



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ  
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**Μελέτη προσομοίωσης ακτινοβολίας δέσμης  
ηλεκτρονίων στον επιταχυντή  
FREE ELECTRON LASER-FEL  
της Συνεργασίας CompactLight**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της  
Άρτεμις Ν. Ταξείδη

**Επιβλέπων :** Ευάγγελος Γαζής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ  
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**Μελέτη προσομοίωσης ακτινοβολίας  
δέσμης ηλεκτρονίων στον επιταχυντή  
FREE ELECTRON LASER-FEL  
της Συνεργασίας CompactLight**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της  
**Άρτεμις Ν. Ταξείδη**

**Επιβλέπων : Ευάγγελος Γαζής**  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15η Δεκεμβρίου 2022

.....  
Ε. Γαζής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Η. Γλύτσης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ι. Ξανθάκης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2022

.....  
**Ταξείδη Άρτεμις**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ταξείδη Άρτεμις, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η ακτινοβολία στα διάφορα τμήματα του επιταχυντή FEL του ερευνητικού προγράμματος CompactLight μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo με το πρόγραμμα FLUKA. Αρχικά, γίνεται μια εισαγωγή στις διατάξεις επιταχυντών και στα λέιζερ ελευθέρων ηλεκτρονίων. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή του προγράμματος CompactLight και εν συνεχεία, η υπό μελέτη διάταξη αναλύεται στα τρία βασικά της τμήματα τα οποία περιγράφονται ξεχωριστά. Έπειτα ορίζονται κάποιες βασικές έννοιες, σχετικές με την διάδοση και την αλληλεπίδραση μιας δέσμης σωματιδίων, ενώ εισάγονται βασικές ποσότητες δοσιμετρίας, εκ των οποίων, στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας για διαφόρων τύπων σωματίδια. Εν συνεχεία, περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του προγράμματος FLUKA και του περιβάλλοντος γραφικών Flair καθώς και οι δυνατότητες του οποίου θα χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια της εργασίας. Κατόπιν, με σκοπό την επαλήθευση ορθής λειτουργίας του προγράμματος, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις όμοιες με αυτές που διεξήχθησαν από το Εθνικό Ινστιτούτο Πυρηνικής Έρευνας της Πολωνίας, πάνω σε έναν καινούργιο φορητό επιταχυντή ηλεκτρονίων και πραγματοποιήθηκε ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων, καθώς και περεταίρω διερεύνηση. Τέλος, έγινε μελέτη της ισοδύναμης δόσης ακτινοβολίας στα τρία τμήματα του επιταχυντή FEL και έγιναν συγκρίσεις για διαφορετικές ενέργειες δέσμης καθώς και για απορροφητές ηλεκτρονίων από διαφορετικά υλικά.

**Λέξεις-Κλειδιά:** επιταχυντής ελευθέρων ηλεκτρονίων (FEL), πρόγραμμα FLUKA, Flair, προσομοίωση Monte Carlo, δοσιμετρία, ισοδύναμη δόση, φορητός επιταχυντής ηλεκτρονίων, απορροφητής ηλεκτρονίων



## Abstract

In the present thesis, radiation in the various sections of the FEL accelerator of the CompactLight research program is studied through Monte Carlo simulations using the FLUKA program. First, an introduction to accelerator devices and free electron lasers is given. A brief description of the CompactLight program follows, and then the device under study is analyzed in its three main parts, which are described separately. *Then* some basic concepts related to the propagation and interaction of a beam of particles are defined, while some basic dosimetry quantities are defined, among which, in this work, the equivalent dose for various types of particles will be utilized. Next, the basic characteristics of the FLUKA program and the Flair graphical environment are described, along with the capabilities that will be used in the context of this thesis. Subsequently, in order to verify the correct operation of the program, simulations similar to those conducted by the National Institute for Nuclear Research in Poland were performed on a new portable electron accelerator, and a qualitative comparison of the results as well as further investigation was carried out. Finally, a study of the equivalent dose in the three sections of the FEL accelerator was conducted, and comparisons were made for different beam energies as well as for electron absorbers made of different materials.

