική παράσταση της διατομής φωτονετρονικής αντίδρασης σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων. Για παράδειγμα στο Σχήμα 2 δίδεται η ενεργός διατομή της αντίδρασης (γ, n) συναρτήσει της ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου για τα ισότοπα ^{208}Pb και ^{182}W.

Στο Σχήμα 2 διακρίνονται η περιοχή του γιγάντιου συντονισμού , το ενεργειακό κατώφλι της αντίδρασης, καθώς και οι περιοχές στις οποίες είναι κυρίαρχα φαινόμενα η πυρηνική εξάτμιση και η άμεση απόσπαση των νετρονίων από τον πυρήνα. Σημειώνεται ότι ο μόλυβδος και το βολφράμιο είναι υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή της κεφαλής ενός γραμμικού επιταχυντή.



Σχήμα 2. Διατομή του ^{208}Pb και του ^{182}W, για την αντίδραση (γ, n) συναρτήσει της ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου (IAEA, 2000)

Η παραγωγή των φωτονετρονίων σε ένα θάλαμο γραμμικού επιταχυντή οφείλεται κατά κύριο λόγο στις αλληλεπιδράσεις των φωτονίων με τα στοιχεία της κεφαλής του (στόχος, κατευθυντήρες, φίλτρα επιπέδωσης). Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται μια τυπική κεφαλή γραμμικού επιταχυντή σε λειτουργία δέσμης φωτονίων.



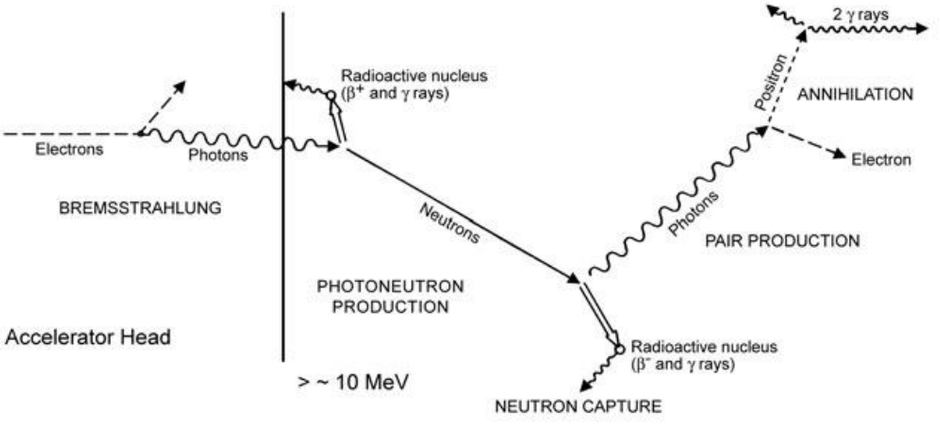
Σχήμα 3. Αναπαράσταση της κεφαλής ενός γραμμικού επιταχυντή σε λειτουργία δέσμης φωτονίων.

Αυτά τα στοιχεία είναι κατασκευασμένα από υλικά όπως Au, W, Fe, Al και Pb. Φωτονετρόνια μπορούν όμως να παραχθούν και στα υλικά θωράκισης της κεφαλής, από το σώμα του ασθενούς, το κρεβάτι αλλά και από τους τοίχους του δωματίου θεραπείας καθώς αυτά περιέχουν στοιχεία όπως C, O, N, S, και Mg (Mohammadi, et al. 2015). Κάθε στοιχείο έχει διαφορετικό ενεργειακό κατώφλι, ώστε να είναι δυνατή η απόσπαση νετρονίου από τον πυρήνα του (Πίνακας 1). Ωστόσο, η παραγωγή νετρονίων είναι ανάλογη προς την ροή των προσπιπτόντων φωτονίων και επομένως η παραγωγή νετρονίων είναι πολύ μικρότερη στα υλικά εκτός της κεφαλής σε σχέση με την παραγωγή στον στόχο, το επιπεδωτικό φίλτρο και τον κατευθυντήρα που βρίσκονται στο κύρια δέσμη.

Πίνακας 1. Ενεργειακό κατώφλι για αντιδράσεις (γ,n) διαφόρων ισοτόπων (Mohammadi, et al. 2015)

Ισότοπο	**Ενεργειακό κατώφλι (MeV)**
^{12}C	18,27
^{14}N	10,55
^{16}O	15,66
^{32}S	15,04
^{24}Mg	16,53
^{27}Al	13,06
^{56}Fe	11,2
^{184}W	7,41
^{197}Au	8,07
^{208}Pb	7,37

Στο Σχήμα 4 συνοψίζεται η διαδικασία παραγωγής νετρονίων σε ένα γραμμικό επιταχυντή καθώς και τα είδη των πιθανών αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας με την ύλη στις οποίες συμμετέχουν. Συγκεκριμένα ηλεκτρόνια επιβραδύνονται από το στόχο της κεφαλής με αποτέλεσμα να εκπεμφθεί ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung). Στη συνέχεια κάποιο φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα υλικό της κεφαλής, με αποτέλεσμα να αποσπαστεί νετρόνιο από τον πυρήνα του υλικού. Ο διεγερμένος πυρήνας αποδιεγείρεται, εκπέμποντας β^+ και γ ακτινοβολία. Το νετρόνιο που αποσπάστηκε, σκεδάζεται ανελαστικά στο υλικό θωράκισης του θαλάμου θεραπείας. Από την αλληλεπίδραση αυτήν εκπέμπεται φωτόνιο με ενέργεια ικανή, ώστε να κάνει δίδυμη γένεση. Το νετρόνιο που σκεδάστηκε έχει χάσει μεγάλο μέρος της ενέργειας του και απορροφάται από τη θωράκιση μέσω νετρονικής σύλληψης (n, γ).



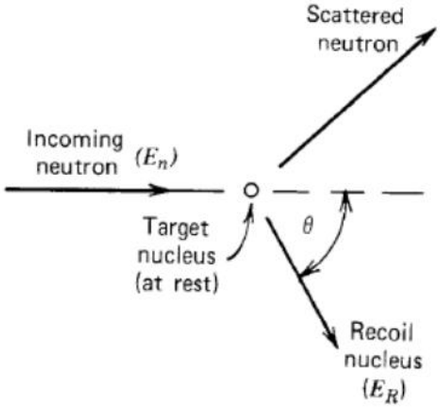
Σχήμα 4. Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας και ύλης που οδηγούν σε παραγωγή νετρονίων σε γραμμικό επιταχυντή ενέργειας >10 MeV.

Β.3 Αλληλεπιδράσεις νετρονίων και ύλης.

Παρακάτω αναφέρονται οι κύριοι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των νετρονίων και της ύλης:

Α) Ελαστικές σκεδάσεις.

Το νετρόνιο προσπίπτει στον πυρήνα-στόχο και σκεδάζεται. Αντίστοιχα ο πυρήνας δε βρίσκεται πλέον σε ηρεμία, αλλά ανακρούεται υπό γωνία θ σε σχέση με την αρχική διεύθυνση του προσπίπτοντος νετρονίου (Σχήμα 5). Ισχύει η αρχή διατήρησης της κινητικής ενέργειας και ορμής του συστήματος. Οι ελαστικές σκεδάσεις αποτελούν τον κύριο μηχανισμό επιβράδυνσης των ταχέων νετρονίων (ενέργειας 1-20 MeV) από υλικά χαμηλού Z.



Σχήμα 5. Αναπαράσταση του μηχανισμού των ελαστικών σκεδάσεων των νετρονίων με την ύλη.

Η ενέργεια του ανακρούοντος πυρήνα δίνεται από τη σχέση (4):

$$\mathrm{E_R} = \frac{4\mathrm{A}}{(1+\mathrm{A})^2}(\cos^2\theta)\mathrm{E_n} \qquad (4)$$

Όπου:

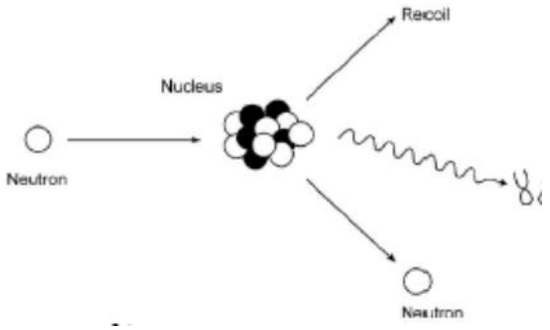
A, ο μαζικός αριθμός του πυρήνα-στόχου.

θ, η γωνία ανάκρουσης του πυρήνα στόχου.

$\mathbf{E_n}$, η ενέργεια του προσπίπτοντος νετρονίου.

Β) Ανελαστικές σκεδάσεις.

Το νετρόνιο προσπίπτει στο πυρήνα-στόχο. Στιγμιαία δημιουργείται ένα συσσωμάτωμα των δύο μαζών. Αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης είναι η σκέδαση του νετρονίου, η ανάκρουση του πυρήνα-στόχου και η εκπομπή της επιπλέον ενέργειας υπό τη μορφή ακτινοβολίας γάμμα (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Αναπαράσταση του μηχανισμού των ανελαστικών σκεδάσεων των νετρονίων με την ύλη.

Η μέση ενέργεια του σκεδασμένου νετρονίου, δίνεται από τη σχέση:

$$E_2 = 6{,}4 \cdot \sqrt{\frac{E_1}{A}} \qquad (5)$$

Όπου:

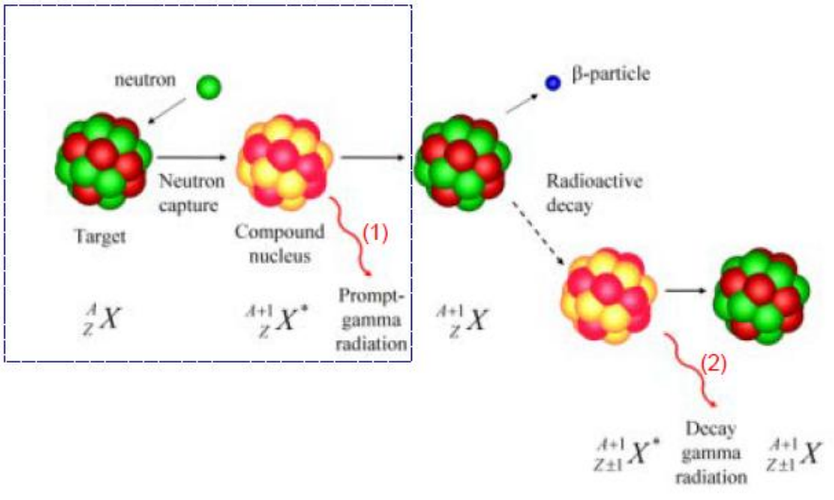
E_1, η ενέργεια του προσπίπτοντος νετρονίου.

A, ο μαζικός αριθμός του πυρήνα-στόχου.

Αποτελούν τον κύριο μηχανισμό επιβράδυνσης των ταχέων νετρονίων από υλικά υψηλού Z. Εμφανίζουν ενεργειακό κατώφλι κοντά στα 5 MeV.

Γ) Ραδιενεργός ενσωμάτωση.

Το νετρόνιο συλλαμβάνεται-απορροφάται από τον πυρήνα-στόχο. Ο θυγατρικός πυρήνας αποδιεγείρεται με ακαριαία (~10^{-12} sec) εκπομπή ακτινοβολίας γάμμα (Σχήμα 7).



Σχήμα 7. Αναπαράσταση του μηχανισμού της ραδιενεργής ενσωμάτωσης των νετρονίων.

Β.4 Θωράκιση θαλάμου γραμμικού επιταχυντή.

Η θωράκιση του θαλάμου ενός γραμμικού επιταχυντή για νετρόνια είναι υψίστης σημασίας καθώς τα νετρόνια έχουν υψηλό συντελεστή στάθμισης ακτινοβολίας W_R (Πίνακας 2) σε σχέση με άλλα σωματίδια όπως τα φωτόνια ($W_{R,φωτόνια}$=1). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι τα δευτερογενή σωματίδια (ηλεκτρόνια), που παράγονται κατά την αλληλεπίδραση φωτονίων ενέργειας 1-20 MeV με ανθρώπινο ιστό, παρουσιάζουν LET της τάξεως του 1 KeV/μm. Αντίστοιχα για αλληλεπίδραση νετρονίων με ιστό, τα πρωτόνια που προκύπτουν μπορεί να έχουν LET έως και 30-80 KeV/μm.

Πίνακας 2. Συντελεστές στάθμισης ακτινοβολίας W_R νετρονίων συναρτήσει της ενέργειάς τους σύμφωνα με ICRP 60 (Καλέφ-Εζρά 2016-2017).

Ενέργεια νετρονίων	**W_R**
< 10 keV	5
10 keV έως 100 keV	10
100 keV έως 2 MeV	20
2 MeV έως 20 MeV	10
> 20 MeV	5

Επιλογή υλικών θωράκισης.

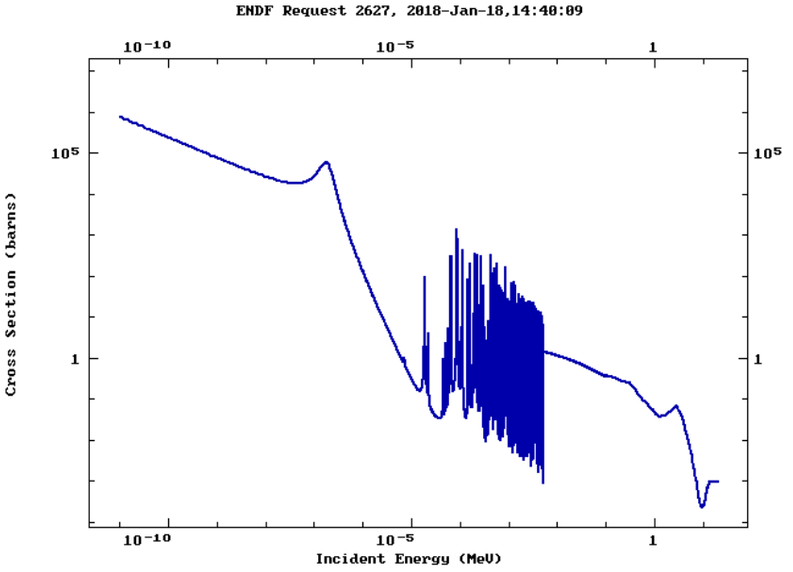
Κατά την κατασκευή ενός θαλάμου γραμμικού επιταχυντή η επιλογή των υλικών θωράκισης καθώς και το πάχος της θωράκισης είναι παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν αναλυτικά. Βασικά κριτήρια είναι το κόστος, ο διαθέσιμος χώρος και το είδος του γραμμικού επιταχυντή. Στην περίπτωση γραμμικού επιταχυντή ενέργειας μεγαλύτερης των 10 MeV η παραγωγή φωτονετρονίων είναι πολύ σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό των θωρακίσεων.

Το πιο σύνηθες υλικό κατασκευής των τοίχων ενός θαλάμου γραμμικού επιταχυντή είναι το σκυρόδεμα (concrete), καθώς έχει το χαμηλότερο κόστος. Υπάρχουν διαφόρων ειδών σκυροδέματα (Portland, βαρυτικό, βοριωμένο) ανάλογα με την πυκνότητά τους καθώς και την περιεκτικότητά τους σε τσιμέντο και άλλα υλικά.

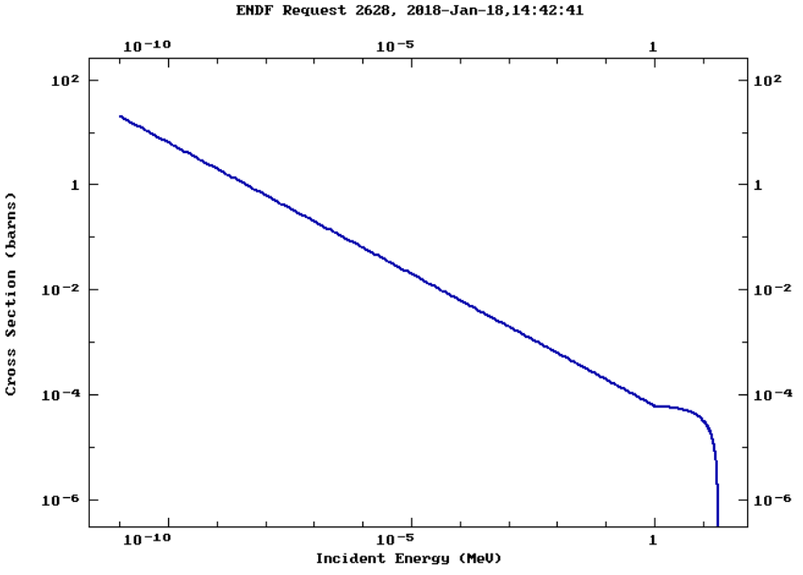
Το Πάχος Υποδεκαπλασιασμού (Tenth Value Layer, TVL) για την κύρια δέσμη των ακτίνων Χ στο σκυρόδεμα είναι σχεδόν διπλάσιο από εκείνο των νετρονίων. Επομένως η θωράκιση για την κύρια δέσμη ακτίνων Χ θα είναι επαρκής και για τα νετρόνια.

Το σκυρόδεμα έχει σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο και επομένως αποτελεί αποτελεσματική θωράκιση για ταχέα νετρόνια. Αντίστοιχο υλικό είναι και το ξύλο καθώς και πλάκες πολυαιθυλενίου (λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε υδρογόνο). Μέσω ελαστικών σκεδάσεων με τους πυρήνες υδρογόνου, τα ταχέα νετρόνια επιβραδύνονται. Μετά από αρκετές αλληλεπιδράσεις έχουν χάσει κινητική ενέργεια ώστε να ανήκουν πλέον στα θερμικά νετρόνια. Αυτά απορροφούνται μέσω της ραδιενεργού ενσωμάτωσης από τα διάφορα υλικά εκπέμποντας ακτίνες γ συγκεκριμένης ενέργειας. Υλικά με υψηλές διατομές απορρόφησης θερμικών νετρονίων είναι το κάδμιο (σ=2450 barns) και το βόριο (σ=3837 barns), τα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται με τη μορφή φύλλου επίστρωσης στους τοίχους και στην πόρτα.

Στα Σχήματα 8 και 9 παρουσιάζεται η ενεργός διατομή της ραδιενεργούς ενσωμάτωσης νετρονίων για αυτά τα υλικά, αντίστοιχα. Η απορρόφηση όμως των νετρονίων από αυτά τα υλικά οδηγεί σε εκπομπή ακτίνων γ , οι οποίες πρέπει να παρθούν υπόψη στη θωράκιση του θαλάμου (IAEA 2006).



Σχήμα 8. Ενεργός διατομή ραδιενεργής ενσωμάτωσης νετρονίων για το ^{113}Cd (IAEA, National Nuclear Data Center n.d.).



Σχήμα 9. Ενεργός διατομή ραδιενεργής ενσωμάτωσης νετρονίων για το ^{10}B (IAEA, National Nuclear Data Center n.d.).

Ως δεύτερη επιλογή για απορρόφηση θερμικών νετρονίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά που περιέχουν Η (σ=0.33 barns), αλλά σε αυτή την περίπτωση πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την άμεση εκπομπή ακτινοβολίας -γ στα 2.22 MeV από την αντίδραση σύλληψης

$^{1}H (n,\gamma) {}^{2}H$.

Βαριά υλικά όπως ο μόλυβδος και το ατσάλι μπορούν να χρησιμοποιηθούν εν μέρει ως υλικά θωράκισης νετρονίων, καθώς επιβραδύνουν τα ταχέα νετρόνια μέσω ανελαστικών σκεδάσεων. Συγκεκριμένα η ενεργός διατομή ανελαστικής σκέδασης νετρονίων πέφτει απότομα για ενέργειες κάτω από τα 5 MeV για το μόλυβδο και κάτω από 1 MeV για το ατσάλι (NCRP 2005). Τέλος υλικά όπως ο μόλυβδος έχουν υψηλή ενεργό διατομή παραγωγής φωτονετρονίων.

Η πόρτα του θαλάμου είναι σημείο που χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό των θωρακίσεων. Κύρια απαίτηση για την κατασκευή της είναι η κατάλληλη θωράκιση για φωτόνια και νετρόνια, αλλά και το μικρό βάρος για λόγους λειτουργικότητας. Μια τεχνική αντιμετώπισης των παραπάνω, είναι αυτή των πολλαπλών επιστρώσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο συνδυασμός μόλυβδος-βοριωμένο πολυαιθυλένιο-μόλυβδος (τεχνική sandwich). Ο μόλυβδος προς την εσωτερική πλευρά της πόρτας επιβραδύνει τα ταχέα νετρόνια μέσω ανελαστικών σκεδάσεων κάνοντας έτσι το πολυαιθυλένιο πιο αποτελεσματικό στη θωράκιση νετρονίων. Ο μόλυβδος στην εξωτερική πλευρά της πόρτας επιτρέπει την εξασθένηση των ακτίνων γ που εκπέμφθηκαν λόγω της ραδιενεργού ενσωμάτωσης των νετρονίων από το βοριωμένο πολυαιθυλένιο.

<u>Σχεδιασμός θαλάμου θεραπείας γραμμικού επιταχυντή.</u>

Το πιο βασικό σημείο προσοχής όσον αφορά το σχεδιασμό του θαλάμου είναι ο λαβύρινθος. Πιο συγκεκριμένα ανάλογα και με το χώρο που διατίθεται προτιμάται:

- Μεγάλο μήκος λαβυρίνθου.
- Μεγάλο πάχος της γλώσσας του λαβυρίνθου.
- Λαβύρινθος με διπλή στροφή, αντί για μονή (όποτε είναι εφικτό).
- Κατάλληλος σχεδιασμός ώστε τα νετρόνια που φτάνουν στην είσοδο του λαβυρίνθου να έχουν σκεδαστεί τουλάχιστον δύο φορές πριν φτάσουν σε αυτήν.

B.5 Θεωρητικές μέθοδοι υπολογισμού της ισοδύναμης δόσης νετρονίων.

Οι αναλυτικές μέθοδοι που αναφέρονται στις επόμενες παραγράφους, αφορούν στον υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης από νετρόνια και έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις σε αριθμό εγκαταστάσεων θαλάμων θεραπείας γραμμικών επιταχυντών υψηλής ενέργειας ή είναι αποτελέσματα υπολογισμών με την μέθοδο Monte Carlo.

A) Μέθοδος Wu & McGinley.

Η μέθοδος Wu & McGinley (2003) αποτελεί διόρθωση της μεθόδου Kersey (1979). Η μέθοδος Kersey περιγράφει την εξασθένηση των νετρονίων κατά μήκος του λαβυρίνθου του θαλάμου θεραπείας με βάσει το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου και ενός παράγοντα με εκθέτη την απόσταση. Ο αλγόριθμος των Wu & McGinley παίρνει υπόψη εκτός από τους γεωμετρικούς παράγοντες, και τα υλικά κατασκευής των τοίχων καθώς και επιφάνειες μη καθιερωμένης μορφής (nonstandard surface areas). Τέλος η διόρθωση περιλαμβάνει και λαβυρίνθους μεγάλου μήκους και πλάτους (NCRP 2005). Η σχέση (6) δίνει την ισοδύναμη δόση των νετρονίων κατά μήκος του λαβυρίνθου:

$$H_{n,d} = 2{,}4 \cdot 10^{-15} \cdot \Phi_A \cdot \sqrt{\frac{S_0}{S_1}} \cdot \left[1{,}64 \cdot 10^{-\left(\frac{d_2}{1{,}9}\right)} + 10^{-\left(\frac{d_2}{TVD}\right)}\right] \quad (6)$$

Όπου:

$H_{n,D}$, είναι η ισοδύναμη δόση νετρονίων στην είσοδο του λαβυρίνθου σε Sv ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης ακτίνων X στο ισόκεντρο (Gy).

Φ_A, είναι η ροή των νετρονίων ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης φωτονίων στο ισόκεντρο ($m^{-2}Gy^{-1}$).

S_0/S_1, είναι ο λόγος της διατομής της εσωτερικής εισόδου του λαβυρίνθου προς τη διατομή κατά μήκος του λαβυρίνθου.

TVD $= 2.06\sqrt{S_1}$

d2 είναι η απόσταση από το σημείο A ως το B (Σχήμα 10).

Για τον υπολογισμό της ροής Φ_A χρησιμοποιήθηκε ο κάτωθι τύπος:

$$\Phi_A = \frac{\beta Q_n}{4\pi d1^2} + \frac{5.4\beta Q_n}{2\pi S_r} + \frac{1.3 Q_n}{2\pi S_r} \quad (7)$$

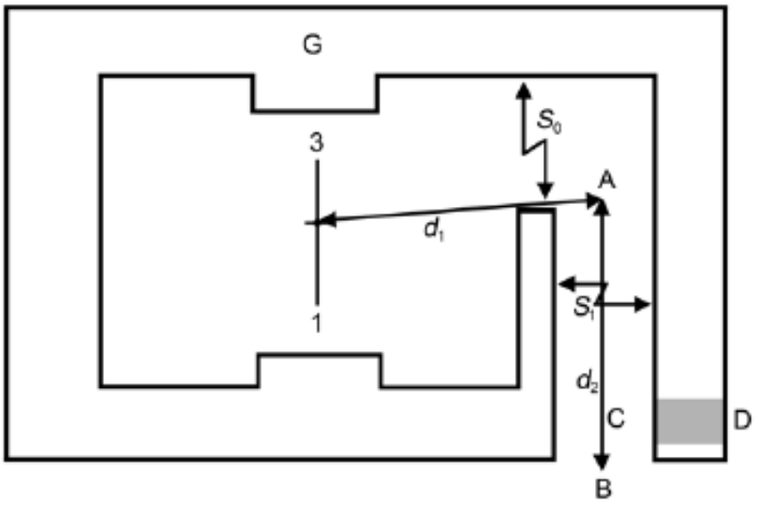
Όπου:

β=0,85 (για κεφαλή από βολφράμιο).

Q_n, η ισχύς της πηγής νετρονίων (neutron source strength) σε νετρόνια εκπεμπόμενα από την κεφαλή ανά gray απορροφούμενης δόσης ακτίνων X στο ισόκεντρο.

S_r, το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας του δωματίου θεραπείας σε m^2.

d1, είναι η απόσταση από το ισόκεντρο μέχρι το σημείο του κεντρικού άξονα του λαβυρίνθου, από το οποίο το ισόκεντρο είναι μόλις ορατό.



Σχήμα 10. Κάτοψη θαλάμου θεραπείας γραμμικού επιταχυντή για τον υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης νετρονίων στη πόρτα του λαβυρίνθου (NCRP 2005).

Β) Μέθοδος IPEM.

Η μέθοδός IPEM (1997) αποτελεί επίσης διόρθωση της μεθόδου Kersey. Συγκεκριμένα, υπολογίζει την ισοδύναμη δόση νετρονίων στην είσοδο του θαλάμου, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$H_{n,D} = (H_0)\left(\frac{S_0}{S_1}\right)\left(\frac{d_0}{d_1}\right)^2 \left(10^{-\left(\frac{\Sigma(d_i-3)}{5}\right)}\right) \quad (8)$$

Όπου:

Hn,D, είναι η ισοδύναμη δόση νετρονίων στην είσοδο του λαβυρίνθου σε mSv ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης ακτίνων Χ στο ισόκεντρο (Gy).

H_0, είναι η συνολική ισοδύναμη δόση νετρονίων σε απόσταση d_0=1,41m από το στόχο της κεφαλής, ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης ακτίνων Χ στο ισόκεντρο (mSv Gy^{-1}).

S_0/S_1, είναι ο λόγος της διατομής της εισόδου του λαβυρίνθου προς τη διατομή κατά μήκος του λαβυρίνθου.

d1, είναι η απόσταση από το ισόκεντρο μέχρι το σημείο του κεντρικού άξονα του λαβυρίνθου, από το οποίο το ισόκεντρο είναι μόλις ορατό.

d2, είναι η απόσταση από το σημείο Α ως το Β (βλ. Σχήμα 10).

d_i, για i=0,1,2.

Β.6 Μέθοδος Monte Carlo.

Η μέθοδος Monte Carlo βασίζεται στην επανάληψη τυχαίων δειγμάτων για την επίλυση ενός προβλήματος. Ουσιαστικά χρησιμοποιείται μια διαδικασία ανάλογη της ρίψης ενός ζαριού στα τυχερά παιχνίδια του καζίνο, από όπου προέκυψε και το όνομα «Monte Carlo».

Το πλεονέκτημα της υπολογιστικής αυτής μεθόδου είναι η δυνατότητα εφαρμογής της σε προβλήματα πολύπλοκης γεωμετρίας, τα οποία δεν μπορούν να προσομοιωθούν από κώδικες που χρησιμοποιούν θεωρητικές αναλυτικές μεθόδους. Αυτό οφείλεται στο ότι η προσομοίωση Monte Carlo εξάγει αποτελέσματα παρατηρώντας κάθε στοιχείο του συστήματος ξεχωριστά και καταγράφοντας γεγονότα από την μέση συμπεριφορά των στοιχείων. Ο αριθμός των δοκιμών που χρειάζονται για να περιγραφεί με ακρίβεια το ζητούμενο φαινόμενο είναι συνήθως πολύ μεγάλος, καθώς η διαδικασία δειγματοληψίας βασίζεται, όπως αναφέρθηκε, στην επιλογή τυχαίων αριθμών. Στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης σωματιδίων και ύλης καθένα από τα σωμάτια παρακολουθείται από τη στιγμή της εκπομπής του από την πηγή μέχρι την στιγμή που θα απορροφηθεί όλη η ενέργειά του από την ύλη. Αυτή η διαδικασία παρακολούθησης αποτελεί μία ιστορία για τον κώδικα το αποτέλεσμα της οποίας καταγράφεται.

Η πυκνότητα πιθανότητας υπολογίζεται από τα δεδομένα μεταφοράς των σωματιδίων στην ύλη χρησιμοποιώντας τους τυχαίους αριθμούς που παράγονται. Καταγράφεται το αποτέλεσμα κάθε βήματος κατά τη διάρκεια ζωής του εξομοιούμενου σωματιδίου και στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση συμπεριφορά των σωματιδίων σε ένα φυσικό σύστημα, χρησιμοποιώντας το κεντρικό οριακό θεώρημα από την μέση συμπεριφορά των εξομοιούμενων σωματιδίων (X-5 Monte Carlo Team 2003).

Η τεχνική Monte Carlo βασίζεται στα εξής στοιχεία:

- Στις βιβλιοθήκες που περιέχουν τις ενεργές διατομές των αντιδράσεων των σωματιδίων που λαμβάνουν μέρος στην προσομοίωση.
- Στους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για την μελέτη της μεταφοράς των σωματιδίων και αποτελούν την μαθηματική περιγραφή του φυσικού φαινομένου.
- Στην ανάλυση των πληροφοριών που λαμβάνονται μετά το τέλος της εξομοίωσης.

Β.7 Μέτρηση νετρονίων με τη χρήση ανιχνευτών ενεργοποίησης.

Για τη μέτρηση της ροής των νετρονίων στο θάλαμο ενός γραμμικού επιταχυντή μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφόρων ειδών ανιχνευτές, ενεργοί ή παθητικοί, όπως είναι οι αναλογικοί ανιχνευτές αερίου (BF_3 και ^3He), οι σπινθηριστές LiI, συστοιχίες από TLDs (Hsu, et al. 2010) και τα μεταλλικά ελάσματα ενεργοποίησης (activation foils).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά ελάσματα ενεργοποίησης. Αποτελούν παθητικούς ανιχνευτές νετρονίων. Χαρακτηριστικά μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται σαν ανιχνευτές ενεργοποίησης είναι: Au, In, Al, Co, Ag. Η επιλογή του υλικού και το μέγεθος του ελάσματος εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες ό-

πως το φάσμα των νετρονίων, τα επίπεδα ροής νετρονίων, ο χρόνος ακτινοβόλησης, ο χρόνος που μεσολαβεί από την ακτινοβόληση μέχρι τη μέτρηση κλπ.

Η ανίχνευση των νετρονίων βασίζεται σε πυρηνικές αντιδράσεις των νετρονίων με τα νουκλίδια του υλικού που έχουν σαν αποτέλεσμα την παραγωγή προϊόντων που εκπέμπουν ακτινοβολία γ:

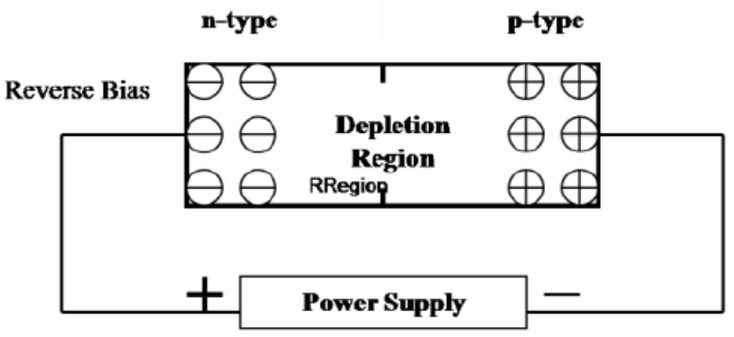
$$ {}^{A}_{Z}X_{target} + {}^{1}_{0}n \xrightarrow{R} {}^{A+1}_{Z}X_{1} \xrightarrow{\lambda} X_{2} $$

Σχήμα 11. Νετρονική ενεργοποίηση ενός πυρήνα X

Κύρια πλεονεκτήματά τους είναι το μικρό μέγεθος (προσφέροντας καλή χωρική διακριτική ικανότητα μέτρησης ροής), το χαμηλό κόστος και η 'αναισθησία' που εμφανίζουν στα φωτόνια και άλλες μορφές ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά η ακτινοβολία-γ που παράγεται λόγω νετρονικής ενεργοποίησης πρέπει να μετρηθεί από ξεχωριστή διάταξη ανίχνευσης (παθητικοί ανιχνευτές) (Yucel, et al. 2016). Συνήθως τα ενεργοποιημένα ελάσματα μετριούνται σε έναν ανιχνευτή γερμανίου.

Β.8 Ανιχνευτής HpGe.

Ο ανιχνευτής γερμανίου ανήκει στην κατηγορία των ημιαγωγών ανιχνευτών και πρωτοεισήχθη το 1962 (Tavendale and Ewan, 1963). Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην άμεση συλλογή φορτίων που παράγονται κατά τον ιονισμό του ημιαγώγιμου υλικού. Ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής παράγεται κατά μέσο όρο, για κάθε 3 eV απορροφούμενα από την ακτινοβολία. Αυτά τα ζεύγη ολισθαίνουν υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου προς την άνοδο και κάθοδο αντίστοιχα, όπου παράγεται ο παλμός. Εν γένει ένας κρύσταλλος Ge περιέχει προσμίξεις, οι οποίες μειώνουν την απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου, με αποτέλεσμα να οδηγούν στην αύξηση του θορύβου. Ανάλογα με την πρόσμιξη, οι ανιχνευτές διακρίνονται σε τύπου n (προσμίξεις δοτών- φορείς πλειονότητας ηλεκτρονίων) και τύπου p (προσμίξεις δεκτών-φορείς πλειονότητας οπών). Η λύση είναι η δημιουργία μιας επαφής p-n στο ένα ηλεκτρόδιο και η πόλωση της, ώστε το ρεύμα να μην περνά στην περίπτωση που δεν έχουμε ιοντίζουσα ακτινοβολία (Reverse Biasing) (Knoll 2010). Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται η λεγόμενη περιοχή απογύμνωσης (Depletion Region), στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς, προσεγγίζοντας έναν καθαρό ημιαγωγό (Σχήμα 12).



Σχήμα 12. Η δημιουργία της περιοχής απογύμνωσης στον ημιαγωγό Γερμανίου. Με την εφαρμογή αρνητικής πόλωσης οι φορείς φορτίου απομακρύνονται από την σύζευξη, δημιουργώντας την περιοχή απογύμνωσης η οποία συμπεριφέρεται ως θάλαμος ιονισμού στερεάς κατάστασης.

Πλέον κατασκευάζονται κρύσταλλοι υπερκαθαρού γερμανίου (HpGe) με χαμηλότερη συγκέντρωση προσμίξεων(~10^{10} atoms/cm^3). Κατά συνέπεια το υλικό παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση, επιτρέποντας την κατασκευή ανιχνευτών μεγαλύτερου ενεργού όγκου και απόδοσης. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι:

- Υψηλός ατομικός αριθμός .
- Μικρή συγκέντρωση προσμίξεων (μεγάλος πάχος περιοχής απογύμνωσης).
- Μικρή απαιτούμενη ενέργεια ιοντίζουσας ακτινοβολίας για την δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής.
- Υψηλή αγωγιμότητα.
- Υψηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα.
- Εύκολη χρήση.

Γ. ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Γ.1 Υπολογιστική Μέθοδος

Γ.1.1 Κώδικας MCNP5

Ο MCNP είναι κώδικας Monte Carlo, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά νετρονίων, φωτονίων, ηλεκτρονίων καθώς και συνδυασμού των παραπάνω. Χρησιμοποιεί ένα αυθαίρετο τρισδιάστατο προσδιορισμό υλικών σε γεωμετρικά κελιά, τα οποία οριοθετούνται από πρώτου και δευτέρου βαθμού επιφάνειες, καθώς και από τετάρτου βαθμού ελλειπτικά τοροειδή. Η βάση των διατομών που χρησιμοποιεί είναι ανά σημείο (point-wise). Όσον αφορά τα νετρόνια χρησιμοποιεί ενεργειακό εύρος (energy regime) από 10^{-11} έως 20 MeV, ενώ για φωτόνια και ηλεκτρόνια από 1 KeV έως 1000 MeV.

Ο κώδικας MCNP χρησιμοποιεί ένα αρχείο «εισαγωγής» (input file) που δίνεται από τον χρήστη με τις απαραίτητες πληροφορίες για την έναρξη της προσομοίωσης. Οι πληροφορίες αυτές είναι η περιγραφή της γεωμετρίας του προβλήματος και των υλικών που χρησιμοποιούνται, η εκτίμηση των ενεργών διατομών, οι ιδιότητες και η θέση της πηγής των σωματιδίων (νετρόνια, φωτόνια, ηλεκτρόνια), ο τύπος των εικονικών ανιχνευτών, ο αριθμός των ιστοριών και ο απαιτούμενος χρόνος εκτέλεσης, ώστε μετά το πέρας ενός εξ αυτών το πρόγραμμα να τερματίζει. Μετά το πέρας της διαδικασίας ο χρήστης λαμβάνει ένα αρχείο εξόδου (output file) στο οποίο αναγράφονται όλα τα στοιχεία της χρησιμοποιούμενης γεωμετρίας και της πηγής των σωματιδίων, μαζί με τις ενεργές διατομές που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα από τους εικονικούς ανιχνευτές και τη στατιστική επεξεργασία αυτών των αποτελεσμάτων (X-5 Monte Carlo Team 2003).

Ο κώδικας χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ροής νετρονίων σε διάφορες θέσεις στο θάλαμο θεραπείας και κατά μήκος του λαβυρίνθου. Οι υπολογισμοί έγιναν σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο έγινε ο υπολογισμός της ροής και της ισοδύναμης δόσης H*(10) στον αέρα, στο θάλαμο θεραπείας και στο λαβύρινθο. Στο δεύτερο στάδιο υπολογίστηκε η απόκριση των ανιχνευτών ενεργοποίησης, οι οποίοι προσομοιώθηκαν σε θέσεις αντίστοιχες με εκείνες της πειραματικής διάταξης. Στο τελευταίο στάδιο έγινε εκτίμηση της ροής νετρονίων στη θύρα του θαλάμου.

Γ.1.2 Υπολογισμός της ροής και της ισοδύναμης δόσης H*(10) νετρονίων στο θάλαμο θεραπείας και κατά μήκος του λαβυρίνθου.

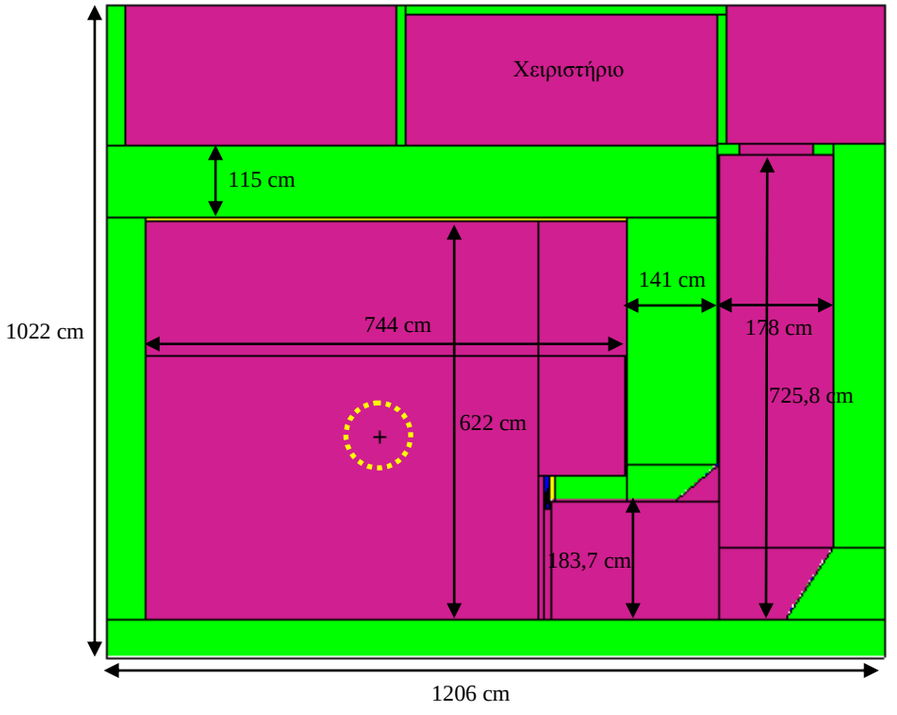
Γεωμετρία:

Έγινε προσομοίωση του θαλάμου θεραπείας (Σχήμα 13) του γραμμικού επιταχυντή της εταιρίας ELEKTA που είναι εγκατεστημένος στο νοσοκομείο 'Άγιος Σάββας'. Ο συγκεκριμένος γραμμικός επιταχυντής παρέχει ονομαστικές ενέργειες φωτονίων 6 και 18 MV.

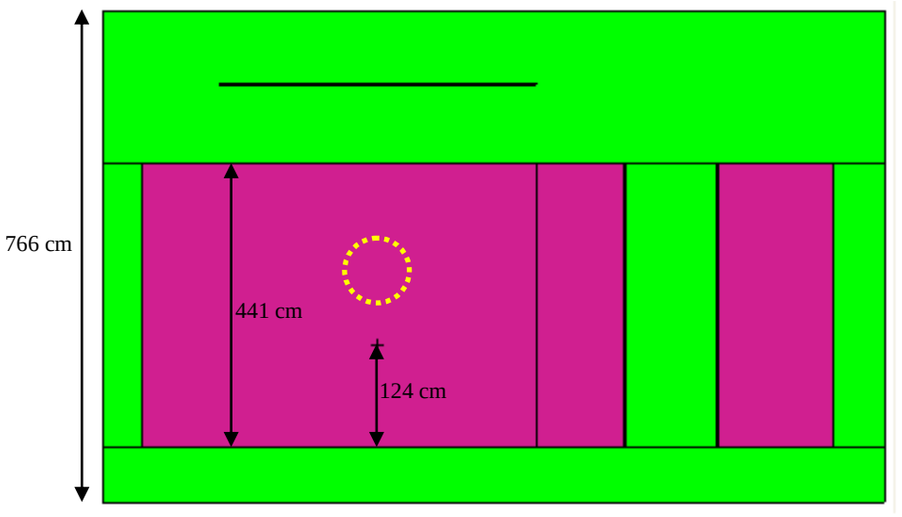
Η προσομοίωση της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικές γεωμετρίες. Στην πρώτη η κεφαλή προσομοιώθηκε ως μία σφαίρα από βολφράμιο, ακτίνας 10 cm (Carinou, et al. 1999). Το βολφράμιο αποτελεί το κύριο υλικό κατασκευής αρκετών μερών της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή, όπως είναι ο στόχος, οι κατευθυντήρες και το φίλτρο επιπέδωσης. Στη δεύτερη, η κεφαλή προσομοιώθηκε με ένα σφαιρικό φλοιό από βολφράμιο, εσωτερικής ακτίνας 10 cm και εξωτερικής ακτίνας 20 cm (Vega-Carrillo, et al. 2012). Το κέντρο της σφαίρας βολφραμίου και του σφαιρικού φλοιού προσομοιώθηκε στο ίδιο σημείο (0, 0, 100) cm, δηλαδή 100 cm πάνω από το ισόκεντρο.

Να τονιστεί ότι ως κέντρο αναφοράς για τον ορισμό των επιφανειών της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το ισόκεντρο του γραμμικού επιταχυντή και ότι η προσομοίωση της πόρτας παραλείφθηκε.

Στα Σχήματα 13 και 14 παρουσιάζεται η γεωμετρία του θαλάμου και του χειριστηρίου στα επίπεδα xy και xz, αντίστοιχα, μαζί με βασικές διαστάσεις τους.



Σχήμα 13. Γεωμετρία θαλάμου θεραπείας και χειριστηρίου στο επίπεδο xy.



Σχήμα 14. Γεωμετρία θαλάμου θεραπείας και χειριστηρίου στο επίπεδο xz.

Πηγή νετρονίων:

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η προσομοίωση της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικές γεωμετρίες. Στην πρώτη γεωμετρία η πηγή προσομοιώθηκε ως μια σφαιρική πηγή όγκου (cell source) που εκπέμπει νετρόνια ισοτροπικά από όλο τον όγκο της, ενώ στη δεύτερη προσομοιώθηκε ως ισοτροπική σημειακή πηγή νετρονίων στο κέντρο του σφαιρικού φλοιού.

Και στις δύο γεωμετρίες το φάσμα των εκπεμπόμενων φωτονετρονίων προσομοιώθηκε με βάση τη σχέση (9) (Tosi, et al. 1991):

$$n(E) = a\frac{E}{T^2}\exp\left(-\frac{E}{T}\right) + \beta\frac{\ln\left|\frac{E_{max}}{E+S_n}\right|}{\int_0^{E_{max}-S_n}\ln\left|\frac{E_{max}}{E+S_n}\right|dE} \quad (9)$$

Όπου:

n(E), το πλήθος των νετρονίων με ενέργεια μεταξύ E και E+dE.

α, το ποσοστό των νετρονίων προερχόμενων από εξάτμιση (evaporation neutrons).

T, η θερμοκρασία του πυρήνα-στόχου.

β, το ποσοστό των νετρονίων άμεσης απόσπασης (knock-on neutrons).

$\mathbf{E_{max}}$, η μέγιστη ενέργεια των επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων.

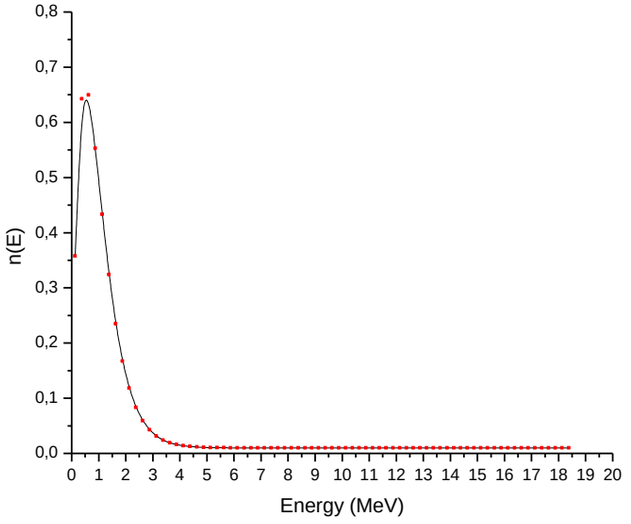
$\mathbf{S_n}$, η ενέργεια απόσπασης των νετρονίων στον πυρήνα-στόχο.

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 3 και αντιστοιχούν σε στόχο από βολφράμιο:

Πίνακας 3. Τιμές των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της σχέσης του Tosi, για την προσομοίωση του φάσματος των φωτονετρονίων που εκπέμπονται από την πηγή.

Μέγεθος	**Τιμή**
α	0,8929
β	0,1071
T	0,5 MeV
E_{max}	18 MeV
S_n	7,34 MeV

Στο Σχήμα 15 φαίνεται το φάσμα των φωτονετρονίων που χρησιμοποιήθηκε στις δύο εικονικές πηγές.



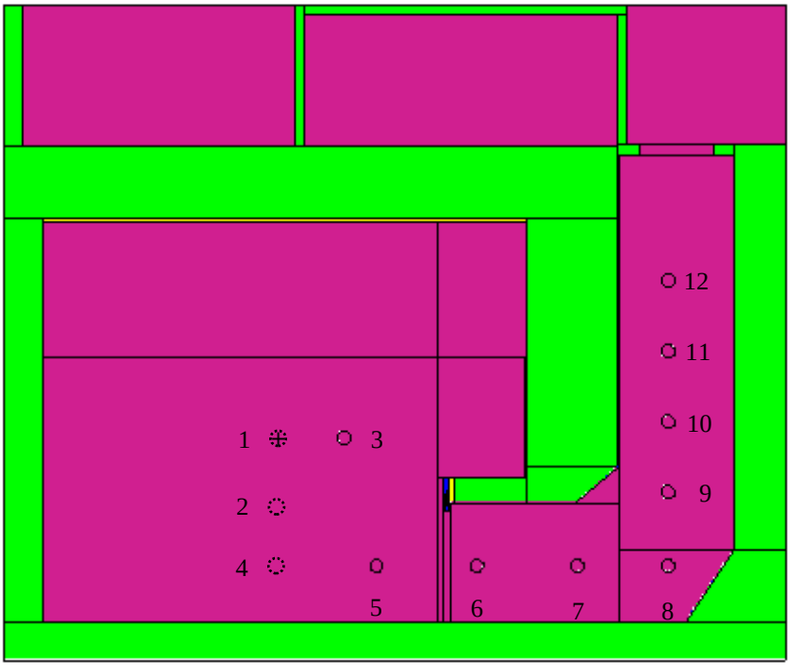
Σχήμα 15. Πλήθος φωτονετρονίων που εκπέμπονται συναρτήσει της ενέργειας, σύμφωνα με τη σχέση του Tosi.