**Keywords:** Electron Free-Electron Laser (FEL) accelerator, FLUKA program, Flair, Monte Carlo simulation, dosimetry, equivalent dose, portable electron accelerator, electron absorber





## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γαζή αρχικά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής αυτής και έπειτα για την άψογη συνεργασία κατά την εκπόνησή της καθώς και την καθοδήγηση του για την μετέπειτα σταδιοδρομία μου. Επίσης ευχαριστώ την οικογένειά μου που με στήριξε σε όλα τα επίπεδα κατά την περίοδο συγγραφής της παρούσας εργασίας, όπως άλλωστε και σε όλες τις δύσκολες περιόδους της ζωής μου.



## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	6
Abstract	8
Ευχαριστίες	10
Πίνακας περιεχομένων	12
Πίνακας εικόνων	15
Πίνακας πινάκων	19
1. Εισαγωγή στους επιταχυντές και τα λέιζερ ελευθέρων ηλεκτρονίων	20
1.1 Επιταχυντές σωματιδίων	20
1.1.1 Κυκλικοί επιταχυντές	20
1.1.2 Γραμμικοί επιταχυντές	20
1.2 Free electron lasers	20
2. Αντικείμενο μελέτης – επιταχυντής FEL	21
2.1 Το ερευνητικό πρόγραμμα CompactLight	21
2.2 Περιγραφή διάταξης	22
3. Θεμελιώδεις έννοιες σχετικά με την διάδοση και αλληλεπίδραση δέσμης ηλεκτρονίων	25
3.1 Ενεργός διατομή	25
3.2 ανασχετική ισχύς ηλεκτρονίων	26
3.3 εμβέλεια ηλεκτρονίων	28
3.4 αλληλεπίδραση δευτερογενών νετρονίων με την ύλη	28
4. Ραδιενέργεια επιταχυντή	29
4.1 Δοσιμετρία	29
4.2 Ποσότητες δοσιμετρίας	29

5. Υπολογιστικές προσομοιώσεις	31
5.1 Μέθοδος Monte Carlo	31
5.2 Πρόγραμμα FLUKA	32
5..2.1 Περιγραφή του εργαλείου προσομοιώσεων FLUKA και του εικονικού περιβάλλοντος Flair	32
5.2.2 Βασική είσοδος και ορισμός γεωμετρίας του πειράματος	33
5.2.3 Φυσική, διάδοση σωματιδίων και biasing	34
5.2.4 Ανάκτηση και ερμηνεία αποτελεσμάτων	34
6. Ποιοτική επιβεβαίωση αποτελεσμάτων του FLUKA από άλλη μελέτη	35
6.1 Περιγραφή της γεωμετρίας του πειράματος	35
6.2 Περιγραφή των εκτελεσθέντων προσομοιώσεων	37
6.3 Διευκρινήσεις και περιορισμοί περί των εκτελεσθέντων προσομοιώσεων	37
6.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	39
6.4.1 Σύγκριση μεταξύ αποτελεσμάτων δημοσίευσης και παρούσας εργασίας	39
6.4.2 Μελέτη για διαφορετικές ενέργειες δέσμης και πάχος πετάσματος	42
6.4.2.1 Σύγκριση μεταξύ δέσμης ηλεκτρονίων 12MeV και 9MeV	42
6.4.2.2. Σύγκριση δόσης ακτινοβολίας για διαφορετικού πάχους απορροφητή	44
7. Μελέτη ραδιενέργειας επιταχυντή	47
7.1 Στον εισαγωγέα δέσμης	
7.2 Για απορροφητές ηλεκτρονίων από διαφορετικά υλικά	56
7.2.1 Σύγκριση ισοδύναμης δόσης με και χωρίς την χρήση απορροφητή ηλεκτρονίων από αλουμίνιο	57
7.2.2 Συγκρίσεις μεταξύ των τριών υλικών απορροφητή	60
7.3 Σύγκριση για τις διάφορες ενέργειες δέσμης στην κύρια επιταχυντική μονάδα	65

7.4 Σύγκριση για τις ακτίνες X στο χώρο πειραμάτων	68
8. Συμπεράσματα	71
9.Βιβλιογραφία	72
Παράρτημα Α	74
Παράρτημα Β	79