Εικονικοί ανιχνευτές:

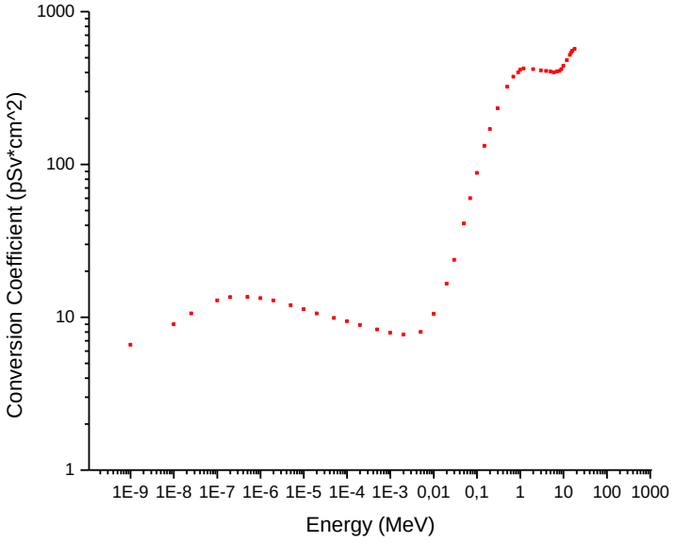
Για τον υπολογισμό της ροής και της ισοδύναμης δόσης H*(10) των νετρονίων προσομοιώθηκαν στο ισόκεντρο, σε διάφορες θέσεις στο θάλαμο θεραπείας καθώς και κατά μήκος του λαβυρίνθου εικονικοί ανιχνευτές, σφαιρικού σχήματος (ακτίνας 10 cm) από αέρα. Οι θέσεις των ανιχνευτών φαίνονται στο Σχήμα 16.

Οι εικονικοί ανιχνευτές (tallies) ήταν τύπου f4, δηλαδή υπολόγιζαν τη μέση ροή νετρονίων (cm^{-2}/νετρόνιο εκπεμπόμενο από την πηγή) στον όγκο του κελιού-ανιχνευτή, καθώς και τη ισοδύναμη δόση νετρονίων H*(10) (pSv/νετρόνιο εκπεμπόμενο από την πηγή). Ο υπολογισμός της ισοδύναμης δόσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση συντελεστών μετατροπής ροής νετρονίων σε ισοδύναμη δόση νετρονίων (ICRP 1996). Στο Σχήμα 17 φαίνεται η μεταβολή των συντελεστών μετατροπής συναρτήσει της ενέργειας των νετρονίων.

Οι υπολογισμοί της ροής και της ισοδύναμης δόσης των νετρονίων από τους εικονικούς ανιχνευτές έγιναν με τη χρήση κατάλληλης ενεργειακής διαμέρισης για τη βέλτιστη μελέτη αυτών των μεγεθών.



Σχήμα 16. Κάτοψη θαλάμου θεραπείας στο επίπεδο z=-24 cm, για προσδιορισμό της θέσης των εικονικών ανιχνευτών. Οι εικονικοί ανιχνευτές που σημειώνονται με διακεκομμένη γραμμή (1, 2 και 4) προσομοιώθηκαν σε ύψος 124 cm από το δάπεδο, ενώ οι υπόλοιποι σε ύψος 100 cm.



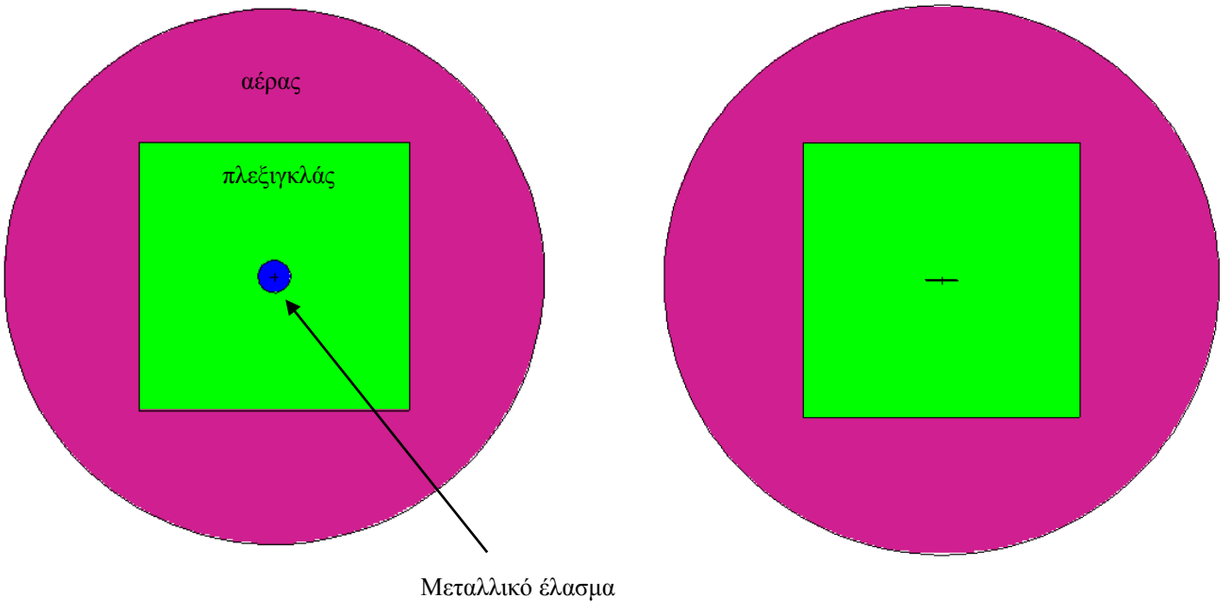
Σχήμα 17. Συντελεστές μετατροπής ροής νετρονίων σε ισοδύναμη δόση H*(10) νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας νετρονίων (ICRP 1996).

Γ.1.3 Απόκριση ανιχνευτών ενεργοποίησης.

Γεωμετρία:

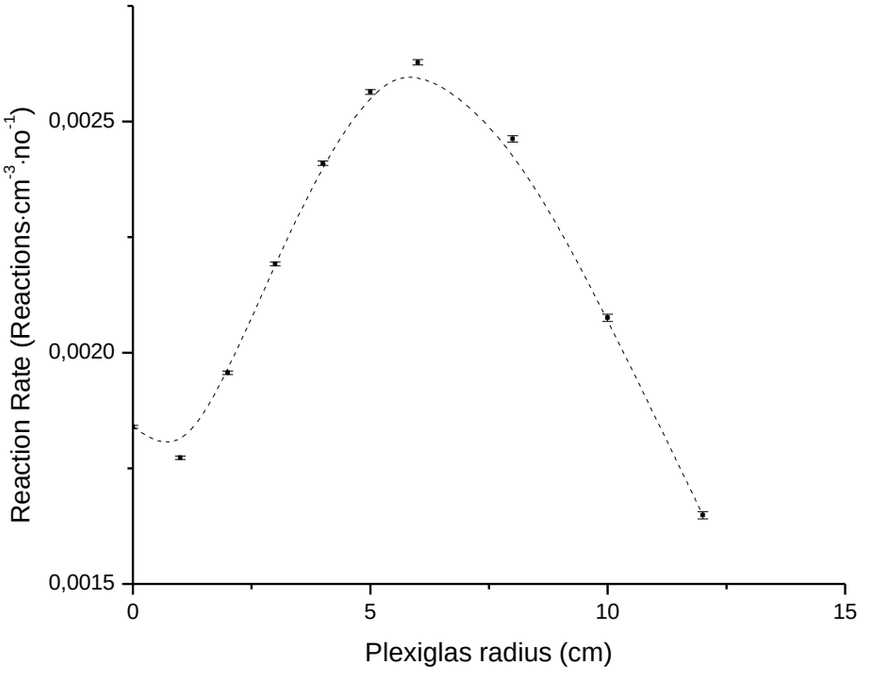
Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία. Συγκεκριμένα προσομοιώθηκαν κυλινδρικά μεταλλικά ελάσματα ενεργοποίησης από χρυσό ^{197}Au (12 προσομοιώσεις) και φυσικό ίνδιο In (12 προσομοιώσεις), με το κέντρο τους στο σημείο (0, 0, 0) cm της προσομοίωσης. Το μεταλλικό έλασμα από χρυσό προσομοιώθηκε ως κύλινδρος ακτίνας 0,6 cm και πάχους 0,0015 cm, ενώ του ινδίου προσομοιώθηκε ως κύλινδρος ακτίνας 0,575 cm και πάχους 0,042 cm. Το φυσικό ίνδιο αποτελείται από τα ισότοπα ^{113}In (4,29%) και ^{115}In (95,71%).

Επίσης έγινε προσομοίωση κύβου από πλεξιγκλάς (moderator), ακμής 10 cm με το κέντρο του στο σημείο (0, 0, 0) cm της προσομοίωσης και μιας σφαίρας από αέρα, ακτίνας 10 cm με το κέντρο της στο σημείο (0, 0, 0) cm. Η γεωμετρία της προσομοίωσης δίδεται στο Σχήμα 18.



Σχήμα 18. Γεωμετρία μοντέλου ανιχνευτή στο επίπεδο xy (αριστερά) και στο επίπεδο xz (δεξιά).

Η εκτίμηση του κατάλληλου πάχους του πλεξιγκλάς (επιβραδυντής) που θα περιβάλλει το έλασμα, πραγματοποιήθηκε μέσα από προσομοιώσεις με τον MCNP. Συγκεκριμένα έγιναν προσομοιώσεις στις οποίες το μεταλλικό έλασμα ενεργοποίησης περιβαλλόταν από σφαίρα πλεξιγκλάς. Μεταβάλλοντας την ακτίνα της σφαίρας υπολογιζόταν κάθε φορά η απόκριση του ελάσματος. Η μέγιστη απόκριση παρουσιαζόταν για ακτίνα σφαίρας περίπου ίση με 5 cm (Σχήμα 19).

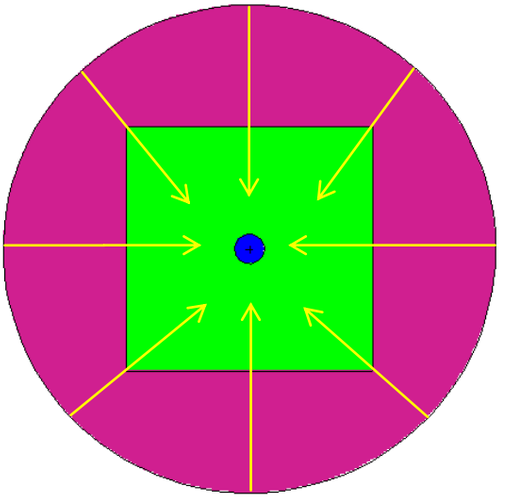


Σχήμα 19. Μεταβολή απόκρισης μεταλλικού ελάσματος ενεργοποίησης από ίνδιο, συναρτήσει του πάχους πλεξιγκλάς.

Με βάση τα αποτελέσματα που δίνονται στο Σχήμα 19, αποφασίστηκε στην παρούσα εργασία ο επιβραδυντής να έχει σχήμα κύβου ακμής 10 cm, με το μεταλλικό έλασμα τοποθετημένο στο κέντρο του.

Πηγή νετρονίων:

Σε αυτό το στάδιο προσομοιώθηκε πηγή νετρονίων κατανεμημένη σε επιφάνεια σφαίρας (ακτίνας 10 cm). Η πηγή είναι ομογενής και εκπέμπει προς το εσωτερικό της σφαίρας (Σχήμα 20). Το φάσμα των νετρονίων είναι το αποτέλεσμα της εκτίμησης της ροής των νετρονίων στην αντίστοιχη θέση του θαλάμου όπως υπολογίσθηκε στο πρώτο στάδιο της προσομοίωσης. Οι υπολογισμοί της ροής από το πρώτο στάδιο προσομοιώσεων για τις 12 διαφορετικές θέσεις εικονικών ανιχνευτών δίνονται στο Σχήμα 16.



Σχήμα 20. Αναπαράσταση του τρόπου που εκπέμπει η εικονική πηγή της προσομοίωσης.

Εικονικοί ανιχνευτές:

Τα μεταλλικά ελάσματα ενεργοποίησης προσομοιώθηκαν ως εικονικοί ανιχνευτές τύπου f4 (f4 tallies). Για κάθε μία από τις προσομοιώσεις υπολογίστηκε η ροή νετρονίων (cm^{-2}/νετρόνιο εκπεμπόμενο από την πηγή) καθώς και ο ρυθμός αντίδρασης (αντιδράσεις/cm^3/νετρόνιο εκπεμπόμενο από την πηγή). Οι προαναφερθείσες αντιδράσεις είναι οι εξής:

1. ^{197}Au (n, γ) ^{198}Au, για μεταλλικό έλασμα από χρυσό.
2. ^{115}In (n, γ) ^{116m}In, για μεταλλικό έλασμα από ίνδιο.

Από τους παραπάνω υπολογισμούς υπολογίστηκε η ενεργός διατομή σ_{eff} του κάθε ελάσματος, κάνοντας χρήση της παρακάτω σχέσης:

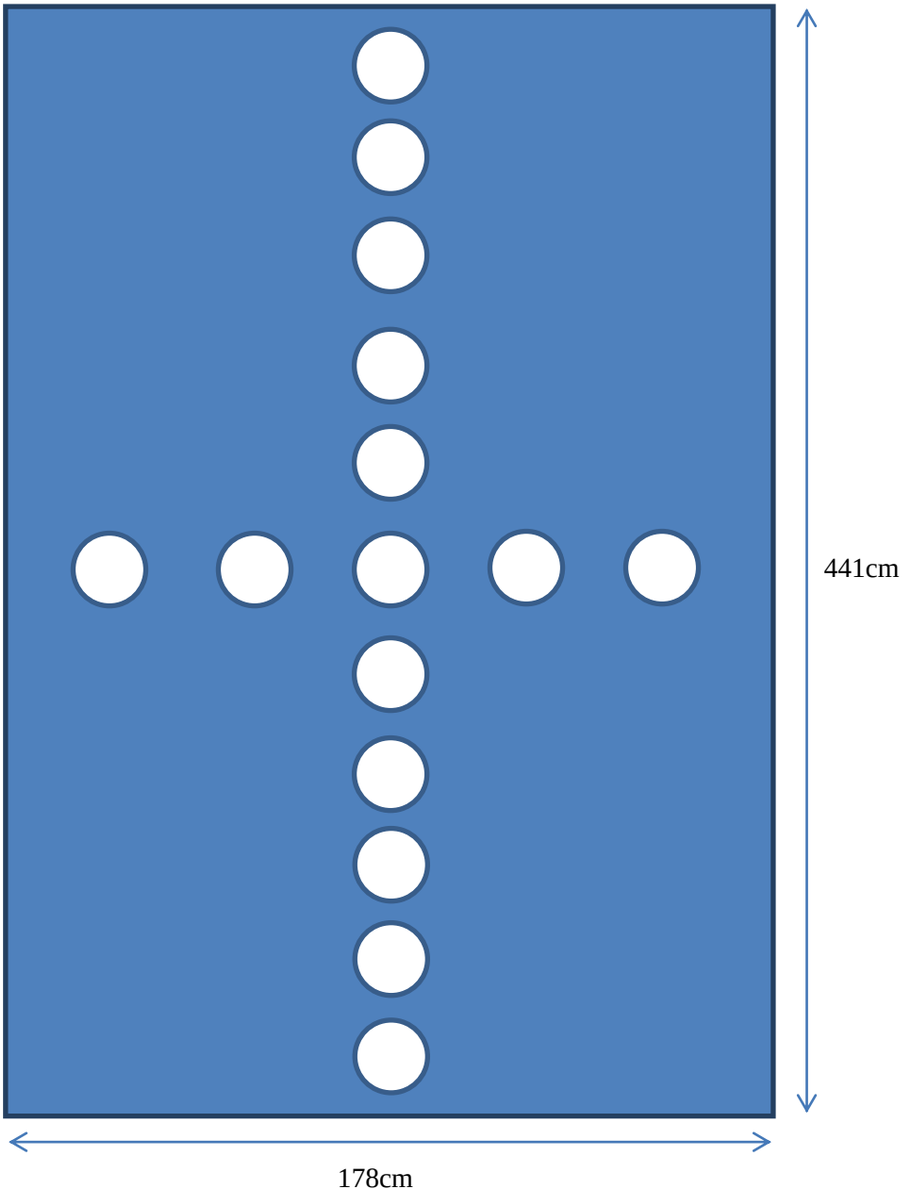
$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{\int_0^{\text{Emax}} \sigma(\text{E})\Phi(\text{E})\text{dE}}{\int_0^{\text{Emax}} \Phi(\text{E})\text{dE}} = \frac{\text{ρυθμός αντίδρασης (n, γ)}}{\text{ροή νετρονίων}} \cdot \text{όγκος ελάσματος ενεργοποίησης} \qquad (10)$$

Γ.1.4 Εκτίμηση της ροής νετρονίων στη θύρα του θαλάμου θεραπείας.

Μελετήθηκε η μεταβολή της ροής νετρονίων σε διάφορα σημεία στο γεωμετρικό επίπεδο της θύρας του θαλάμου.

Γεωμετρία:

Προσομοιώθηκε ένα πλέγμα ανιχνευτών από αέρα, σφαιρικού σχήματος και ακτίνας 15 cm στη θύρα του θαλάμου. Στο Σχήμα 21 φαίνεται η διατομή του λαβυρίνθου στο επίπεδο της θύρας και η προσομοίωση των σφαιρών στις διάφορες θέσεις.



Σχήμα 21. Θέση εικονικών ανιχνευτών στη διατομή του λαβυρίνθου κοντά στο επίπεδο της θύρας.

Πηγή νετρονίων:

Η πηγή νετρονίων προσομοιώθηκε σύμφωνα με τη μελέτη των (Carinou, et al. 1999). Λεπτομερής αναφορά έχει γίνει στο Κεφάλαιο Γ.1.2.

Εικονικοί ανιχνευτές:

Προσομοιώθηκαν εικονικοί ανιχνευτές (τύπου f4), οι οποίοι υπολόγιζαν τη μέση ροή νετρονίων (cm^{-2}/νετρόνιο εκπεμπόμενο από την πηγή) στον όγκο των σφαιρών από αέρα του Σχήματος 21.

Γ.1.5 Υλικά.

Κύριο υλικό θωράκισης και κατασκευής των τοίχων είναι το σκυρόδεμα (NBS Ordinary concrete). Επιπλέον υλικά θωράκισης που προσομοιώθηκαν είναι το ξύλο (wood) και το ατσάλι (steel carbon), τα οποία βρίσκονται ως φύλλα στις μεσοτοιχίες. Τέλος στο ταβάνι του θαλάμου θεραπείας υπάρχει ένα φύλλο μολύβδου, περιβαλλόμενο από σκυρόδεμα. Τα φύλλα ξύλου έχουν πάχος 1cm, του ατσαλιού 5 cm και τέλος του μολύβδου 1,5 cm. Στο εσωτερικό του θαλάμου θεωρήθηκε αέρας. Τα υλικά που προσομοιώθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 μαζί με τις πυκνότητές τους. Οι ακριβείς συστάσεις τους δίνονται στο Παράρτημα Α.

Πίνακας 4. Υλικά προσομοιώσεων.

Υλικό	**Πυκνότητα (g/cm^3)**
NBS Ordinary Concrete	2,35
Ξύλο (Wood)	0,25
Ατσάλι-Σίδηρος (Steel Carbon)	7,82
Μόλυβδος (Lead)	11,2
Αέρας (Air)	0,0013
Πλεξιγκλάς (Plexiglas)	1.18
Χρυσός (Au)	19.32
Ίνδιο (In)	7.28

Γ.1.6 Βιβλιοθήκες διατομών.

Ο MCNP5 χρησιμοποιήθηκε στο $1^{ο}$ στάδιο των προσομοιώσεων για τον υπολογισμό της ροής και της ισοδύναμης δόσης νετρονίων κάνοντας χρήση των διατομών της βιβλιοθήκης ENDF/B-VI. Στο $2^{ο}$ στάδιο των προσομοιώσεων υπολογίστηκε η ροή και ο ρυθμός αντίδρασης (reaction rate) σε κάθε έλασμα ενεργοποίησης. Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιήθηκαν διατομές από τη βιβλιοθήκη IRDFF v.1.05 (International Reactor Dosimetry and Fusion File). Η βιβλιοθήκη IRDFF v.1.05 είναι η κατάλληλη για τον υπολογισμό του ρυθμού αντίδρασης (reaction rate), καθώς παρέχει πιο ολοκληρωμένες δοσιμετρικές διατομές σε σύγκριση με την ENDF/B-VI (Capote, et al. 2012).

Γ.1.7 Στατιστικοί έλεγχοι.

Ο κώδικας MCNP ελέγχει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των υπολογισμών μέσω δέκα στατιστικών ελέγχων. Οι στατιστικοί έλεγχοι και οι τιμές αναφοράς φαίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Στατιστικοί έλεγχοι εικονικού ανιχνευτή (tally) τύπου f4 (track length estimate tally) και οι τιμές αναφοράς.

Tfc bin behav-ior	**Mean behavior**	**Relative error**			**Variance of the variance**			**Figure of merit**		**Pdf**
		value	decrease	decrease rate	value	decrease	decrease rate	value	behavior	slope
desired	random	<0,1	yes	1/sqrt(nps	<0,10	yes	1/nps	constant	random	>3

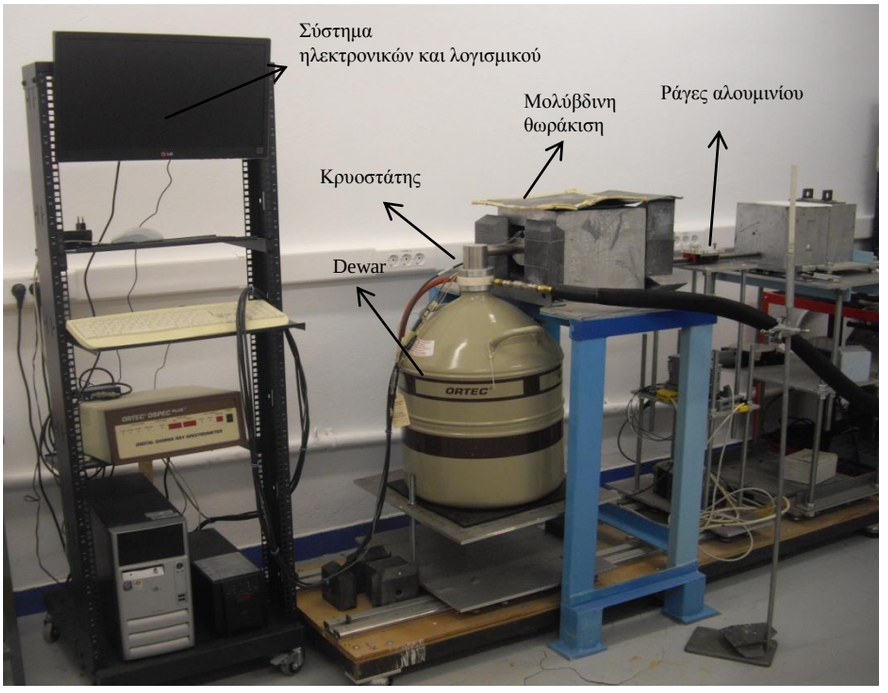
Γ.2 Πειραματική Μέθοδος

Γ.2.1 Βαθμονόμηση ανιχνευτή HpGe

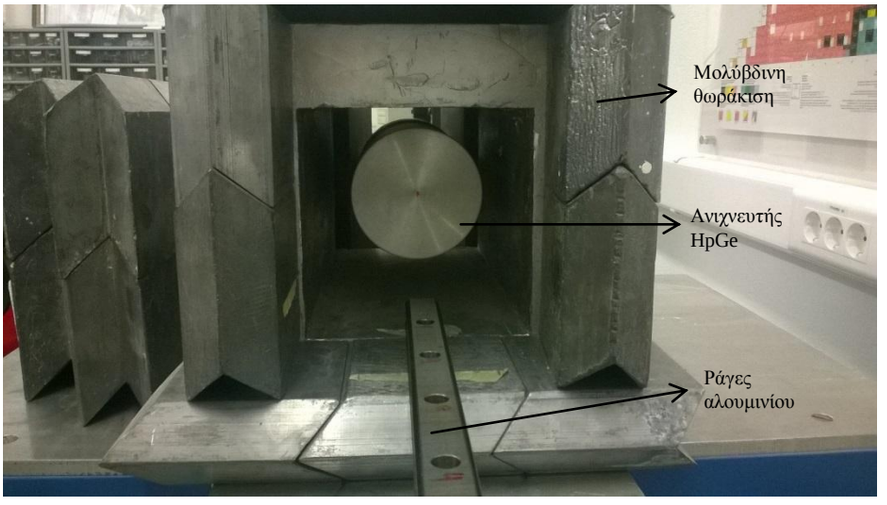
Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία, απεικονίζεται στο Σχήμα 22 και περιλαμβάνει έναν ομοαξονικό ημιαγωγό ανιχνευτή Γερμανίου τύπου p υψηλής καθαρότητας (High Purity Germanium - HpGe), ένα δειγματοφορέα κατάλληλο για την τοποθέτηση δειγμάτων πάνω σε ράγες αλουμινίου, οι οποίες επιτρέπουν την οριζόντια κίνηση του δείγματος και τη μεταβολή της σχετικής απόστασης του με τον ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής περιβάλλεται από μολύβδινη θωράκιση πάχους 5 cm (Σχήμα 23). Ο ανιχνευτής Γερμανίου είναι τύπου GEM 80, κατασκευασμένος από την εταιρεία EG&G ORTEC. Η ονομαστική διάμετρος του κρυστάλλου Γερμανίου είναι 81.5 mm και το μήκος του 57.5 mm. Η σχετική απόδοση του ανιχνευτή, όπως αυτή προσδιορίζεται σε σχέση με την απόδοση ανίχνευσης ακτίνων-γ ενός ανιχνευτή ιωδιούχου νατρίου (NaI (Tl)) μεγέθους 3’x 3’, είναι ίση με 85 %. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, η οποία ορίζεται ως το εύρος μιας κορυφής αναφοράς στο ήμισυ του ύψους της (Full Width at Half Maximum-FWHM), είναι ίση με 1.66 keV για την φωτοκορυφή 1333 keV του ^{60}Co ενώ ο λόγος φωτοκορυφής προς Compton (peak to Compton ratio) είναι ίσος με 89:1. Η ανιχνευτική διάταξη συμπληρώνεται με ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα ηλεκτρονικών και λογισμικού, που περιλαμβάνει ηλεκτρονική διάταξη ενίσχυσης και ψηφιοποίησης του σήματος του ανιχνευτή, αναλογικό φίλτρο (profilter), αναλυτή ύψους παλμών (multi-channel analyzer) καθώς και μια ηλεκτρονική μονάδα διόρθωσης των απωλειών λόγω νεκρού χρόνου (loss free counting mode). Η συλλογή και ανάλυση του φάσματος των ακτίνων-γ πραγματοποιείται με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού φασματοσκοπίας Gamma Vision (της εταιρείας EG&G ORTEC - USA). Στον Πίνακα 6 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή.

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά ανιχνευτή HpGe.

Ανιχνευτής	Γερμάνιο-HpGe
Τύπος	GEM 80
Σχετική απόδοση	85%
FWHM	1.66keV
Peak to Compton ratio	89:1
Μήκος Κρυστάλλου	57,5mm
Διάμετρος Κρυστάλλου	81,5mm



Σχήμα 22. Διάταξη γ-φασματοσκοπίας.



Σχήμα 23. Ανιχνευτής HpGe (τύπου GEM 80).

Η βαθμονόμηση ενέργειας και απόδοσης, πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση πρότυπων ραδιενεργών πηγών. Στον Πίνακα 7 φαίνονται οι ενεργότητες που είχαν οι πρότυπες πηγές την ημέρα της βαθμονόμησης.

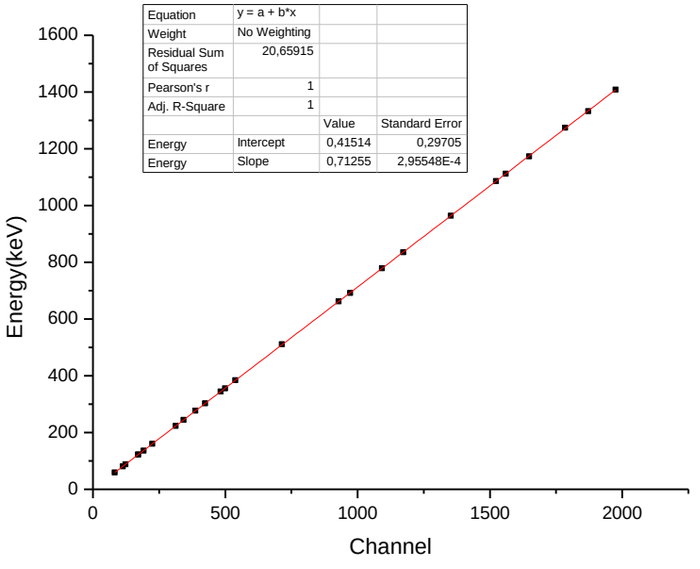
Πίνακας 7. Ενεργότητες πρότυπων ραδιενεργών πηγών.

Ραδιοϊσότοπο	**Ενεργότητα (kBq)**
^{133}Ba($T_{1/2}$=10,58y)	31,3±0,94
^{57}Co ($T_{1/2}$=0,745y)	4,54±0,14
^{109}Cd ($T_{1/2}$=1.267y)	10,44±0,32
^{137}Cs ($T_{1/2}$=30.17y)	36,18±1,08
^{54}Mn ($T_{1/2}$=0.855y)	5,83±0,18
^{60}Co ($T_{1/2}$=5.272y)	24,7±0,77
^{152}Eu($T_{1/2}$=13.515y)	3,55±0,13
^{22}Na($T_{1/2}$=2.605y)	2,04±0,63
^{241}Am($T_{1/2}$=432.7y)	338,85±11,68

Ενεργειακή Βαθμονόμηση:

Οι πρότυπες ραδιενεργές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την ενεργειακή βαθμονόμηση καλύπτουν ένα ενεργειακό φάσμα από 59,5 keV (^{241}Am) έως και 1408 keV (^{152}Eu). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 24, υπάρχει γραμμική εξάρτηση της ενέργειας συναρτήσει του καναλιού του ανιχνευτή HpGe. Η γραμμική αυτή εξάρτηση εκφράζεται μέσω της εξίσωσης:

$$E = 0{,}41514 + 0{,}71255 \cdot Ch \tag{11}$$



Σχήμα 24. Ενεργειακή βαθμονόμηση ανιχνευτή HpGe.

Βαθμονόμηση απόδοσης:

Η απόδοση της φωτοκορυφής (Full Energy Peak Efficiency-FEPE) είναι μια παράμετρος πρωτεύουσας σημασίας για τη γ-φασματοσκοπία και συμβολίζεται ως ε. Καθορίζει το ποσοστό των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας εκπεμπόμενων από μία πηγή, το οποίο συνεισφέρει στην αντίστοιχη φωτοκορυφή παρατηρούμενη στο φάσμα. Η απόδοση δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\text{CPS}}{\text{gammas/s}} \tag{12}$$

Όπου:

CPS, ο καθαρός αριθμός κρούσεων της φωτοκορυφής ως προς τον ενεργό χρόνο (live time) μέτρησης του ανιχνευτή.

$\frac{\textbf{gammas}}{\textbf{s}}$, ο αριθμός φωτονίων που εκπέμπει η πηγή ανά μονάδα χρόνου (s).

Η σχετική αβεβαιότητα της απόδοσης προκύπτει από την εξής σχέση:

$$\sigma_\varepsilon{}^2 = \sigma_{\text{Net}}{}^2 + \sigma_{\text{A}}{}^2 \tag{13}$$

Όπου:

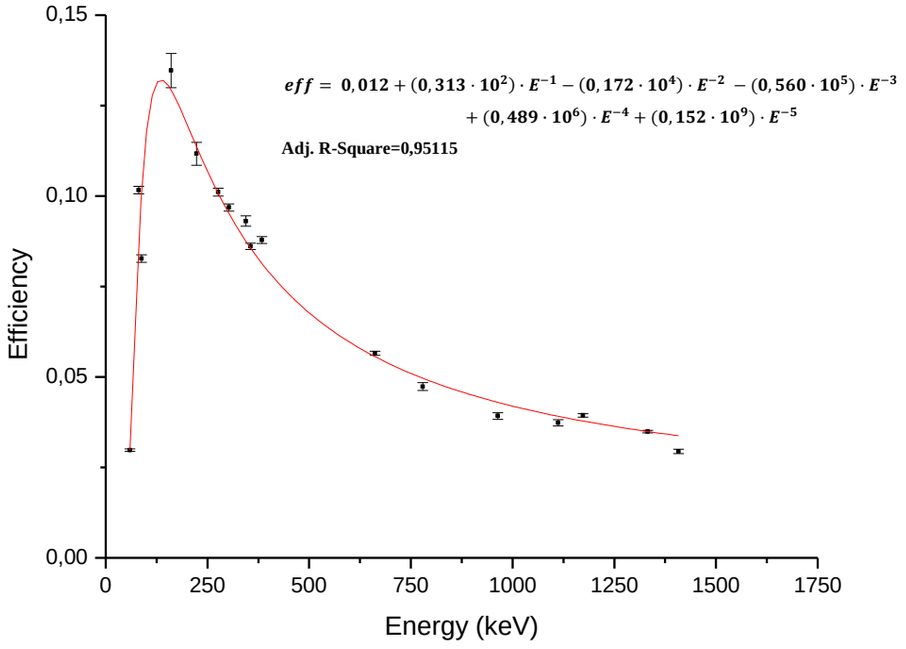
$\boldsymbol{\sigma_{\text{Net}}}$, η σχετική αβεβαιότητα του καθαρού αριθμού κρούσεων της φωτοκορυφής.

$\boldsymbol{\sigma_{\text{A}}}$, η σχετική αβεβαιότητα της ενεργότητας της πηγής.

Η τιμή της απόδοσης εξαρτάται από τη γεωμετρία της πηγής (υλικό, πυκνότητα, διαστάσεις, σχήμα), καθώς και από την απόσταση της από τον ανιχνευτή. Για τους ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στη γ-φασματοσκοπία, η απόδοση μεταβάλλεται σημαντικά συναρτήσει των παραπάνω παραμέτρων.

Στο Παράρτημα Δ παρατίθεται η καμπύλη της απόδοσης του ανιχνευτή για πέντε διαφορετικές αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή (1cm, 6cm, 12cm, 18cm, 24cm).

Στην πειραματική διαδικασία η μέτρηση των ελασμάτων ενεργοποίησης, πραγματοποιήθηκε ορίζοντας ως απόσταση ελάσματος και ανιχνευτή το 1 cm. Στο Σχήμα 25 φαίνεται η καμπύλη απόδοσης του ανιχνευτή για απόσταση πηγής-ανιχνευτή στο 1 cm.



Σχήμα 25. Καμπύλη απόδοσης ανιχνευτή HpGe, για απόσταση πηγής-ανιχνευτή 1 cm.

Ένα φαινόμενο που επηρέασε τις μετρούμενες κρούσεις στον ανιχνευτή HpGe λόγω των διασπάσεων των πρότυπων ραδιενεργών πηγών και για το οποίο χρειάστηκε να γίνουν διορθώσεις στην καμπύλη απόδοσης, είναι το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence). Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης περιγράφεται ως η ταυτόχρονη ανίχνευση από το ανιχνευτικό σύστημα, δύο ή και περισσότερων φωτονίων που εκπέμπονται διαδοχικά από τον ίδιο κλάδο του διαγράμματος διάσπασης ενός πυρήνα ραδιενεργού ισοτόπου. Η ύπαρξη των αθροιστικών φωτονίων οφείλεται στην αντικειμενική αδυναμία της ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιείται, να παρακολουθήσει ορθά την εξέλιξη του φαινομένου και να αντιληφθεί τα δύο ή και περισσότερα φωτόνια ως μεμονωμένα και όχι ως ένα.

Ως εκ τούτου σύμφωνα με τα παραπάνω κρίθηκε απαραίτητη η διόρθωση της καμπύλης απόδοσης του ανιχνευτή με συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, οι οποίοι υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος «TrueCoinc». (συνολικά πραγματοποιήθηκαν τέσσερις διορθώσεις). Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι παραπάνω υπολογισμοί (κ. Σάββα Μαρίλια-προσωπική επικοινωνία). Στο Παράρτημα Ε αναλύεται λεπτομερέστερα το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης.

Πίνακας 8 . Συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης.

Ραδιοϊσότοπο	Ενέργεια (keV)	TCC
^{133}Ba	81	0,798
	160,6	0,878
	223,1	0,913
	276,4	0,915
	302,9	0,958
	356	0,965
	383,9	1,076
^{57}Co	122,1	1,000
	136,5	1,000
	692	1,018
^{109}Cd	88	1,000
^{137}Cs	661,6	1,000
^{54}Mn	834,8	1,000
^{60}Co	1173,2	0,748
	1332,5	0,757
^{152}Eu	121,8	0,746
	244,7	0,725
	344,3	0,836
	778,9	0,805
	964,1	0,893
	1085,9	1,064
	1112,1	0,942
	1408	0,930
^{22}Na	1274,5	0,614
^{241}Am	59,5	1,000

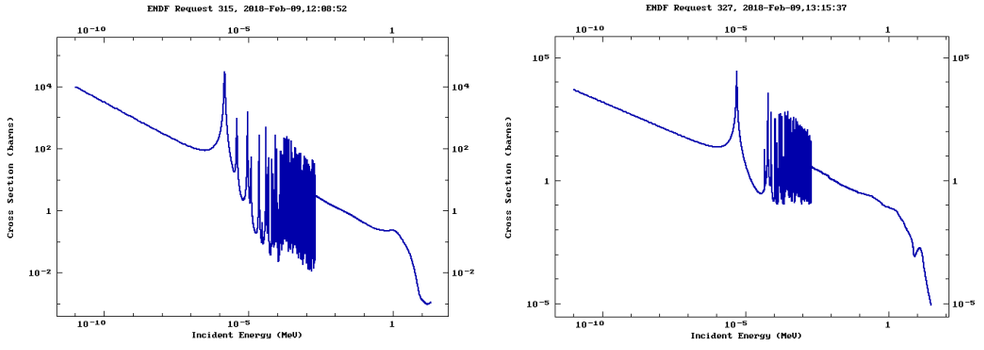
Γ.2.2 Μεταλλικά ελάσματα ενεργοποίησης (Activation Foils).

Τα μεταλλικά ελάσματα ενεργοποίησης αποτελούν παθητικοί ανιχνευτές νετρονίων οι οποίοι βασίζονται στη νετρονική ενεργοποίηση. Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκαν ελάσματα από φυσικό ίνδιο (In) και χρυσό (Au). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 24 ελάσματα, 12 από το κάθε υλικό. Στον Πίνακα 9 φαίνονται οι μάζες και η αρίθμηση του καθενός.

Κάθε υλικό εμφανίζει διαφορετική απόκριση κατά την αλληλεπίδρασή του με ροή νετρονίων. Στο σχήμα 26 παρουσιάζεται η ενεργός διατομή των δύο αυτών υλικών για την αντίδραση (n, γ).

Πίνακας 9. Μάζες και αρίθμηση των ελασμάτων ενεργοποίησης.

Υλικό	Αρίθμηση	(Μάζα±0,0001) (gr)
^{197}Au	17	0,02515
	16	0,0274
	29	0,0282
	20	0,0284
	19	0,02895
	26	0,0291
	30	0,0292
	21	0,0292
	27	0,0293
	28	0,0294
	1	0,0363
	32	0,0368
In	18	0,2784
	13	0,2938
	11	0,3111
	12	0,3167
	2	0,3407
	17	0,3597
	3	0,36565
	6	0,3698
	4	0,3794
	10	0,3811
	8	0,3836
	7	0,38435

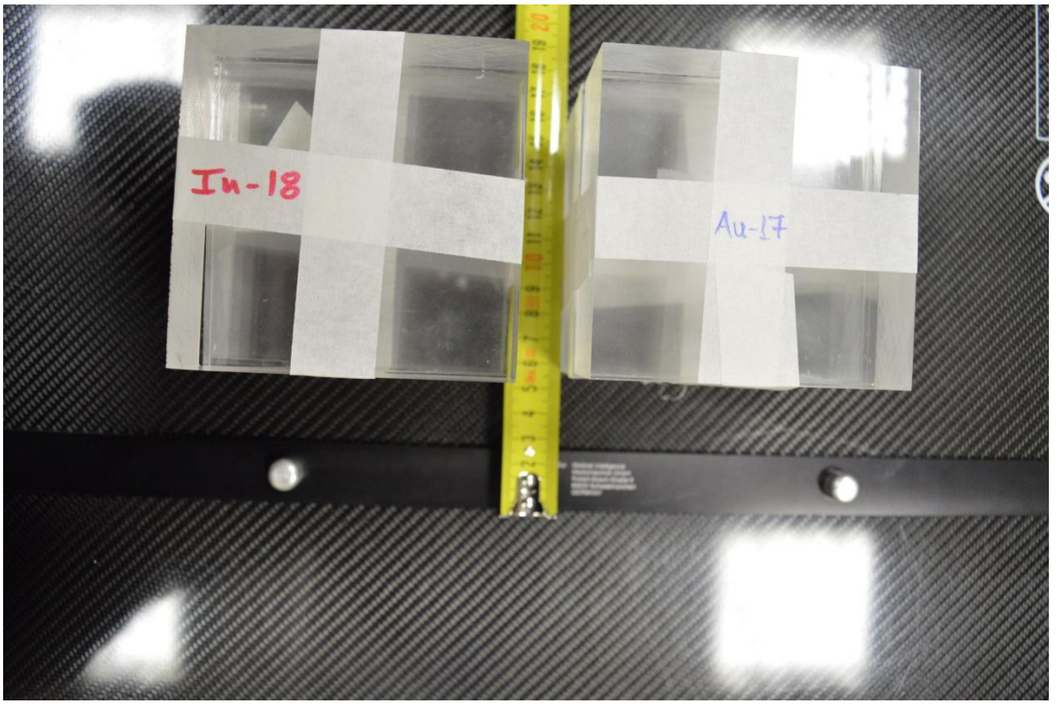


Σχήμα 26. Ενεργός διατομή του In (αριστερά) και του Au (δεξιά) για την αντίδραση (n, γ) συναρτήσει της ενέργειας του προσπίπτοντος νετρονίου (IAEA, National Nuclear Data Center n.d.).

Γ.2.3 Επιβραδυντές-Moderators.

Το πλεξιγκλάς ($C_5H_8O_2$) είναι υλικό πλούσιο σε υδρογόνο με πυκνότητα ίση με 1,18 gr/cm^3. Όταν αλληλεπιδράσουν νετρόνια με ένα τέτοιο υλικό, υπόκεινται σε ελαστικές σκεδάσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επιβρά-

δυνση τους. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν κύβοι από πλεξιγκλάς (10×10×10) cm^3, στο κέντρο των οποίων τοποθετήθηκαν τα ελάσματα ενεργοποίησης (Σχήμα 27).



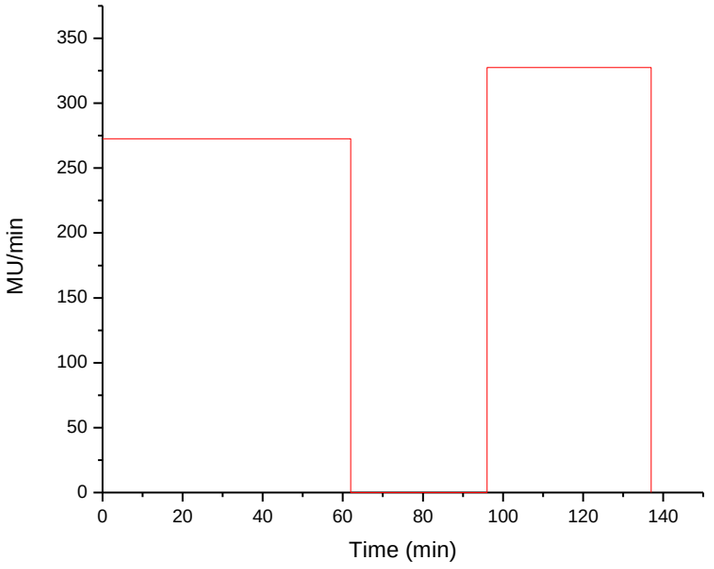
Σχήμα 27. Οι κύβοι από πλεξιγκλάς στο κέντρο των οποίων τοποθετήθηκαν τα ελάσματα ενεργοποίησης.

Στόχος μας ήταν η επιβράδυνση των νετρονίων που φτάνουν στο έλασμα, ώστε να έχουμε υψηλότερη διατομή σύλληψης νετρονίων.

Γ.2.4 Ακτινοβόληση

Η τοποθέτηση των ελασμάτων ενεργοποίησης έγινε με αύξουσα μάζα, καθώς απομακρυνόμαστε από το ισόκεντρο. Σε κάθε θέση τοποθετήθηκε ένα έλασμα ^{197}Au και ένα In σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Οι ανιχνευτές τοποθετήθηκαν πάνω σε λεπτούς σωλήνες από PVC, έτσι ώστε να βρίσκονται σε ύψος 100 cm από το δάπεδο (Σχήματα 29, 30). Έξι από τα ελάσματα ενεργοποίησης τοποθετήθηκαν στη θεραπευτική κλίνη (Σχήμα 31).

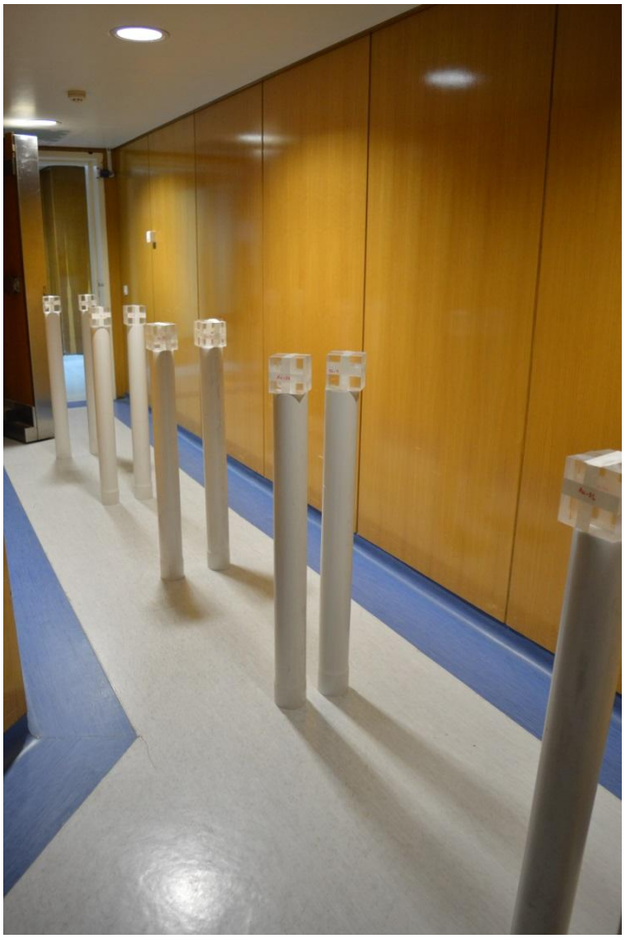
Η ακτινοβόληση πραγματοποιήθηκε από το γραμμικό επιταχυντή ELEKTA SYNERGY 1, που βρίσκεται στο νοσοκομείο ‘Άγιος Σάββας’, στις 14 Δεκεμβρίου 2017. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν ως ενέργεια φωτονίων τα 18 MV, με τα διαφράγματα (jaws) της κεφαλής να είναι κλειστά ώστε να έχουμε τη μέγιστη παραγωγή φωτονετρονίων στο θάλαμο θεραπείας και λαβύρινθο. Η ακτινοβόληση έγινε σε δύο μέρη, με ρυθμούς MU που φαίνονται στο Σχήμα 28.



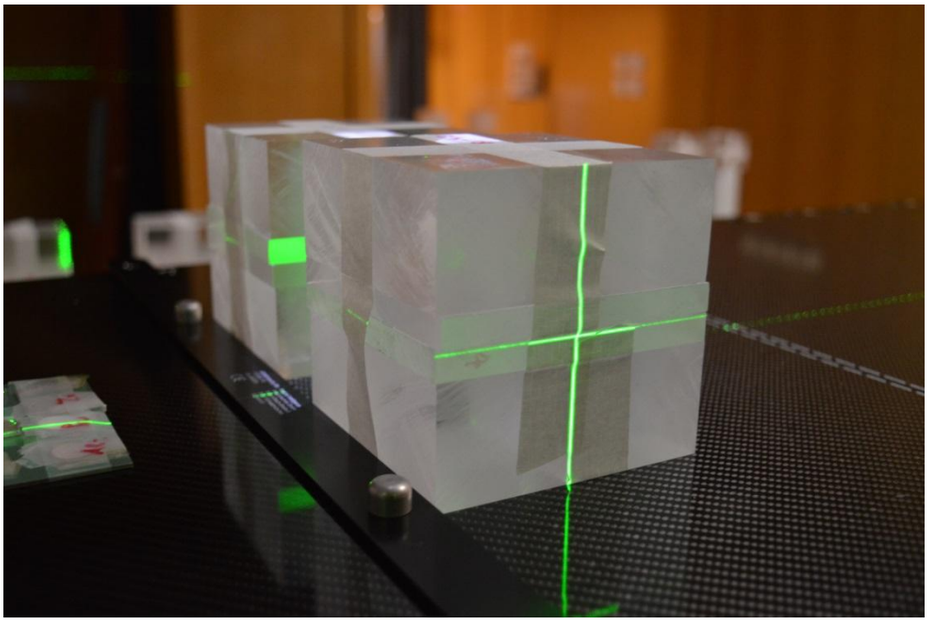
Σχήμα 28. Χρονικό διάγραμμα ακτινοβόλησης ως προς το ρυθμό των MU.



Σχήμα 29. Τοποθέτηση των ελασμάτων ενεργοποίησης στο θάλαμο θεραπείας.



Σχήμα 30. Τοποθέτηση ελασμάτων ενεργοποίησης στο λαβύρινθο του θαλάμου θεραπείας.



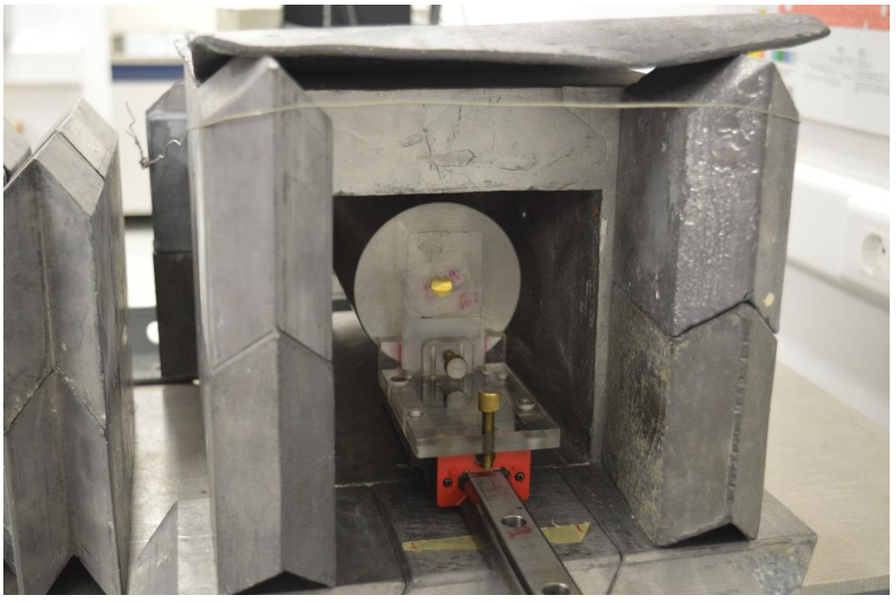
Σχήμα 31. Τοποθέτηση των ελασμάτων ενεργοποίησης μαζί με τον επιβραδυντή (πλεξιγκλάς), στο ισόκεντρο του γραμμικού επιταχυντή.

Γ.2.5 Μέτρηση των ελασμάτων ενεργοποίησης στον ανιχνευτή HpGe.

Το προϊόν της νετρονικής ενεργοποίησης του ελάσματος από ^{197}Au είναι διεγερμένοι πυρήνες ^{198}Au, ενώ του ελάσματος από In είναι διεγερμένοι πυρήνες ^{116m}In. Στον Πίνακα 10 φαίνονται βασικά πυρηνικά χαρακτηριστικά των νουκλιδίων. Η διάσπαση των ραδιενεργών αυτών πυρήνων συνοδεύεται από εκπομπή ακτίνων γάμμα συγκεκριμένης ενέργειας για το κάθε ραδιοϊσότοπο. Αυτές οι ακτίνες γάμμα ανιχνεύτηκαν από τον ανιχνευτή HpGe (Σχήμα 32). Ο χρόνος μέτρησης (t_c) κάθε ελάσματος ήταν διαφορετικός, καθώς στόχος ήταν σε κάθε μέτρηση-φάσμα συλλέξουμε ικανό αριθμό καθαρών κρούσεων με σχετική αβεβαιότητα μικρότερη από 10%.

Πίνακας 10. Πυρηνικά χαρακτηριστικά χρυσού και ινδίου.

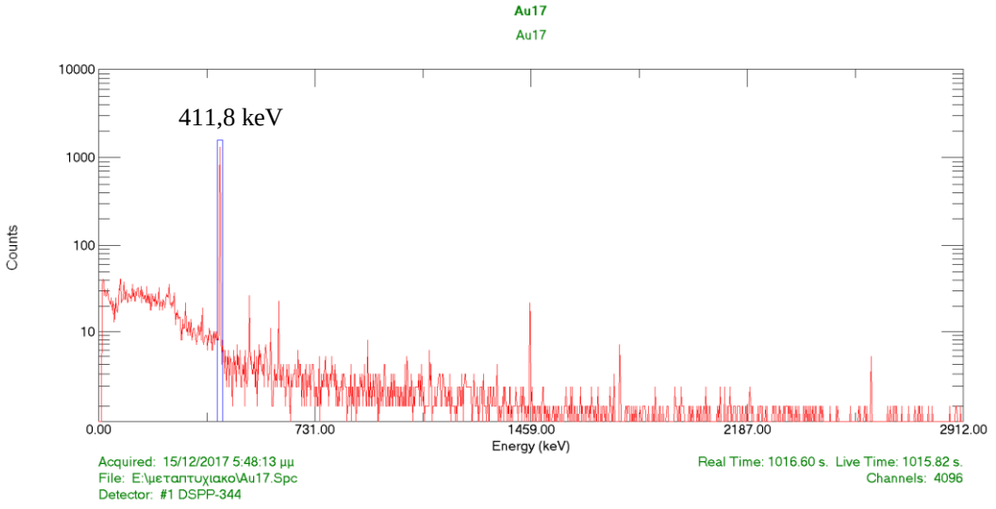
Στοιχείο	**Αντίδραση ενεργοποίησης**	**Ενέργεια (keV)**	**Iγ (gammas/decay)**	**$T_{1/2}$ (s)**	**σ$T_{1/2}$**
^{197}Au	^{197}Au (n, γ)^{198}Au	411,8	0,955	232416	0,0001
In	^{115}In (n, γ)^{116m}In	416,9 818,7 1097,3 1293,5	0,292 0,115 0,562 0,844	3240	0,0002



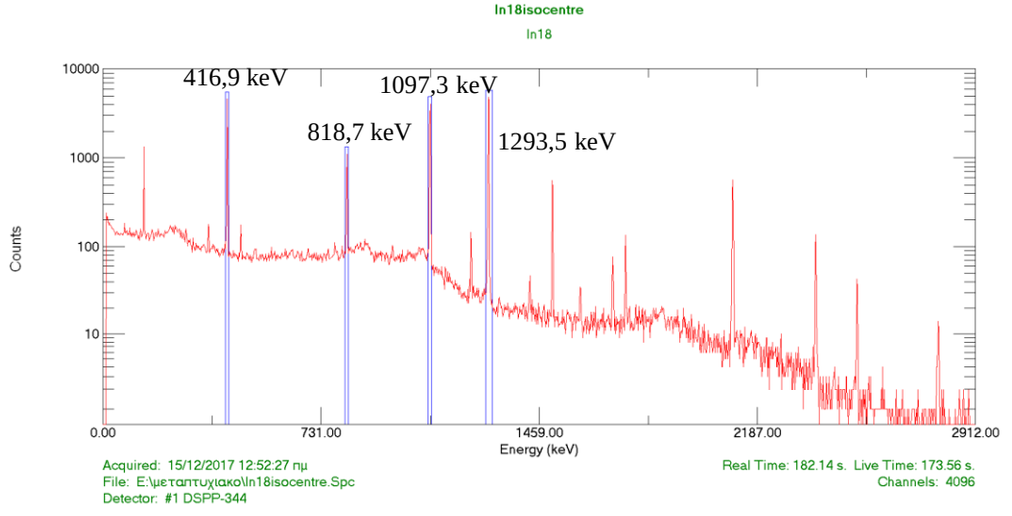
Σχήμα 32. Μέτρηση ελάσματος ενεργοποίησης στον ανιχνευτή HpGe.

Γ.2.6 Φασματοσκοπική ανάλυση

Η ανάλυση του φάσματος για το κάθε έλασμα πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα Gamma Vision™ (edition 32). Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το κάθε φάσμα ήταν ο χρόνος μέτρησης (t_c), ο αριθμός των καθαρών κρούσεων για κάθε φωτοκορυφή (Net) καθώς και η απόλυτη αβεβαιότητα του. Δύο τυπικά φάσματα που ελήφθησαν κατά την ανάλυση δίνονται στα Σχήματα 33 και 34. Στα σχήματα φαίνονται οι περιοχές ενδιαφέροντος (Region of Interest) που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των φασμάτων για τον υπολογισμό των καθαρών κρούσεων κάθε φωτοκορυφής ενδιαφέροντος. Συγκεκριμένα, αντιστοιχούν σε φάσμα ενός ελάσματος από χρυσό και ενός από ίνδιο, τα οποία κατά την ακτινοβόληση ήταν τοποθετημένα στο ισόκεντρο του γραμμικού επιταχυντή.



Σχήμα 33. Φάσμα ελάσματος ενεργοποίησης από ^{197}Au στο ισόκεντρο του γραμμικού επιταχυντή.



Σχήμα 34. Φάσμα ελάσματος ενεργοποίησης από In στο ισόκεντρο του γραμμικού επιταχυντή.

Γ.2.7 Υπολογισμός ροής νετρονίων.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού της ροής νετρονίων (cm^{-2}/sec) για κάθε μεταλλικό έλασμα ενεργοποίησης, χρησιμοποιήθηκε η εξής σχέση:

$$\Phi = \frac{1}{\sigma_{eff}} \cdot \frac{Net}{\varepsilon_\gamma \cdot I_\gamma \cdot G_\gamma \cdot f_{TCC}} \cdot \frac{\lambda}{(1 - e^{-\lambda \cdot t_c})} \cdot \frac{1}{[(1 - e^{-\lambda \cdot t_{irr1}}) \cdot e^{-\lambda \cdot (t_{d1} + t_{irr2} + t_{d2})} + (1 - e^{-\lambda \cdot t_{irr2}}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_{d2}}]} \quad (14)$$

Όπου:

σ_{eff}, η ενεργός διατομή για την αντίδραση της νετρονικής ενεργοποίησης για το κάθε ραδιονουκλίδιο, σε cm^2.

Net, ο αριθμός καθαρών κρούσεων, κατά τη διάρκεια της μέτρησης, της φωτοκορυφής που αντιστοιχεί στην εκπομπή γάμμα ακτινοβολίας, ενέργειας χαρακτηριστικής της αντίδρασης ενδιαφέροντος.

ε_γ, η απόδοση (Full Energy Peak) του ανιχνευτή HpGe για την ενέργεια γάμμα ακτινοβολίας ενδιαφέροντος.

I_γ, ο αριθμός των γάμμα που εκπέμπονται ανά διάσπαση του παραγόμενου ραδιονουκλιδίου.

G_γ, ο συντελεστής διόρθωσης αυτοαπορρόφησης γάμμα ακτινοβολίας για το activation foil (υπολογίστηκε μέσω προσομοιώσεων με τον MCNP5).

f_{TCC}, ο συντελεστής διόρθωσης για το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence).

t_c, ο χρόνος μέτρησης του activation foil στον ανιχνευτή HpGe, σε s.

λ, η σταθερά διάσπασης του παραχθέντος ραδιονουκλιδίου σε s^{-1}.

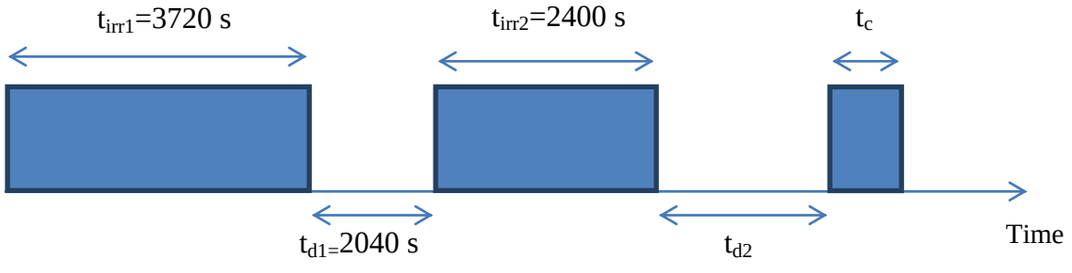
t_{irr1}, ο χρόνος ακτινοβόλησης για το πρώτο μέρος ακτινοβόλησης, σε s.

t_{d1}, ο χρόνος διάσπασης του παραχθέντος ραδιονουκλιδίου μετά το τέλος του πρώτου μέρους ακτινοβόλησης και πριν την έναρξη του δεύτερου μέρους ακτινοβόλησης, σε s.

t_{irr2}, ο χρόνος ακτινοβόλησης για το δεύτερο μέρος ακτινοβόλησης, σε s.

t_{d2}, ο χρόνος διάσπασης του παραχθέντος ραδιονουκλιδίου μετά το τέλος του δεύτερου μέρους ακτινοβόλησης και πριν την έναρξη της μέτρησης στον ανιχνευτή HpGe, σε s.

Για τον υπολογισμό της συνολικής ροής νετρονίων πολλαπλασιάστηκε ο ρυθμός ροής νετρονίων με το συνολικό χρόνο της ακτινοβόλησης. Οι χρόνοι ακτινοβόλησης, διάσπασης και μέτρησης των ελασμάτων φαίνονται στο Σχήμα 35.



Σχήμα 35. Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας από την έναρξη της ακτινοβόλησης μέχρι το τέλος της μέτρησης κάθε ελάσματος ενεργοποίησης στον ανιχνευτή HpGe.

Γ.3 Αποτελέσματα

Γ.3.1 Αποτελέσματα υπολογισμών.

Όπως αναφέρθηκε στην υπολογιστική μέθοδο έγιναν υπολογισμοί της ροής και της ισοδύναμης δόσης H*(10) νετρονίων σε διάφορες θέσεις στο θάλαμο θεραπείας και κατά μήκος του λαβυρίνθου. Πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις με διαφορετική γεωμετρία εικονικής πηγής για τη καθεμιά. Ακολουθούν αποτελέσματα ροής νετρονίων (Πίνακας 11) και ισοδύναμης δόσης νετρονίων H*(10) (Πίνακας 12) καθώς και συγκριτικοί λόγοι για τις δύο προσομοιώσεις, στις διάφορες θέσεις των εικονικών ανιχνευτών.

Πίνακας 11. Ροή νετρονίων υπολογισμένη από τις δύο προσομοιώσεις πηγής και συγκριτικοί λόγοι ροής αυτών. Οι σχετικές αβεβαιότητες των υπολογισμών ήταν της τάξεως του 0,1%.

Θέση	**Φ (Carinou) (cm^{-2}/νετρόνιο πηγής)**	**Φ (Vega-Carillo) (cm^{-2}/νετρόνιο πηγής)**	**Φ (Carinou/ Vega-Carillo)**
1 (ισόκεντρο)	1,26E-05	8,95E-06	1,41
2	8,64E-06	6,15E-06	1,40
3	7,81E-06	5,56E-06	1,40
4	6,23E-06	4,45E-06	1,40
5	5,08E-06	3,63E-06	1,40
6	3,30E-06	2,34E-06	1,41
7	1,72E-06	1,22E-06	1,41
8	1,09E-06	7,78E-07	1,40
9	8,50E-07	6,01E-07	1,41
10	4,93E-07	3,47E-07	1,42
11	2,99E-07	2,11E-07	1,42
12 (θύρα)	2,01E-07	1,42E-07	1,42

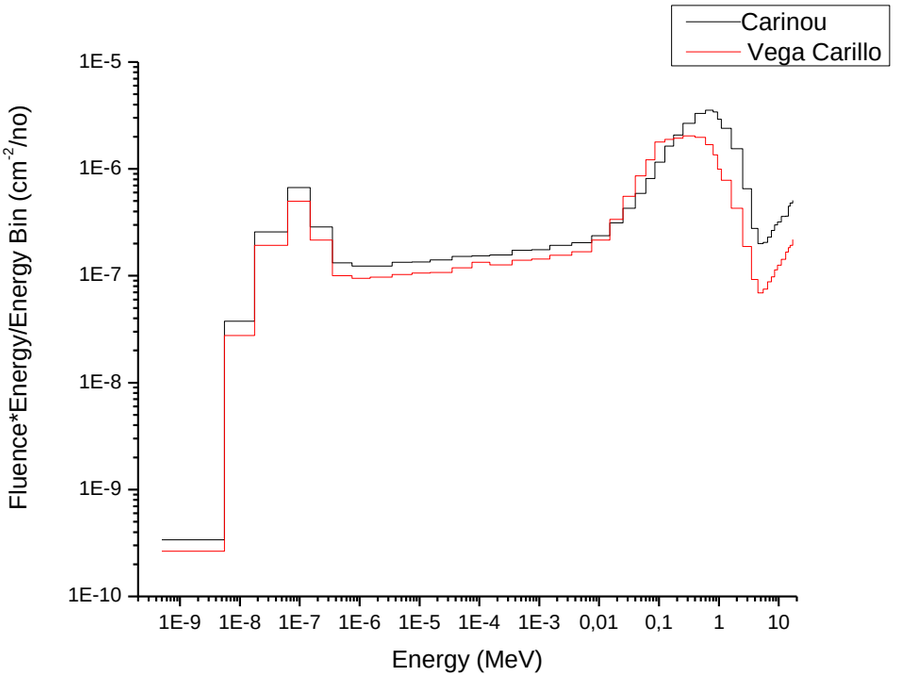
Πίνακας 12. Ισοδύναμη δόση νετρονίων H*(10) υπολογισμένη από τις δύο προσομοιώσεις πηγής και συγκριτικοί λόγοι ισοδύναμης δόσης αυτών. Οι σχετικές αβεβαιότητες των υπολογισμών ήταν της τάξεως του 0,1%.

Θέση	**H*(10) (Carinou) (pSv/νετρόνιο πηγής)**	**H*(10) (Vega-Carillo) (pSv/νετρόνιο πηγής)**	**H*(10) (Carinou/ Vega-Carillo)**
1 (ισόκεντρο)	2,66E-03	1,36E-03	1,96
2	1,50E-03	7,65E-04	1,96
3	1,27E-03	6,46E-04	1,97
4	8,00E-04	4,07E-04	1,97
5	5,89E-04	2,99E-04	1,97
6	3,33E-04	1,67E-04	1,99
7	1,21E-04	6,23E-05	1,94
8	5,34E-05	2,74E-05	1,95
9	3,69E-05	1,91E-05	1,93
10	1,66E-05	8,66E-06	1,92
11	8,11E-06	4,37E-06	1,86
12 (πόρτα)	4,91E-06	2,75E-06	1,79

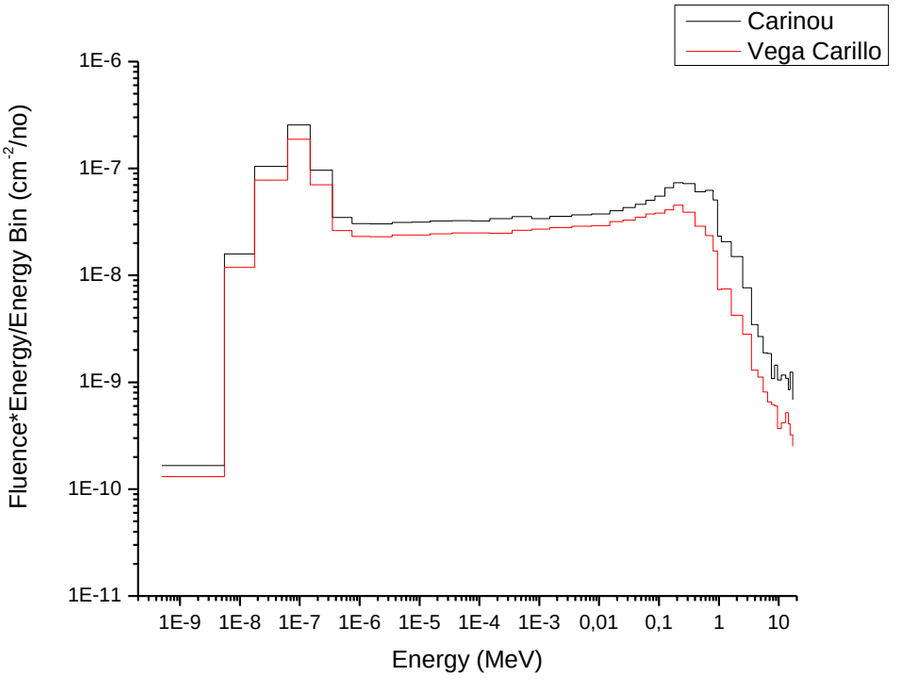
Από τους Πίνακες 11 και 12 παρατηρούμε ότι η ροή νετρονίων καθώς και η ισοδύναμη δόση νετρονίων H*(10) υπολογισμένες στον αέρα, παρουσιάζουν μείωση καθώς απομακρυνόμαστε από το ισόκεντρο και κατευθυνόμαστε προς την θύρα. Αυτό οφείλεται στις σκεδάσεις των νετρονίων και την απορρόφηση τους από τη θωράκιση του θαλάμου θεραπείας και του λαβυρίνθου, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ροής και την επιβράδυνση τους όσο πλησιάζουμε προς τη θύρα.

Συγκρίνοντας τους υπολογισμούς ροής και ισοδύναμης δόσης νετρονίων μεταξύ των δύο εικονικών πηγών, παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές από την εικονική πηγή σύμφωνα με (Carinou, et al. 1999) σε σύγκριση με αυτή από (Vega-Carrillo, et al. 2012). Οι συγκριτικοί λόγοι αυτών των εκτιμήσεων φαίνονται στους Πίνακες 11 και 12. Αυτή η διαφορά οφείλεται αρχικά στην πηγή που προσομοιώθηκε στην κάθε περίπτωση, η οποία επηρεάζει την εκπομπή των νετρονίων. Επίσης, στη γεωμετρία της κεφαλής, η οποία εξασθενεί και επιβραδύνει τα εκπεμπόμενα νετρόνια με διαφορετικό τρόπο.

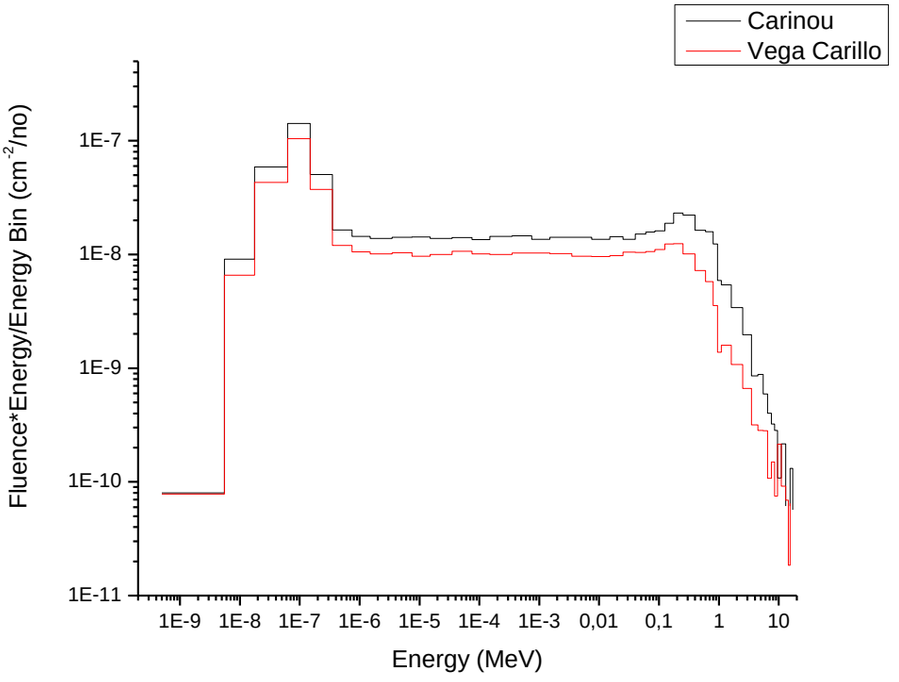
Στα Σχήματα 36 έως 39 παρουσιάζεται η μεταβολή, του γινομένου της ροής νετρονίων επί την ενέργεια των νετρονίων διαιρεμένη με το ενεργειακό διαμέρισμα (energy bin), συναρτήσει της ενέργειας των νετρονίων. Παρουσιάζονται τέσσερα φάσματα από τους υπολογισμούς εικονικών ανιχνευτών σε θέσεις της γεωμετρίας που παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Στο κάθε σχήμα φαίνεται για την ίδια θέση, το φάσμα νετρονίων που υπολογίστηκε από τις δύο διαφορετικές εικονικές πηγές νετρονίων.



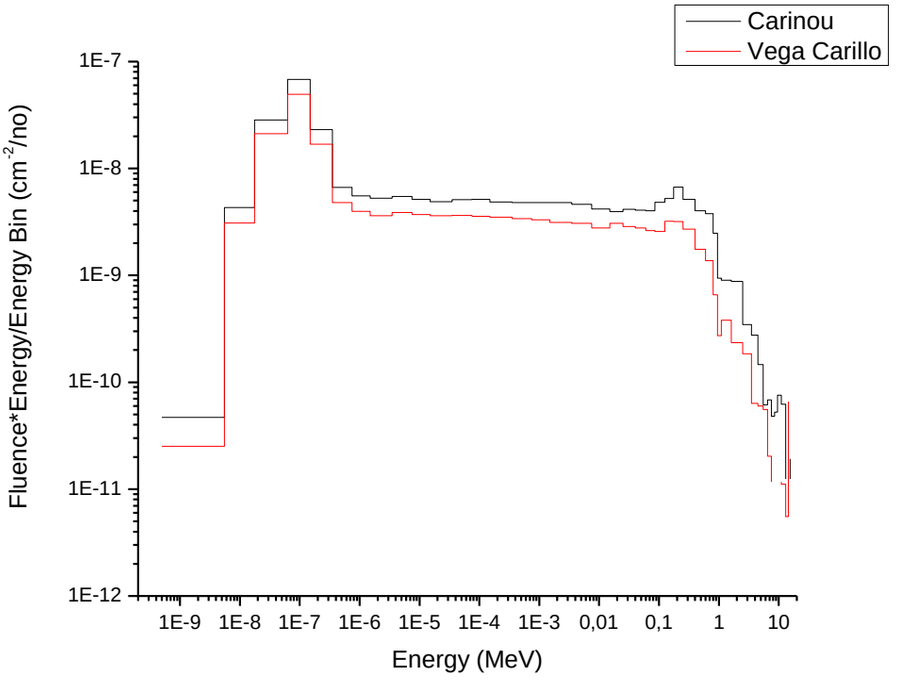
Σχήμα 36. Απεικόνιση του υπολογισμένου φάσματος των νετρονίων για τις δύο εικονικές πηγές των προσομοιώσεων στη θέση 1 (ισόκεντρο).



Σχήμα 37. Απεικόνιση του υπολογισμένου φάσματος των νετρονίων για τις δύο εικονικές πηγές των προσομοιώσεων στη θέση 8 (αρχή λαβυρίνθου).



Σχήμα 38. Απεικόνιση του υπολογισμένου φάσματος των νετρονίων για τις δύο εικονικές πηγές των προσομοιώσεων στη θέση 10 (μέση λαβυρίνθου).

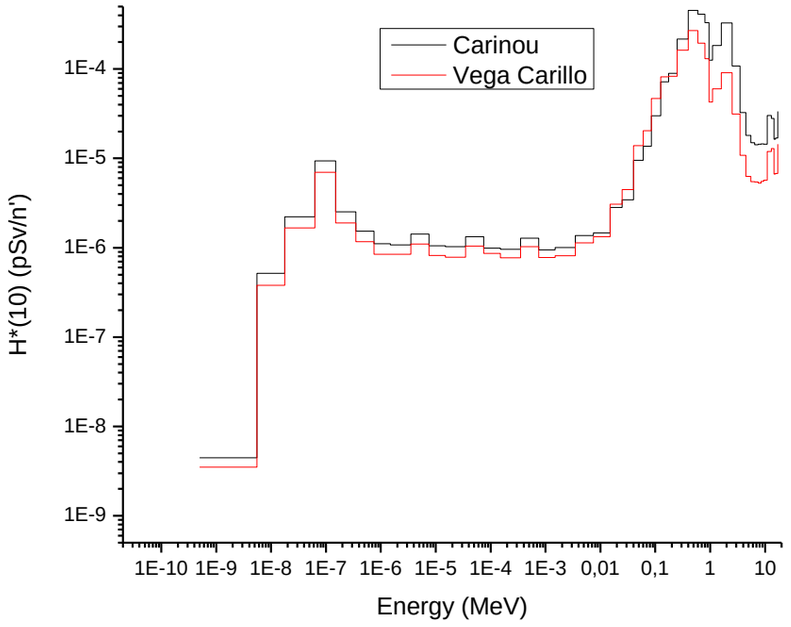


Σχήμα 39. Απεικόνιση του υπολογισμένου φάσματος των νετρονίων για τις δύο εικονικές πηγές των προσομοιώσεων στη θέση 12 (τέλος λαβυρίνθου).

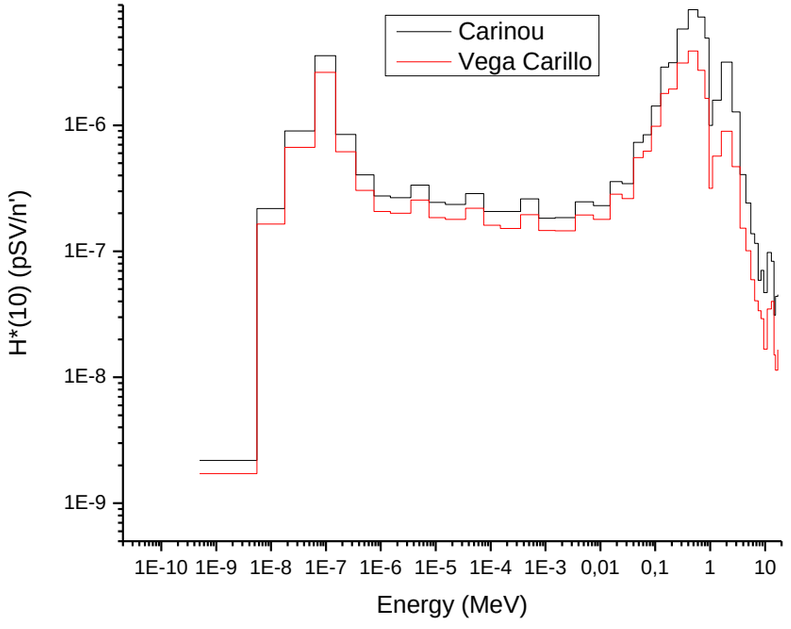
Όσο απομακρυνόμαστε από το ισόκεντρο παρατηρείται εξασθένηση της ροής των ταχέων νετρονίων. Αυτό οφείλεται στις συνεχώς αυξανόμενες σκεδάσεις τους στα υλικά του θαλάμου θεραπείας-λαβυρίνθου, οι οποίες οδηγούν και σε υποβάθμιση της ενέργειάς τους και απορρόφηση των αργών νετρονίων μετά από πυρηνικές αντιδράσεις με τα στοιχεία των υλικών της θωράκισης. Επομένως, η ροή των νετρονίων μειώνεται κατά μήκος του λαβύρινθου.

Επίσης αξίζει να αναφερθεί η διαφορά στη ροή των νετρονίων που εμφανίζουν οι προσομοιώσεις με εικονική πηγή σύμφωνα με Vega Carillo, σε σύγκριση με τις προσομοιώσεις με εικονική πηγή σύμφωνα με Carinou.

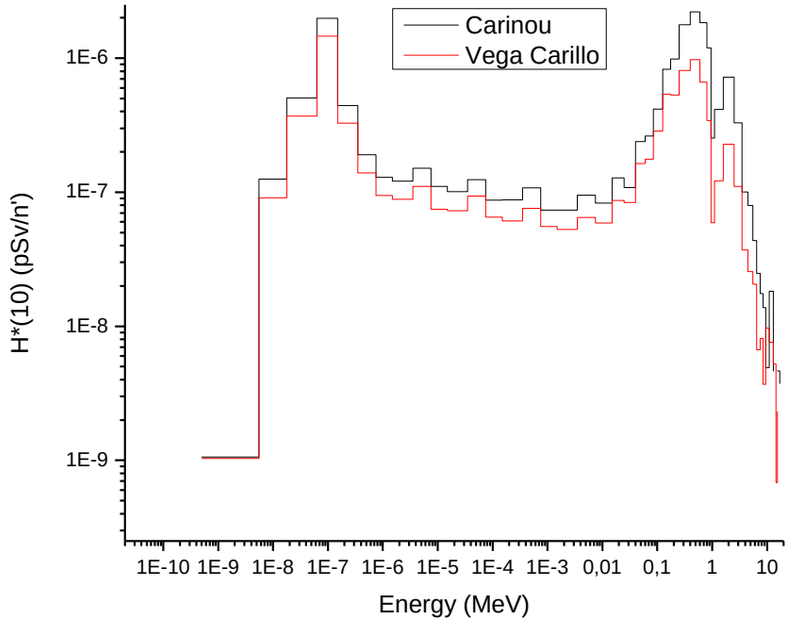
Ακολουθούν τα σχήματα 40 έως 43 στα οποία παρουσιάζεται η μεταβολή της ισοδύναμης δόσης H*(10) νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας για θέσεις υπολογισμού στο ισόκεντρο, στην αρχή, στη μέση και στο τέλος του λαβυρίνθου.



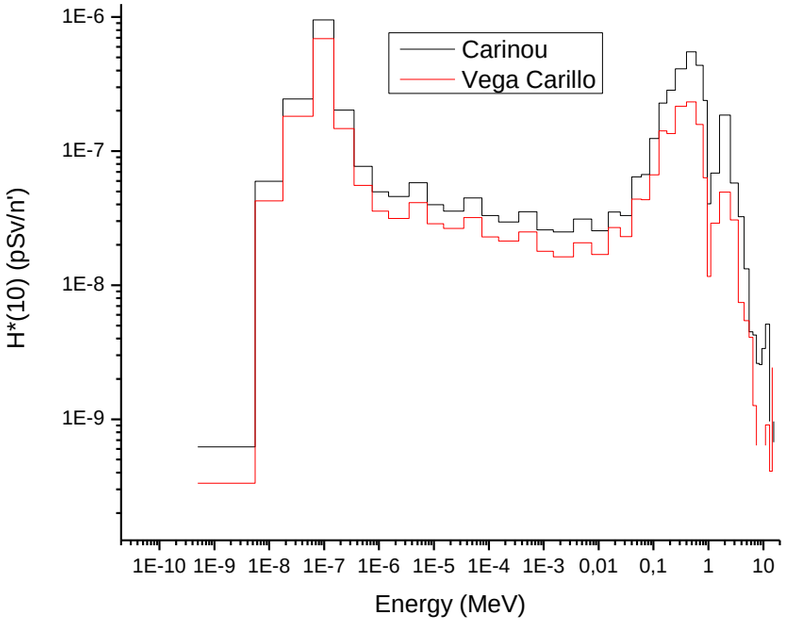
Σχήμα 40. Μεταβολή της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας, για τις δύο εικονικές πηγές των προσομοιώσεων στη θέση 1 (ισόκεντρο).



Σχήμα 41. Μεταβολή της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας, για τις δύο εικονικές πηγές των προσομοιώσεων στη θέση 8 (αρχή λαβυρίνθου).



Σχήμα 42. Μεταβολή της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας, για τις δύο εικονικές πηγές των προσομοιώσεων στη θέση 10 (μέση λαβυρίνθου).



Σχήμα 43. Μεταβολή της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος νετρονίων συναρτήσει της ενέργειας, για τις δύο εικονικές πηγές των προσομοιώσεων στη θέση 12 (τέλος λαβυρίνθου).

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρείται ότι στο ισόκεντρο του γραμμικού επιταχυντή η μεγαλύτερη συνεισφορά στην ισοδύναμη δόση νετρονίων προέρχεται από ταχέα νετρόνια. Αντιθέτως, στο τέλος του λαβυρίνθου το μεγαλύτερο ποσοστό της ισοδύναμης δόσεις οφείλεται σε θερμικά νετρόνια. Γενικώς, έχουμε μείωση της ισοδύναμης δόσης H*(10) νετρονίων κατά μήκος του λαβυρίνθου. Αυτό οφείλεται στη μείωση της ροής και της μέσης ενέργειας του φάσματος νετρονίων.

Στο δεύτερο στάδιο των προσομοιώσεων υπολογίστηκε η απόκριση των ανιχνευτών ενεργοποίησης. Όπως και στο προηγούμενο στάδιο χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι για την προσομοίωση της εικονικής πηγής. Στους Πίνακες 13 και 14 παρουσιάζεται η μεταβολή του σ_{eff} (Σχέση 10) συναρτήσει της θέσης υπολογισμού για τις δύο μεθόδους, μαζί με τους συγκριτικούς τους λόγους.

Πίνακας 13. Υπολογισμοί του σ_{eff} με τις δύο προσομοιώσεις εικονικών πηγών και συγκριτικοί λόγοι αυτών. Οι υπολογισμοί αφορούν έλασμα ενεργοποίησης από χρυσό (^{197}Au).

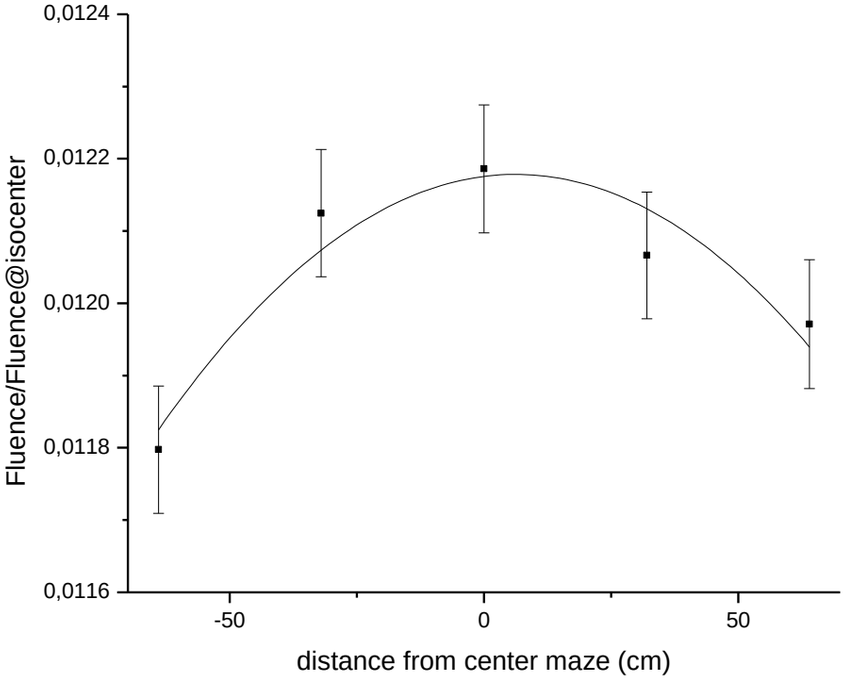
Θέση	**σ_{eff} (Carinou)$\times 10^{-3}$ (cm^2)**	**σ_{eff} (Vega-Carillo)$\times 10^{-3}$ (cm^2)**	**σ_{eff} (Carinou/ Vega-Carillo)**
1 (ισόκεντρο)	6,06±0,04	6,74±0,08	0,90±0,01
2	6,44±0,04	7,13±0,08	0,90±0,01
3	6,56±0,05	7,10±0,07	0,92±0,01
4	6,92±0,05	7,55±0,08	0,92±0,01
5	7,13±0,05	7,70±0,09	0,93±0,01
6	7,40±0,05	7,72±0,08	0,96±0,01
7	7,74±0,05	7,98±0,08	0,97±0,01
8	8,06±0,05	8,24±0,09	0,98±0,01
9	8,18±0,05	8,27±0,08	0,99±0,01
10	8,30±0,05	8,52±0,08	0,97±0,01
11	8,47±0,05	8,47±0,07	1,00±0,01
12 (πόρτα)	8,42±0,04	8,65±0,08	0,97±0,01

Πίνακας 14. Υπολογισμοί του σ_{eff} με τις δύο προσομοιώσεις εικονικών πηγών και συγκριτικοί λόγοι αυτών. Οι υπολογισμοί αφορούν έλασμα ενεργοποίησης από ίνδιο (In).

Θέση	**σ_{eff} (Carinou)$\times 10^{-2}$ (cm^2)**	**σ_{eff} (Vega-Carillo)$\times 10^{-2}$ (cm^2)**	**σ_{eff} (Carinou/ Vega-Carillo)**
1 (ισόκεντρο)	13,04±0,04	15,20±0,08	0,86±0,01
2	14,59±0,05	16,70±0,08	0,87±0,01
3	15,11±0,05	17,12±0,09	0,88±0,01
4	16,85±0,05	18,62±0,09	0,91±0,01
5	17,51±0,06	19,21±0,10	0,91±0,01
6	18,41±0,06	20,06±0,10	0,92±0,01
7	20,58±0,07	21,92±0,11	0,94±0,01
8	22,39±0,07	23,52±0,12	0,95±0,01
9	23,02±0,08	24,05±0,13	0,96±0,01
10	24,05±0,08	25,00±0,13	0,96±0,01
11	25,00±0,08	25,75±0,14	0,97±0,01
12 (πόρτα)	24,98±0,07	25,61±0,13	0,98±0,01

Παρατηρείται ότι και για τα δύο υλικά των ελασμάτων ενεργοποίησης η εικονική πηγή σύμφωνα με Carinou δίνει μικρότερη τιμή του σ_{eff} σε σύγκριση με Vega-Carillo. Αυτό δείχνει ότι η πηγή σύμφωνα με Vega-Carillo, εκπέμπει περισσότερα θερμικά νετρόνια στο θάλαμο και στο λαβύρινθο, σε σχέση με Carinou. Όσο πλησιάζουμε προς τη θύρα του θαλάμου οι λόγοι των υπολογισμών πλησιάζουν στη μονάδα καθώς εκεί το φάσμα των νετρονίων είναι θερμοποιημένο και οι διαφορές στη γεωμετρία των πηγών δεν παίζουν μεγάλο ρόλο. Οι διαφορές στη τιμή του σ_{eff} μεταξύ ελάσματος χρυσού και ινδίου οφείλονται στη διαφορετική απόκριση που εμφανίζουν σε ροή νετρονίων (Σχήμα 26). Συγκεκριμένα το ίνδιο εμφανίζει μεγαλύτερη απόκριση σε ροή θερμικών νετρονίων για αυτό και έχει μεγαλύτερη τιμή $\sigma_{eff.}$ Σημειώνεται ότι η τιμή της ενεργού διατομής (σ_{eff}) εξαρτάται από την ενέργεια των νετρονίων, το υλικό του ελάσματος καθώς και τις φυσικές τους διαστάσεις.

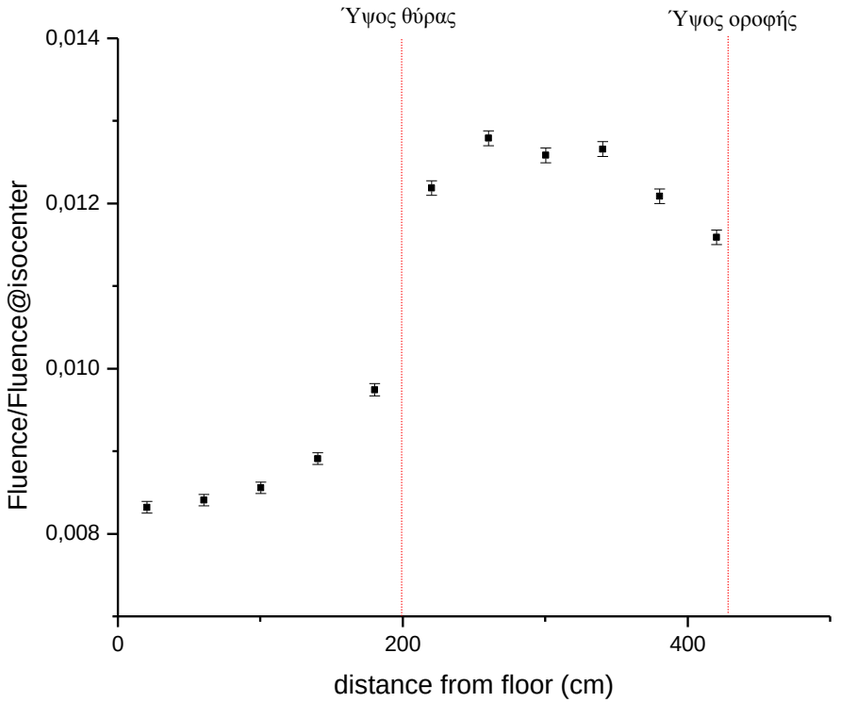
Στο τελευταίο στάδιο των προσομοιώσεων εκτιμήθηκε η ροή των νετρονίων στη θύρα του θαλάμου. Στο Σχήμα 44 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου της ροής προς τη ροή στο ισόκεντρο, συναρτήσει της θέσης κατά πλάτος του λαβυρίνθου.



Σχήμα 44. Μεταβολή της ροής νετρονίων κατά πλάτος του λαβυρίνθου.

Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη ροή νετρονίων εμφανίζεται στο κέντρο του λαβυρίνθου, ενώ μειώνεται όσο πλησιάζουμε στους τοίχους του. Αυτό οφείλεται κυρίως στην απορρόφηση νετρονίων από τους τοίχους του λαβύρινθου. Η ροή κοντά στον αριστερό τοίχο του λαβυρίνθου βρέθηκε μικρότερη από αυτή στο δεξιό τοίχο, η διαφορά αυτή εξηγείται λόγω της ύπαρξης της γλώσσας του λαβύρινθου (Σχήμα 13) η οποία επηρεάζει τις σκεδάσεις των νετρονίων προς την θύρα του θαλάμου.

Στο Σχήμα 45 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου της ροής προς τη ροή στο ισόκεντρο, συναρτήσει της θέσης κατά ύψος του λαβυρίνθου.



Σχήμα 45. Μεταβολή της ροής νετρονίων συναρτήσει του ύψους του λαβυρίνθου.

Η απόσταση δαπέδου-οροφής του θαλάμου θεραπείας είναι 441 cm, ενώ το ύψος της θύρας είναι 200 cm (Σχήμα 41). Επομένως, τα αποτελέσματα των υπολογισμών δείχνουν ότι η ροή των νετρονίων είναι ελάχιστη στο δάπεδο. Αντίθετα, η μέγιστη τιμή παρατηρείται πάνω από το ύψος της θύρας σε απόσταση 260 cm από το δάπεδο.

Γ.3.2 Πειραματικά αποτελέσματα.

Στο Κεφάλαιο Γ.2.7 αναλύθηκε η μέθοδος υπολογισμού της ροής νετρονίων (Σχέση 14), μέσω της ανάλυσης νετρονικής ενεργοποίησης των ελασμάτων ενεργοποίησης. Όπως αναφέρθηκε ο υπολογισμός της ενεργού διατομής σ_{eff}, υπολογίστηκε μέσω του κώδικα MCNP5 (Κεφάλαιο Γ.1.3). Στους Πίνακες 15 και 16 παρουσιάζεται η μεταβολή της ροής νετρονίων συναρτήσει της θέσης μέτρησης, για τις δύο προσομοιώσεις της γεωμετρίας της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή, καθώς και συγκριτικοί λόγοι ροών.

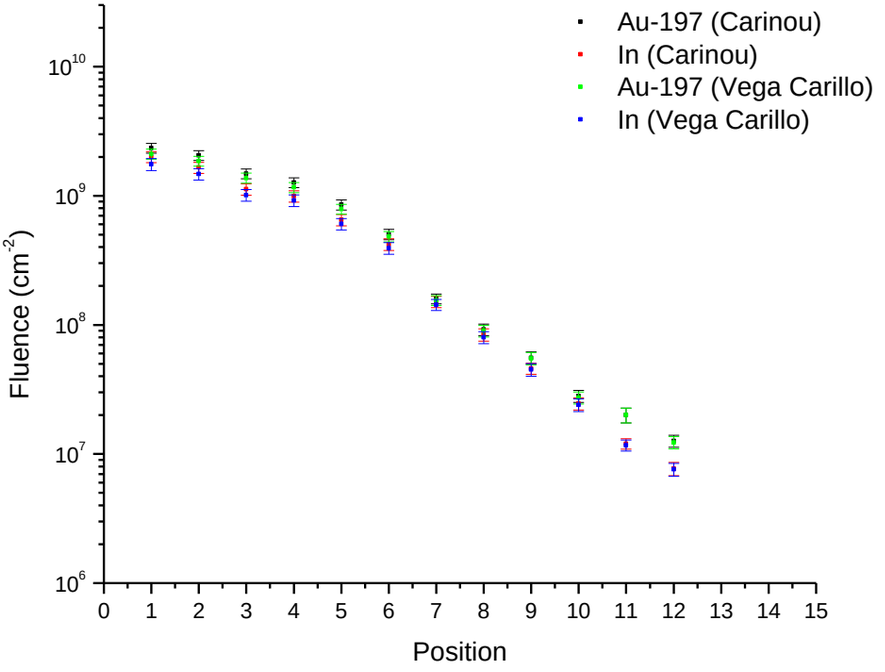
Πίνακας 15. Μεταβολή πειραματικών τιμών ροής νετρονίων συναρτήσει της θέσης μέτρησης για έλασμα ενεργοποίησης από χρυσό (^{197}Au).

Θέση	**Φ (Carinou) (cm^{-2})**	**Φ (Vega-Carillo) (cm^{-2})**	**Φ (Carinou/ Vega-Carillo)**
1 (ισόκεντρο)	(2,34±0,21)E+09	(2,10±0,19)E+09	1,11±0,14
2	(2,06±0,18)E+09	(1,86±0,17)E+09	1,11±0,14
3	(1,48±0,13)E+09	(1,37±0,12)E+09	1,08±0,14
4	(1,27±0,11)E+09	(1,16±0,10)E+09	1,09±0,14
5	(8,52±0,75)E+08	(7,89±0,70)E+08	1,08±0,14
6	(5,04±0,47)E+08	(4,83±0,45)E+08	1,04±0,14
7	(1,60±0,14)E+08	(1,55±0,14)E+08	1,03±0,13
8	(9,20±0,96)E+07	(8,99±0,94)E+07	1,02±0,15
9	(5,56±0,61)E+07	(5,50±0,60)E+07	1,01±0,16
10	(2,81±0,30)E+07	(2,74±0,29)E+07	1,03±0,15
11	(2,00±0,26)E+07	(2,00±0,26)E+07	1,00±0,19
12 (πόρτα)	(1,26±0,14)E+07	(1,23±0,13)E+07	1,03±0,16

Πίνακας 16. Μεταβολή πειραματικών τιμών ροής νετρονίων συναρτήσει της θέσης μέτρησης για έλασμα ενεργοποίησης από ίνδιο (In).

Θέση	**Φ (Carinou) (cm^{-2})**	**Φ (Vega-Carillo) (cm^{-2})**	**Φ (Carinou/ Vega-Carillo)**
1 (ισόκεντρο)	(2,00±0,20)E+09	(1,76±0,19)E+09	1,14±0,17
2	(1,66±0,16)E+09	(1,47±0,15)E+09	1,12±0,16
3	(1,12±0,11)E+09	(1,01±0,11)E+09	1,11±0,16
4	(9,94±1,01)E+08	(9,19±0,95)E+08	1,08±0,16
5	(6,52±0,67)E+08	(6,05±0,61)E+08	1,08±0,15
6	(4,20±0,44)E+08	(3,92±0,41)E+08	1,07±0,16
7	(1,51±0,15)E+08	(1,43±0,14)E+08	1,05±0,15
8	(8,40±0,92)E+07	(8,02±0,86)E+07	1,05±0,16
9	(4,59±0,45)E+07	(4,50±0,50)E+07	1,02±0,15
10	(2,45±0,26)E+07	(2,40±0,27)E+07	1,02±0,16
11	(1,20±0,11)E+07	(1,17±0,12)E+07	1,03±0,14
12 (πόρτα)	(7,70±0,90)E+06	(7,59±0,87)E+06	1,02±0,17

Ακολουθεί το Σχήμα 46 όπου παρουσιάζονται η μεταβολή της ροής συναρτήσει της θέσης μέτρησης. Περιλαμβάνονται οι τιμές ροής και των 24 ελασμάτων ενεργοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν, με τις δύο διαφορετικές εικονικές πηγές που προσομοιώθηκαν για τον υπολογισμό του σ_{eff}.



Σχήμα 46. Μεταβολή της ροής νετρονίων, όπως μετρήθηκε στον όγκο των ελασμάτων ενεργοποίησης, συναρτήσει της θέσης υπολογισμού στο θάλαμο θεραπείας και λαβύρινθο.

Σε όλες τις θέσεις η ροή που μετρήθηκε ήταν μεγαλύτερη στα ελάσματα χρυσού σε σχέση με τη ροή στα ελάσματα ινδίου, ωστόσο η διαφορά αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική. Η διαφορά οφείλεται στην διαφορετική απόκριση που εμφανίζει ο χρυσός σε σχέση με το ίνδιο στη θερμική περιοχή και δείχνει ότι το μοντέλο της κεφαλής και του θαλάμου μπορεί να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω για την καλύτερη εκτίμηση της θερμικής ροής νετρονίων.

Από τους Πίνακες 15 και 16 παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα ροής νετρονίων με προσομοίωση πηγής σύμφωνα με Carinou είναι μεγαλύτερα από εκείνα με πηγή σύμφωνα με Vega-Carillo, κατά 11% για έλασμα χρυσού και 12% για έλασμα ινδίου. Αυτές οι διαφορές αναφέρονται σε μετρήσεις στο ισόκεντρο του γραμμικού επιταχυντή. Όσο απομακρυνόμαστε από το ισόκεντρο αυτές οι διαφορές στη ροή ελαττώνονται.

Γ.3.3 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

Η σύγκριση μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων ροής νετρονίων, θα γίνει ξεχωριστά για ελάσματα από χρυσό (Πίνακας 17) και για ελάσματα από ίνδιο (Πίνακας 18). Συγκεκριμένα για τη σύγκριση, θα χρησιμοποιηθούν οι λόγοι της ροής στις διάφορες θέσεις μέτρησης/υπολογισμού, προς τη ροή που υπολογίστηκε ή μετρήθηκε στο ισόκεντρο του γραμμικού επιταχυντή.

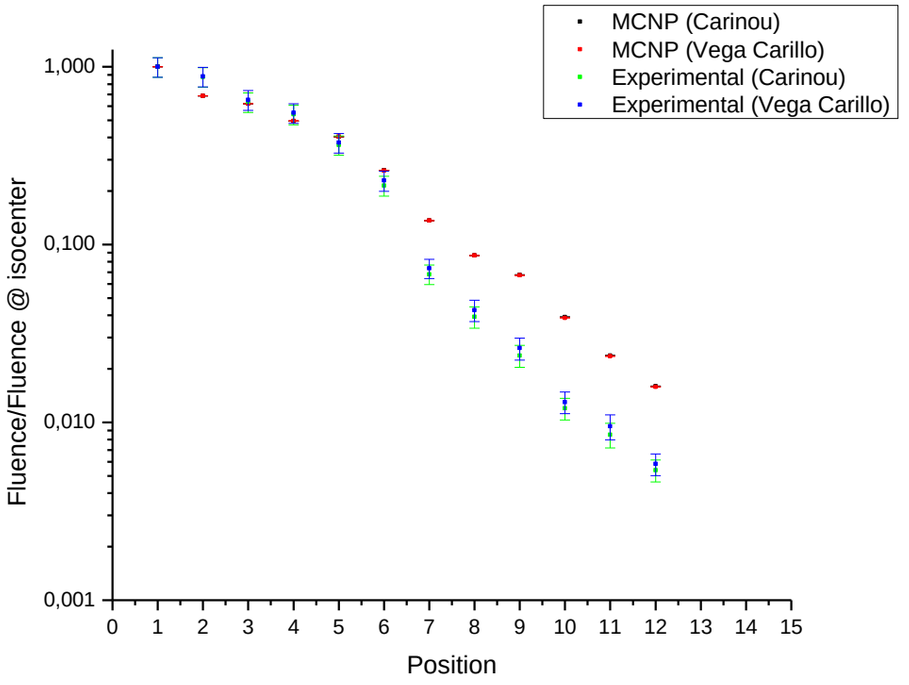
Πίνακας 17 . Πειραματικοί και υπολογιστικοί λόγοι ροής νετρονίων ως προς τη ροή στο ισόκεντρο. Οι πειραματικοί λόγοι ροής αντιστοιχούν σε έλασμα ενεργοποίησης από χρυσό. Οι σχετικές αβεβαιότητες των υπολογιστικών λόγων ροής είναι της τάξεως του 0,1%.

Θέση	**Φi/Φo (Carinou)** **(ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ)**	**Φi/Φo (Vega-Carillo)** **(ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ)**	**Φi/Φo (Carinou)** **(ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ)**	**Φi/Φo (Vega-Carillo** **(ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ)**
1	(1,000±0,126)	(1,000±0,127)	1,000	1,000
2	(0,878±0,110)	(0,883±0,111)	0,686	0,687
3	(0,634±0,080)	(0,652±0,082)	0,620	0,621
4	(0,541±0,068)	(0,551±0,070)	0,495	0,497
5	(0,364±0,046)	(0,375±0,047)	0,404	0,406
6	(0,215±0,028)	(0,229±0,030)	0,262	0,261
7	(0,068±0,009)	(0,074±0,009)	0,137	0,136
8	(0,039±0,005)	(0,043±0,006)	0,087	0,087
9	(0,024±0,003)	(0,026±0,004)	0,068	0,067
10	(0,012±0,002)	(0,013±0,002)	0,039	0,039
11	(0,009±0,001)	(0,010±0,002)	0,024	0,024
12	(0,005±0,001)	(0,006±0,001)	0,016	0,016

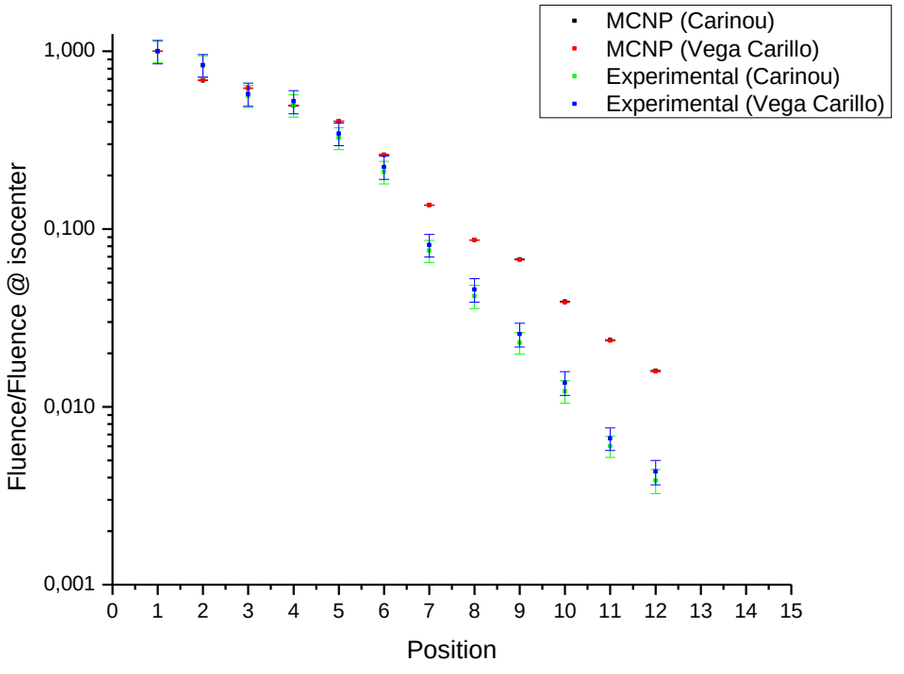
Πίνακας 18 . Πειραματικοί και υπολογιστικοί λόγοι ροής νετρονίων ως προς τη ροή στο ισόκεντρο. Οι πειραματικοί λόγοι ροής αντιστοιχούν σε έλασμα ενεργοποίησης από ίνδιο. Οι σχετικές αβεβαιότητες των υπολογιστικών λόγων ροής είναι της τάξεως του 0,1%.

Θέση	**Φi/Φo (Carinou)** **(ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ)**	**Φi/Φo (Vega-Carillo)** **(ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ)**	**Φi/Φo (Carinou)** **(ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ)**	**Φi/Φo (Vega-Carillo** **(ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ)**
1	(1,000±0,140)	(1,000±0,150)	1,000	1,000
2	(0,828±0,115)	(0,838±0,121)	0,686	0,687
3	(0,562±0,080)	(0,577±0,085)	0,620	0,621
4	(0,497±0,071)	(0,523±0,078)	0,495	0,497
5	(0,326±0,046)	(0,345±0,051)	0,404	0,406
6	(0,210±0,030)	(0,223±0,033)	0,262	0,261
7	(0,076±0,011)	(0,082±0,012)	0,137	0,136
8	(0,042±0,006)	(0,046±0,007)	0,087	0,087
9	(0,023±0,003)	(0,026±0,004)	0,068	0,067
10	(0,012±0,002)	(0,014±0,002)	0,039	0,039
11	(0,006±0,001)	(0,007±0,001)	0,024	0,024
12	(0,004±0,001)	(0,004±0,001)	0,016	0,016

Ακολουθούν τα Σχήματα 47 και 48 όπου φαίνεται η μεταβολή των λόγων ροής από τους παραπάνω πίνακες συναρτήσει της θέσης στο θάλαμο θεραπείας και κατά μήκος του λαβυρίνθου.



Σχήμα 47. Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών λόγων ροής για έλασμα ενεργοποίησης από χρυσό.



Σχήμα 48. Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών λόγων ροής για έλασμα ενεργοποίησης από ίνδιο.

Στα δύο παραπάνω σχήματα φαίνεται ταύτιση των υπολογιστικών λόγων ροής και για τις δύο προσομοιώσεις πηγής. Όμοια συμπεριφορά εμφανίζουν και οι πειραματικοί λόγοι. Παρόλα αυτά συγκρίνοντας υπολογιστικούς και πειραματικούς λόγους παρατηρείται συμφωνία αποτελεσμάτων για θέσεις κοντά στο ισόκεντρο και στον κυρίως θάλαμο θεραπείας, ενώ για θέσεις κατά μήκος του λαβυρίνθου τα πειραματικά αποτελέσματα εμφανίζουν μεγαλύ-

τερη εξασθένηση της ροής νετρονίων ως προς το ισόκεντρο. Η διαφορά αυτή αποδίδεται στη μη αντιπροσωπευτική εκτίμηση της σύστασης των υλικών θωράκισης του λαβυρίνθου και σε απλουστεύσεις στη γεωμετρία του μοντέλου.

Γ.3.4. Σύγκριση υπολογισμών ισοδύναμης δόσης νετρονίων στη θύρα με εμπειρικές μεθόδους.

Η επαλήθευση των υπολογισμών Monte Carlo της παρούσας εργασίας θα γίνει, κάνοντας χρήση εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ισοδύναμης δόσης νετρονίων στη θύρα του θαλάμου θεραπείας. Στον Πίνακα 19 παρουσιάζεται η ισοδύναμη δόση νετρονίων στη θύρα, σύμφωνα με τις μεθόδους των Wu & McGinley, της IPEM και των προσομοιώσεων με τον MCNP.

Πίνακας 19. Αποτελέσματα ισοδύναμης δόσης νετρονίων από τη μέθοδο των Wu & McGinley, της IPEM και των προσομοιώσεων Monte Carlo. Οι σχετικές αβεβαιότητες των υπολογιστικών τιμών είναι της τάξης του 0,1%.

	$H_{n,D}$ (Sv/Gy)
Wu & McGinley	2,96E-06
IPEM	5,51E-07
MCNP (Carinou)	5,93E-07
MCNP (Vega Carillo)	4,28E-07

Ακολουθεί ο Πίνακας 20 με τους συγκριτικούς λόγους ισοδύναμης δόσης νετρονίων των μεθόδων.

Πίνακας 20. Συγκριτικοί λόγοι ισοδύναμης δόσης νετρονίων των υπολογισμών της παρούσας μελέτης με τους υπολογισμούς από εμπειρικές μεθόδους.

Wu & McGinley/ MCNP (Carinou)	**Wu & McGinley/ MCNP (Vega Carillo)**	**IPEM/ MCNP (Carinou)**	**IPEM/ MCNP (Vega Carillo)**
4,99	6,92	0,93	1,29

Παρατηρώντας τους λόγους του παραπάνω πίνακα, συμπεραίνουμε ότι η προσομοίωση με τον κώδικα MCNP δίνει αποτελέσματα συγκρίσιμα με την μέθοδο IPEM, καθώς και ότι η προσομοίωση με πηγή νετρονίων σύμφωνα με Carinou δίνει τη μεγαλύτερη σύμπτωση αποτελεσμάτων.

Γενικά η τεχνική Monte Carlo θεωρείται πιο αξιόπιστη, καθώς λαμβάνει υπόψη όλες τις σημαντικές παραμέτρους, που επιδρούν στη μεταβολή της ροής και της ισοδύναμης δόσης των νετρονίων. Με τη χρήση των εμπειρικών μεθόδων, δεδομένα όπως λεπτομερείς γεωμετρίες και ιδιότητες υλικών, δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη, με αποτέλεσμα την εξαγωγή πιο γενικευμένων αποτελεσμάτων.

Δ. ΓΕΝΙΚΗ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ροή νετρονίων σε ένα θάλαμο γραμμικού επιταχυντή, χρησιμοποιώντας ως ανιχνευτές ελάσματα ενεργοποίησης από χρυσό και ίνδιο. Η ακτινοβόληση έγινε με κλειστά διαφράγματα της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή. Δηλαδή, το μέγεθος πεδίου (field size) στο ισόκεντρο ήταν (0×0) cm^2.

Στον Πίνακα 21 παρατίθεται η ροή νετρονίων ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης από φωτόνια στο ισόκεντρο, για διαφόρων ειδών γραμμικούς επιταχυντές. με διαφορετικές παραμέτρους ακτινοβόλησης και μεθόδους ανίχνευσης για τον καθένα.

Παρατηρείται ότι για ακτινοβόληση με κλειστά διαφράγματα, η ροή νετρονίων ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης φωτονίων στο ισόκεντρο, παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με ακτινοβόληση με ανοιχτά διαφράγματα. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο Β.2, το μεγαλύτερο μέρος της ροής νετρονίων σε ένα θάλαμο γραμμικού επιταχυντή, οφείλεται στην αλληλεπίδραση φωτονίων (Bremsstrahlung) με τα στοιχεία της κεφαλής (αντιδράσεις (γ, n)). Στην περίπτωση των κλειστών διαφραγμάτων τα φωτόνια που φεύγουν από το στόχο, έχουν το περισσότερο δυνατό υλικό για να αλληλεπιδράσουν και να παραχθούν φωτονετρόνια. Συνεπώς για τον σκοπό της συγκεκριμένης μελέτης, η ακτινοβόληση έγινε με κλειστά διαφράγματα για την μεγιστοποίηση της ροής των νετρονίων.

Στη τελευταία γραμμή του Πίνακα 21, έχουμε αποτέλεσμα ροής νετρονίων από μία άλλη μελέτη (Esposito, et al. 2008), στην οποία η ακτινοβόληση και η ανίχνευση των νετρονίων έγινε με παρόμοιο τρόπο με της παρούσας εργασίας. Η απόκλιση των δύο τιμών ροής είναι 14% και μπορεί να οφείλεται στις διαφορετικές διατομές που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 21. Μετρήσεις ροής νετρονίων της παρούσας εργασίας και άλλων μελετών.

Accelerator	Energy (MV)	SSD (cm)	X-ray field size (cm^2)	Method	Neutron Fluence (ncm^{-2}/ Gy-X)	Αναφορά
Elekta SYNERGY 1 (παρούσα μελέτη)	18	100	None	Au foil	**$7{,}81\times10^{6}$**	
Elekta SYNERGY 1 (παρούσα μελέτη)	18	100	None	In foil	**$6{,}66\times10^{6}$**	
Varian CLINAC21EX	15	100	20×20	In foil	**1.97×10^{5}**	(Liu, et al. 2011)
Varian CLINAC21EX	10	100	20×20	In foil	**1.46×10^{4}**	(Liu, et al. 2011)
Varian 2300	22				**1.10×10^{4}**	(Konefal, et al. 2005)
Siemens	21				**2×10^{4}**	(Konefal, et al. 2005)
Varian CLINAC2300	20	100	10×10	In foil	**1.51×10^{6}**	(Konefal, et al. 2005)
Varian CLINAC2300	18				**7×10^{3}**	(Konefal, et al. 2005)
Primus Siemens	18				**1.2×10^{4}**	(Konefal, et al. 2005)
Siemens	15				**2.9×10^{5}**	(Konefal, et al. 2005)
Siemens Primus	15		40×40	P_2O_5	**1.51×10^{6}**	(Lin, et al. 2001)
Varian CLINAC2100C	18			CR 39, MCNP	**1.07×10^{5}**	(Paredes, et al. 1999)
Mevatron 77	18	100	15×15	Au foil	**2.3×10^{5}**	(Palta, Hogstrom and Tannanonta 1984)
Philips SL/75-20	18	100	10×10	In foil	**1.4×10^{6}**	(Gur, et al. 1978)
Varian CLINAC	18	100	25×25	5.1 cm Rh	**1.4×10^{4}**	(Deye and Young 1977)
Varian CLINAC-18	10	100	10×10	In foil	**6.8×10^{4}**	(McGinley, et al. 1976)
Allis-Chalmers Betatron	25	100	10×10	In foil,BF_3	**3.8×10^{5}**	(McGinley, et al. 1976)
Siemens	18			BF_3	**4.6×10^{5}**	(Barquero, et al. 2005)
Microtron, MM22	21	100	10×10	In foil	**3.2×10^{5}**	(Uwamino, et al. 1986)
Elekta Precise	18		None	Au foil	**9.11×10^{6}**	(Esposito, et al. 2008)

Στο κεφάλαιο Γ.1.3 αναφέρθηκε ότι η ενεργός διατομή της σύλληψης νετρονίων (αντίδραση (n, γ)), υπολογίστηκε μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo. Αυτή η μέθοδος ήταν απαραίτητη, διότι παρά την τοποθέτηση των ελασμάτων στο κέντρο κύβων από πλεξιγκλάς, το φάσμα των νετρονίων που έφτανε στο έλασμα δεν ήταν πλήρως θερμοποιημένο (ελέγχθηκε μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo, χρησιμοποιώντας την κατάλληλη ενεργειακή διαμέριση στον εικονικό ανιχνευτή). Συνεπώς η χρήση βιβλιογραφικών ενεργών διατομών για σύλληψη νετρονίων, όπως αυτές που χρησιμοποιήθηκαν σε άλλες μελέτες (Yucel, et al. 2016), δεν ήταν η κατάλληλη για την παρούσα

εργασία καθώς έχουν υπολογιστεί από ακτινοβολήσεις σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και όχι σε γραμμικούς επιταχυντές.

Παρόλα αυτά για λόγους σύγκρισης έγινε υπολογισμός της ροής νετρονίων (για έλασμα χρυσού), χρησιμοποιώντας ενεργό διατομή σύλληψης νετρονίων από τη βιβλιογραφία ($\sigma_{thermal}$=96 b). Στον Πίνακα 22 παρατίθενται οι λόγοι ροής για έλασμα ενεργοποίησης από χρυσό με προσομοίωση πηγής σύμφωνα με Carinou.

Πίνακας 22. Λόγοι ροών νετρονίων μετρημένοι με έλασμα χρυσού χρησιμοποιώντας διατομή σύλληψης 96 b και σύμφωνα με τους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας.

Θέση	**Φ (ΒΙΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ/MCNP)**
1 (ισόκεντρο)	0,82±0,10
2	0,80±0,10
3	0,79±0,10
4	0,83±0,10
5	0,84±0,1
6	0,87±0,11
7	0,90±0,11
8	0,94±0,14
9	0,95±0,15
10	0,96±0,15
11	0,80±0,15
12 (πόρτα)	0,78±0,12

Ε. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η ροή των νετρονίων σε διάφορες θέσεις στο θάλαμο θεραπείας και στο λαβύρινθο του γραμμικού επιταχυντή στο νοσοκομείο 'Άγιος Σάββας' εκτιμήθηκε μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo, καθώς και με πειραματικές μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες ακτινοβόλησης.

Στο μέρος των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές εικονικές πηγές. Και οι δύο είχαν γεωμετρία που αποτελούσε απλούστευση της πραγματικής γεωμετρίας της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo χωρίστηκαν σε τρία στάδια.

Στο πρώτο στάδιο υπολογίστηκε η ροή νετρονίων και η ισοδύναμη δόση τους H*(10), σε εικονικούς ανιχνευτές από αέρα και σχήματος σφαιρικού (R=10cm). Οι υπολογισμοί από τις δύο εικονικές πηγές νετρονίων έδωσαν μειούμενη ροή και ισοδύναμη δόση νετρονίων, όσο απομακρυνόμασταν από το ισόκεντρο και κατευθυνόμασταν προς την θύρα του θαλάμου. Παρατηρήθηκαν διαφορές στους υπολογισμούς από τις δύο εικονικές πηγές, οι οποίες οφείλονται στη διαφορετική γεωμετρία και εικονική πηγή που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της καθεμίας. Συγκεκριμένα, για υπολογισμό στο ισόκεντρο, ο λόγος ροής νετρονίων (Carinou προς Vega-Carillo) από τις δύο γεωμετρίες κεφαλής είναι 1,41, ενώ ο λόγος ισοδύναμης δόσης 1,96. Αντίστοιχα για υπολογισμό κοντά στη θύρα, ο λόγος της ροής είναι 1,42 και ο λόγος της ισοδύναμης δόσης 1,79.

Στο δεύτερο στάδιο εκτιμήθηκε η απόκριση που εμφανίζουν τα ελάσματα ενεργοποίησης του χρυσού και του ινδίου για το ενεργειακό φάσμα των νετρονίων στις θέσεις μέτρησης. Με τη βοήθεια των παραπάνω υπολογισμών υπολογίστηκε το σ_{eff} για το κάθε έλασμα.

Στο τρίτο στάδιο εκτιμήθηκε η ροή νετρονίων στη θύρα του θαλάμου. Παρατηρήθηκε ότι η μεγαλύτερη ροή νετρονίων εμφανίζεται στον κεντρικό άξονα κατά πλάτος του λαβυρίνθου και σε ύψος στα 2,6 m από το δάπεδο του θαλάμου.

Οι υπολογισμοί από τις προσομοιώσεις συγκρίθηκαν με εμπειρικές μεθόδους υπολογισμού της ισοδύναμης δόσης νετρονίων στη θύρα του θαλάμου θεραπείας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που προτάθηκαν από τους Wu & McGinley καθώς και η σχέση που προτάθηκε από την IPEM. Οι υπολογισμοί από τον MCNP έδιναν μικρότερες τιμές της ισοδύναμης δόσης σε σχέση με τη μέθοδος των Wu & McGinley. Αντίθετα, υπήρχε καλή σύμπτωση των υπολογισμών με τη μέθοδο της IPEM.

Κατά τις πειραματικές μετρήσεις τοποθετήθηκαν δύο διαφορετικά ελάσματα ενεργοποίησης μαζί με επιβραδυντές από πλεξιγκλάς, για κάθε θέση μέτρησης στο θάλαμο θεραπείας και στο λαβύρινθο. Συγκεκριμένα ένα έλασμα από χρυσό (Au) και ένα από ίνδιο (In). Μετά την ακτινοβόληση τους από τον επιταχυντή τα ελάσματα μετρήθηκαν σε έναν ανιχνευτή γερμανίου. Τέλος μέσα από τη διαδικασία της ανάλυσης νετρονικής ενεργοποίησης (Neutron Activation Analysis), υπολογίστηκε η ροή των νετρονίων, χρησιμοποιώντας ενεργό διατομή σύλληψης νετρονίων, η οποία υπολογίστηκε από το δεύτερο στάδιο προσομοιώσεων με τον κώδικα MCNP.

Από τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι η ροή των νετρονίων μειώνεται, καθώς απομακρυνόμαστε από το ισόκεντρο. Παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα ροής νετρονίων με προσομοίωση πηγής σύμφωνα με Carinou είναι μεγαλύτερα από εκείνα με πηγή σύμφωνα με Vega-Carillo, κατά 11% για έλασμα χρυσού και 12% για έλασμα ιν-

δίου. Σε όλες τις θέσεις μέτρησης η ροή που μετρήθηκε ήταν μεγαλύτερη στα ελάσματα χρυσού σε σχέση με τη ροή στα ελάσματα ινδίου. Οι διαφορές που εντοπίζονται μεταξύ των τιμών ροής που μετρήθηκαν από κάθε έλασμα, οφείλονται στη διαφορετική απόκριση που εμφανίζει ο χρυσός από το ίνδιο, ανάλογα με το φάσμα των νετρονίων που προσπίπτει πάνω τους.

Τέλος έγινε σύγκριση των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων της ροής νετρονίων. Οι θέσεις που υπολογίστηκε η ροή νετρονίων μέσω προσομοιώσεων, επιλέχθηκαν ώστε να συμπίπτουν με τις πειραματικές θέσεις μέτρησης.

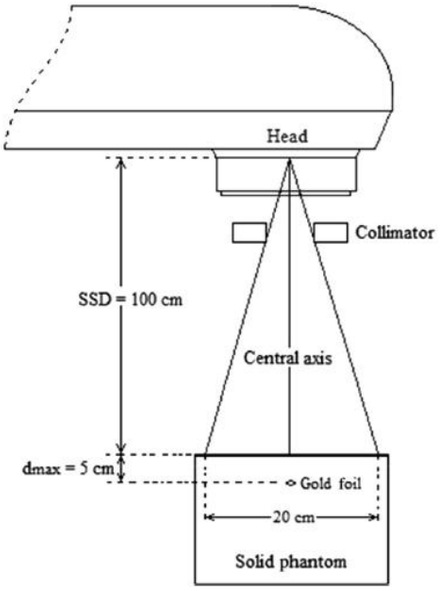
Παρατηρήθηκε ότι πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα ροής συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό για θέσεις μέτρησης/υπολογισμού κοντά στο ισόκεντρο και στον κυρίως θάλαμο θεραπείας. Σε θέσεις κατά μήκος του λαβυρίνθου παρατηρείται μεγαλύτερη εξασθένηση της ροής νετρονίων σε σχέση με τη ροή στο ισόκεντρο, από το πείραμα σε σύγκριση με τις προσομοιώσεις (κατά ένα παράγοντα του 3 στο τέλος του λαβυρίνθου). Η διαφορά αυτή αποδίδεται στο γεγονός, ότι η σύσταση των υλικών θωράκισης του λαβυρίνθου προσομοιώθηκε μέσω βιβλιογραφικών δεδομένων.

Λαμβάνοντας υπόψη την απλούστευση στην προσομοίωση της κεφαλής του γραμμικού επιταχυντή και της πηγής νετρονίων, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θεωρούνται ικανοποιητικά. Επομένως, προτείνεται μια μέθοδος αποτελεσματική ως προς τον υπολογιστικό χρόνο για την εκτίμηση της δόσης νετρονίων σε γραμμικούς επιταχυντές.

Μία πρόταση για την επέκταση της παρούσας μελέτης είναι η τοποθέτηση ενός ομοιώματος νερού (water phantom), στο ισόκεντρο του γραμμικού επιταχυντή (Σχήμα 49). Το ομοίωμα νερού προσομοιώνει το σώμα του ασθενούς κατά τη διάρκεια της θεραπείας. Το νερό εκτός από σκεδαστής των νετρονίων (ελαστικές σκεδάσεις, λόγω παρουσίας Η), είναι και πηγή φωτονετρονίων (ενεργειακό κατώφλι αντίδρασης $(\gamma, n)^{16}O$ είναι 15,66 MeV) . Συνεπώς θα ήταν ενδιαφέρουσα η μελέτη της επίδρασής του, στη ροή των νετρονίων στο θάλαμο θεραπείας και στο λαβύρινθο.

Άλλη πρόταση αποτελεί η επανάληψη των μετρήσεων με διαφορετικά μεγέθη πεδίων και σε γραμμικούς επιταχυντές διαφορετικής ενέργειας.

Όπως αναφέρθηκε στη μέθοδο της μελέτης κατά τις προσομοιώσεις που έγιναν παραλείφθηκε η θύρα του θαλάμου θεραπείας. Συνεπώς μία πρόταση για μελλοντική έρευνα είναι η επανάληψη της παρούσας μελέτης, περιλαμβάνοντας και τη προσομοίωσή της θύρας, ώστε να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς και τυχόν οπισθοσκεδάσεις νετρονίων από τη θωράκισή της.



Σχήμα 49. Πειραματική διάταξη μέτρησης ροής νετρονίων, με τη χρήση ενός ομοιώματος RW3 (Yucel, et al. 2016).

ΣΤ. ΒΙΒΙΟΓΡΑΦΙΑ

Barquero, R., R. Mendez, H.R. Vega-Carrillo, M.P. Iñiguez, and T.M. Edwards (2005). "Neutron spectra and dosimetric features around an 18 MV linac accelerator." *Health Physics*, 88, 48-58.

Capote, R., K.I. Zolotarev, V.G. Pronyaev, and A. Trkov (2012). "Updating and extending the IRDF-2002 dosimetry library." *Journal of ASTM International*, 9, 1-9.

Carinou, E., V. Kamenopoulou, I.E. Stamatelatos (1999). "Evaluation of neutron dose in the maze of medical electron accelerators." *Medical Physics*, 26, 2520–2525.

Chionis, D.A., M.I. Savva, K. Karfopoulos, and M.J. Anagnostakis (2014). "Determination of true coincidence correction factors using Monte-Carlo simulation techniques." *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 29, 8–13.

Deye, J.A., and F.C. Young (1977). "Neutron production from a 10 MV medical line." *Physics in Medicine & Biology*, 22, 90.

Esposito, A., R. Bedogni, L. Lembo, and M. Morelli (2008). "Determination of the neutron spectra around an 18MV medical LINAC with a passive Bonner sphere spectrometer based on gold foils and TLD pairs." *Rad Measurements"* , 33, 1038-1043.

Facure, A., R.C. Falcao, A.X. Silva, V.R. Crispim, and J.C. Vitorelli (2005). "A study of neutron spectra from medical linear accelerators." *Applied Radiation and Isotopes*, 62, 69–72.

Gilmore, G., and J. Hemingway (1995). *Practical gamma-ray spectrometry.* Wiley & Sons.

Goorley, T (2003). *Criticality Calculations with MCNP5: A Primer.* Los Alamos National Laboratory.

Gur, D., J.C. Rosen, A.G. Bukovitz, and A.W. Gill (1978). "Fast and slow neutrons in an 18-MV photon beam from a Philips SL/75-20 linear accelerator." *Medical Physics*, 5, 221–222.

Hsu, F.U., Y.L. Chang, M.T. Liu, S.S. Huang, and S.S. Yu (2010). "Dose estimation of the neutrons induced by the high energy medical linear accelerator using dual-TLD chips." *Radiation Measurements*, 45, 739–741.

International Atomic Energy Agency (2000). *Handbook on photonuclear data for applications Cross-sections and spectra.* IAEA-TECDOC-1178.

International Atomic Energy Agency. *National Nuclear Data Center.* https://www-nds.iaea.org/.

International Atomic Energy Agency (2006). *Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities, SRS No47.*

International Commission on Radiological Protection (1996). *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation.* ICRP Publication 74.

Institute of Physics and Engineering in Medicine (1997). *The design of radiotherapy treatment room facilities.* IPEM Report No. 75 , Institute of Physics and Engineering in Medicine.

Knoll, G.F. (2010). *Radiation Detection and Measurement.* John Wiley & Sons, Inc.

Konefal, A., M. Dybek, W. Zipper, W. Lobodziec, and K. Szczucka (2005). "Thermal and epithermal neutrons in the vicinity of the Primus Siemens biomedical accelerator." *Nukleonika*, 50, 73–81.

Lin, J.P., T.C. Chu, S.Y. Lin, and M.T. Liu (2001). "The measurement of photoneutrons in the vicinity of a Siemens Primus linear accelerator." *Applied Radiation and Isotopes*, 55, 315–321.

Liu, W.S., S-P Changlai, L-K Pan, H-C Tseng, and C.C. Chen (2011). "Thermal neutron fluence in a treatment room with a Varian linear accelerator at a medical university hospital." *Radiation Physics and Chemistry*, 80, 917-922.

McCall, R.C., and W.P. Swanson (1979). "Neutron production and leakage from medical electron accelerators.".

McGinley, P.H., M. Wood, M. Mills, and R. Rodriguez (1976). "Dose levels due to neutrons in the vicinity of high-energy medical accelerators." *Medical Physics*, 3, 397–402.

Mohammadi, N., H. Miri-Hakimabad, L. Rafat-Motavlli, F. Akbari, and S. Abdollahi (2015). "Neutron spectrometry and determination of neutron." *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 304, 1001-1008.

National Council on Radiation Protection and Measurements (2005). "Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities." Report No 151.

Palta, J.R., K.R. Hogstrom, and C. Tannanonta (1984). "Neutron leakage measurements from a medical linear accelerator." *Medical Physics*, 11, 498–501.

Paredes, L., R. Genis, M. Balcazar, L. Tavera, and E. Camacho (1999). "Fast neutron leakage in 18 MeV medical electron accelerator." *Radiation measurements*, 31, 475–478.

Podgorsak, E.B. (2005). *Radiation Oncology Physics.* International Atomic Energy Agency.

Tosi, G., Torresin, A., Agosteo, S., Para, A. Foglio, Sangiust, V., Zeni, L. and Silari, M. (1991). "Neutron measurements around medical electron accelerators by active and passive detection techniques." *Medical Physics*, 18, 54–60.

Uwamino, Y., T. Nakamura, T. Ohkubo, and A. Hara (1986). "Measurement and calculation of neutron leakage from a medical electron accelerator." *Medical Physics*, 13, 374–384.

Vega-Carrillo, H.R., S.A. Martınez-Ovalle, A.M. Lallena, G.A. Mercado, and J.L. Benites-Rengifo (2012). "Neutron and photon spectra in LINACs." *Applied Radiation and Isotopes*, 71, 75-80.

X-5 Monte Carlo Team (2003). "MCNP- A general Monte Carlo N-Particle transport code, Version 5." LA-UR-03-1987.

Yucel, H., I. Cobanbas, A. Kolbasi, A.O. Yuksel, and V. Kaya (2016). "Measurement of Photo-Neutron Dose from an 18 MV Medical Linac Using a Foil Activation Method in View of Radiation Protection of Patients." *Nuclear Engineering and Technology*, 48, 525–532.

Καλέφ-Εζρά, Τ (2016-2017). "Δοσιμετρία Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών." Σημειώσεις από το Δ.Δ.Π.Μ.Σ. στην Ιατρική Φυσική-Ακτινοφυσική.

Παπαδόπουλος, Κωνσταντίνος (2018) . "Μέτρηση ροής νετρονίων σε ιατρικό γραμμικό επιταχυντή 18 MV." Διπλωματική Εργασία, ΔΔΠΜΣ 'ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ-ΑΚΤΙΝΟΦΥΣΙΚΗ'.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Σύσταση υλικών προσομοίωσης

Δίδονται οι συστάσεις των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του θαλάμου και των επιβραδυντών (Goorley 2003):

Πίνακας Α1. Σύσταση του σκυροδέματος (NBS Ordinary).

CONCRETE (NBS Ordinary) Πυκνότητα=2,35 g/cm^3		
Νουκλίδιο	**ZAID**	**% Wt. Fraction**
H	1001	0,0056
O	8016	0,4956
Si	14028	0,3135
Al	13027	0,0456
Na	11023	0,0171
Ca	20040	0,0826
Fe	26056	0,0122
K	19000	0,0192
Mg	12000	0,0024
S	16032	0,0012

Πίνακας Α2. Σύσταση του Αέρα (Air).

AIR (ΑΕΡΑΣ) Πυκνότητα=0,0013 g/cm^3		
Νουκλίδιο	**ZAID**	**% Wt. Fraction**
N	7014	0,780
O	8016	0,2095
Ar	18000	0,0093

Πίνακας Α3. Σύσταση του Ξύλου (CELOTEX).

ΞΥΛΟ (CELOTEX) Πυκνότητα=0,25 g/cm^3		
Νουκλίδιο	**ZAID**	**Atoms per Molecule**
C	6012	6
H	1001	10
O	8016	5

Πίνακας Α4. Σύσταση του Iron.

STEEL, CARBON Πυκνότητα=7,82 g/cm^3		
Νουκλίδιο	**ZAID**	**% Wt. Fraction**
C	6012	0,005
Fe	26056	0,995

Πίνακας Α5. Σύσταση του Πλεξιγκλάς

PLEXIGLAS Πυκνότητα=1,18 g/cm^3		
Νουκλίδιο	**ZAID**	**Atoms per Molecule**
C	6012	5
H	1001	8
O	8016	2

.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Υπολογισμός σταθμισμένου μέσου

Στο παρόν παράρτημα περιγράφεται η διαδικασία στάθμισης μιας δέσμης τιμών, ο υπολογισμός δηλαδή του σταθμισμένου μέσου των τιμών αυτών και της αντίστοιχης αβεβαιότητας, ο οποίος βασίζεται στη μεθοδολογία από (Gilmore and Hemingway 1995).
Έστω ότι i μετρήσεις της παραμέτρου x δίνουν

$$x_1 \pm \delta x_1,\ x_2 \pm \delta x_2, \ldots\ldots\ x_i \pm \delta x_i$$

Όπου:

$x_1, x_2 \ldots\ldots x_i$: οι μετρούμενες τιμές του μεγέθους και

$\delta x_1, \delta x_2 \ldots\ldots \delta x_i$: οι αντίστοιχες αβεβαιότητες.

Στην περίπτωση που οι αβεβαιότητες είναι ίσες μεταξύ τους, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η μέση τιμή τους. Αν όμως οι αβεβαιότητες διαφέρουν, δεν είναι στατιστικά σωστός ο απλοϊκός αυτός υπολογισμός, καθώς λαμβάνει εξίσου υπόψη όλες τις τιμές, ανεξαρτήτως του αν αυτές συνοδεύονται από μικρό ή μεγαλύτερο σφάλμα. Η ορθή διαδικασία είναι ο υπολογισμός του «σταθμισμένου» μέσου, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i w_i}{\sum w_i}$$

Όπου:

w_i: συντελεστές στάθμισης, οι οποίοι είναι ίσοι με το αντίστροφο κλάσμα της απόκλισης της κάθε τιμής, δηλαδή

$$w_i = \frac{1}{(\delta x_i)^2}$$

Η τυπική απόκλιση της σταθμισμένης μέσης τιμής θα δίνεται τότε από τη σχέση:

$$\mathrm{var}(x) = \frac{1}{\sum w_i}$$

η οποία ονομάζεται και «εσωτερική διακύμανση» (internal variance), διότι λαμβάνει υπόψη μόνο τις αβεβαιότητες των τιμών. Διαφορετικά, αν συνυπολογιστεί και η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή, προκύπτει η «εξωτερική διακύμανση», η οποία δίνεται από τη σχέση

$$\mathrm{var}(x) = \frac{\sum \left[x_i - \bar{x}\right]^2 w_i}{\sum w_i}$$

Ανάμεσα στις δύο, επιλέγεται η αβεβαιότητα με τη μεγαλύτερη τιμή, ώστε να αποφεύγεται υποεκτίμηση του σφάλματος. Η πλήρης έκφραση του αποτελέσματος περιλαμβάνει τελικά το σταθμισμένο μέσο και την αντίστοιχη αβεβαιότητα

$$\bar{x} \pm \mathrm{var}(x)$$

Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος και η αβεβαιότητα δέσμης τιμών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Κώδικες εικονικών πηγών (Input Files)

Αρχείο εισόδου για προσομοίωση πηγής σύμφωνα με (Carinou, et al. 1999):

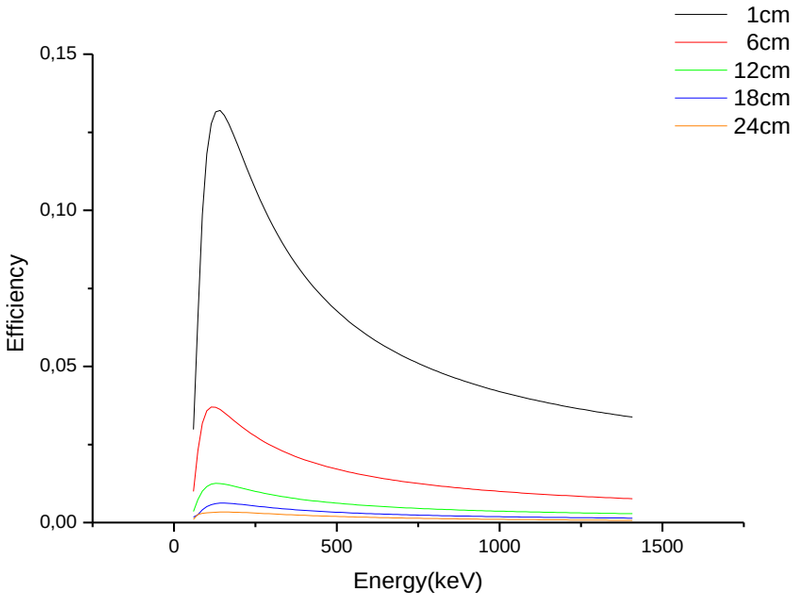
```
sdef  erg=d1  pos= 0. 0. 100.  cell=56 rad=d2  par=1
si1   0.001  0.250   0.500   0.750   1.000   1.250   1.500
      1.750   2.000   2.250   2.500   2.750   3.000   3.250
      3.500   3.750   4.000   4.250   4.500   4.750   5.000
      5.250   5.500   5.750   6.000   6.250   6.500   6.750
      7.000   7.250   7.500   7.750   8.000   8.250   8.500
      8.750   9.000   9.250   9.500   9.750 10.000 10.250
     10.500 10.750 11.000 11.250 11.500 11.750 12.000
     12.500 12.750 13.000 13.250 13.500 13.750 14.000
     14.250 14.500 14.750 15.000 15.250 15.500 15.750
     16.000 16.250 16.500 16.750 17.000 17.250 17.500
     17.750 18.000
sp1  0.000000 0.082212 0.147700 0.149282 0.127110 0.099632
      0.074456 0.054025 0.038502 0.027188 0.019174 0.013615
      0.009819 0.007260 0.005552 0.004422 0.003679 0.003193
      0.002878 0.002674 0.002542 0.002458 0.002403 0.002369
      0.002347 0.002333 0.002324 0.002318 0.002315 0.002313
      0.002311 0.002310 0.002310 0.002309 0.002309 0.002309
      0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309
      0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309
      0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309
      0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309
      0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309
      0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309 0.002309
si2  0  10
```

Αρχείο εισόδου για προσομοίωση πηγής σύμφωνα με (Vega-Carrillo, et al. 2012):

```
sdef  erg=d1  pos= 0. 0. 100.  par=1
si1  1E-20 1E-09 2E-08  5E-08  6E-08  7E-08  8E-08  1E-07 2E-07
     5E-07 7E-07 1E-06   2E-06  5E-06  7E-06  1E-05  2E-05
     5E-05 7E-05 1E-04   2E-04  5E-04  7E-04  1E-03  2E-03
     5E-03 7E-03 1E-02   2E-02  5E-02  1E-01  0.125   0.375
     0.625  0.875  1.125   1.375   1.625   1.875   2.125   2.375 2.625
     2.875  3.125  3.375   3.625   3.875   4.125   4.375   4.625 4.875
     5.125  5.375  5.625   5.875   6.125   6.375   6.625   6.875 7.125
     7.375  7.625  7.875   8.125   8.375   8.625   8.875   9.125 9.375
     9.625  9.875  10.125 10.375 10.675 10.875 11.125 11.375
    11.675 11.875 12.125 12.375 12.675 12.875 13.125
    13.375 13.675 13.875 14.125 14.375 14.675 14.875 15.125
    15.375 15.675 15.875 16.125 16.375 16.625 16.875 17.125
    17.375 17.625 17.875 18.000
sp1  0.000000 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
      0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001886 0.001886
      0.001886 0.001888 0.001889 0.001891 0.001895 0.001909
      0.001925 0.001942 0.001986 0.002120 0.002287 0.002454
      0.002887 0.004214 0.005858 0.007486 0.011641 0.023755
      0.045147 0.062089 0.103505 0.125156 0.114036 0.092583
      0.070649 0.051934 0.037301 0.026434 0.018636 0.013174
      0.009417 0.006869 0.005160 0.004024 0.003275 0.002784
      0.002465 0.002257 0.002123 0.002037 0.001982 0.001947
      0.001924 0.001910 0.001901 0.001895 0.001891 0.001889
      0.001888 0.001887 0.001886 0.001886 0.001886 0.001885
      0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
      0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
      0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
      0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
      0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885 0.001885
      0.001885 0.001885
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Βαθμονόμηση απόδοσης ανιχνευτή HpGe για σημειακή πηγή σε διάφορες αποστάσεις

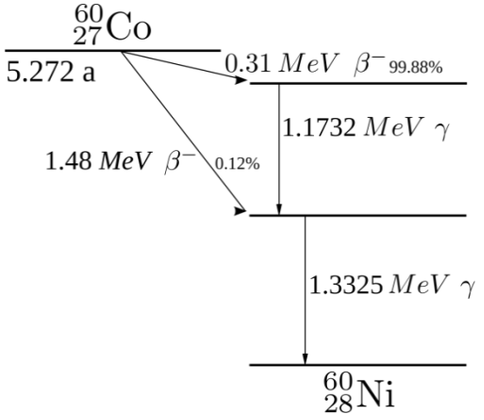


Σχήμα Δ1. Καμπύλες απόδοσης για τις αντίστοιχες αποστάσεις πηγής-ανιχνευτή HpGe.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ραδιοϊσοτόπου, που υπόκειται στο φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης είναι το ^{60}Co.



Σχήμα Ε1. Απλοποιημένο διάγραμμα διάσπασης του ^{60}Co. Παρουσιάζονται μόνο τα σημαντικότερα φωτόνια.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο πυρήνας παραμένει διεγερμένος στις ενδιάμεσες αυτές ενεργειακές στάθμες για χρόνους της τάξεως των psecs ή και nsecs σε άλλες περιπτώσεις. Αυτό το χρονικό διάστημα, που ονομάζεται χρόνος ημιζωής της στάθμης, είναι πολύ μικρό σε σχέση με τον χρόνο απόκρισης της ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιείται, με αποτέλεσμα ο ανιχνευτής - εφόσον τα φωτόνια από την ίδια διάσπαση αλληλεπιδράσουν με αυτόν - να μην έχει τη δυνατότητα να τα ανιχνεύσει ως δύο ανεξάρτητα φωτόνια, αλλά ως ένα με ενέργεια το άθροισμα των ενεργειών που αποτίθενται στον ανιχνευτή. Οι ανιχνευτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται έχουν χρόνο διάκρισης της τάξεως μερικών μsecs. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που τα δύο φωτόνια ενέργειας 1173keV και 1332keV, του ισοτόπου ^{60}Co, αποθέσουν ολόκληρη την ενέργεια στον ανιχνευτή, ανιχνεύεται ένα φωτόνιο συνολικής ενέργειας 2505keV.

Όταν το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης είναι έντονο, τα εκπεμπόμενα φωτόνια από τον ίδιο κλάδο διάσπασης ισοτόπου που περιέχονται στο αναλυόμενο δείγμα, δύναται να ανιχνευτούν ως ένα, αθροιστικό, με αποτέλεσμα στο εξαγόμενο ενεργειακό φάσμα να εμφανίζονται φωτοκορυφές που στην πραγματικότητα μπορεί να μην υφίσταται. Έτσι, οι φωτοκορυφές των μεμονωμένων φωτονίων (στο παράδειγμα του ^{60}Co τα φωτόνια ενέργειας 1173keV και 1332keV) είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές που βλέπουμε αν δεν υπήρχε επιρροή του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, ενώ η φωτοκορυφή που αντιστοιχεί στο αθροιστικό φωτόνιο είναι αυξημένη (στο παράδειγμα του ^{60}Co το φωτόνιο ενέργειας 2505keV). Οι δύο αυτές περιπτώσεις που περιγράφηκαν, αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία με τους όρους 'μειωμένη' και 'αυξημένη' φωτοκορυφή, 'summing out' και 'summing in' effect, αντίστοιχα. Στην περίπτωση της 'μειωμένης' φωτοκορυφής, λόγω του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, οι κρούσεις που προέρχονται από φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας, καταγράφονται κακώς εκτός της αναμενόμενης φωτοκορυφής του ενεργειακού φάσματος, συνεπώς εμφανίζονται μειωμένες σε σχέση με την πραγματικότητα. Στην περίπτωση της 'αυξημένης' φωτοκορυφής, κρούσεις, που προέρχονται από την ταυτόχρονη ανίχνευση μεμονωμένων φωτονίων, καταγράφονται σε φωτοκορυφή του φάσματος που αντιστοιχεί σε ενέργεια φωτονίου, το οποίο μπορεί να μην υφίσταται στην πραγματικότητα (Chionis, et al. 2014).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

Μετρήσεις ρυθμού ισοδύναμης δόσης φωτονίων και νετρονίων στη θύρα του θαλάμου

Για πληρότητα παρατίθενται μετρήσεις ρυθμού ισοδύναμης δόσης νετρονίων και φωτονίων που πραγματοποιήθηκε έξω από τη θύρα του θαλάμου που είναι εγκατεστημένος ο γραμμικός επιταχυντής στον ‘Άγιο Σάββα’.

Η ακτινοβόληση πραγματοποιήθηκε με ενέργεια φωτονίων 18 MV στα 600 MU/min. Το μέγεθος του πεδίου επιλέχθηκε να είναι (40×40) cm^2 στο ισόκεντρο του γραμμικού. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ένα slab phantom διαστάσεων (20×20) cm^2 σε θέση ακριβώς έξω από τη θύρα. Ως ανιχνευτής χρησιμοποιήθηκε ένας Berthold LB 6411.

Οι μετρήσεις έδειξαν ρυθμό ισοδύναμης δόσης φωτονίων ίσο με 25μSv/h και νετρονίων ίσο με 3,6μSv/h.