## Πίνακας εικόνων

- Εικόνα1:** Διάταξη κυματιστή (undulator): απεικονίζεται 1.το μήκος περιόδου κυματιστή 1, 2. η εγκάρσια ως προς τον άξονα διάδοσης ημιτονοειδής ταλάντωση των ηλεκτρονίων και 3. η σύμφωνη εκπομπή φωτονίων[3] **21**
- Εικόνα 2:** Σχηματικό της επιταχυντικής διάταξης FEL του ερευνητικού προγράμματος CompactLight [6] **22**
- Εικόνα 3:** διάγραμμα σκέδασης δέσμης σε διαφορεική στερεά γωνία  $d\Omega$ [8] **25**
- Εικόνα 4:** μαζική ανασχετική ισχύς συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρονίου για τρία διαφορετικά υλικά. Με διακεκομμένες γραμμές η μαζική ανασχετική ισχύς λόγω ακτινοβόλησης και με συνεχής λόγω ιοντισμού [11] **27**
- Εικόνα 5:** ανασχετική ισχύς λόγω ιοντισμού(κόκκινο),λόγω ακτινοβόλησης(μπλε) και ολική (κίτρινο) συναρτήσει της ενέργειας [10] **27**
- Εικόνα 6:** εμβέλεια ηλεκτρονίου συναρτήσει της κινητικής ενέργειας του για διαφορετικά υλικά[10] **28**
- Εικόνα 7:** Υπολογισμός της αποτελεσματικής δόσης σε όργανο/ιστό λαμβάνοντας υπόψιν την ισοδύναμη δόση και τον παράγοντα βάρους του οργάνου/ιστού ενδιαφέροντος [12] **31**
- Εικόνα 8:**προβολές του χώρου λειτουργίας του επιταχυντή ηλεκτρονίων και του δωματίου ελέγχου. Πάνω εικόνα :στο επίπεδο (x,y), κάτω εικόνα: στο επίπεδο (x,z) [19] **36**
- Εικόνα 9:** Συνολική ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας A: στο [19] ,B :στην παρούσα εργασία. Πάνω: προβολή στο επίπεδο (x,z) ,κάτω: στο επίπεδο (x,y) **39**
- Εικόνα 10:** ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας σε περίπτωση τοποθέτησης πετάσματος μολύβδου πάχους 5cm.A: στο [19] ,B :στην παρούσα εργασία.Πάνω: προβολή στο επίπεδο (x,z) ,κάτω: στο επίπεδο (x,y) **40**
- Εικόνα 11:** ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας δευτερογενών νετρονίων A: στο [19] ,B :στην παρούσα εργασία.Πάνω: προβολή στο επίπεδο (x,z) ,κάτω: στο επίπεδο (x,y) **41**
- Εικόνα 12:**Συνολική ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας. A: για δέσμη 12MeV ,B : 9MeV.Πάνω: προβολή στο επίπεδο (x,z) ,κάτω: στο επίπεδο (x,y) **42**
- Εικόνα 13:** Ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας δευτερογενών νετρονίων.A: για δέσμη 12MeV, B : 9MeV. Πάνω: προβολή στο επίπεδο (x,z) ,κάτω: στο επίπεδο (x,y) **44**
- Εικόνα 14:** συνολική ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας για δέσμη 12MeV και A: χωρίς απορροφητή, B :με απορροφητή πάχους 2cm, C: 5cm.1: προβολή στο επίπεδο (x,z) ,2: στο επίπεδο (x,y) **45**
- Εικόνα 15:** χώρος προσομοιώσεων: προβολή στο επίπεδο (z,x) **48**
- Εικόνα 16:** πυκνότητα εναποτιθέμενης ενέργειας σε σωλήνα κενού : προβολή στο επίπεδο(Z,R) **49**

<b>Εικόνα 17:</b> 2D προβολή ισοδύναμης δόσης ηλεκτρονίων για δέσμη 0.3GeV. A:στο επίπεδο (z,x) B:στο (x,y)	<b>50</b>
<b>Εικόνα 18:</b> 2D προβολή ισοδύναμης δόσης φωτονίων για δέσμη 0.3GeV. A:στο επίπεδο (z,x) B:στο (x,y)	<b>51</b>
<b>Εικόνα 19:</b> 2D προβολή ισοδύναμης δόσης νετρονίων για δέσμη 0.3GeV. A:στο επίπεδο (z,x) B:στο (x,y)	<b>52</b>
<b>Εικόνα 20:</b> ισοδύναμη δόση ηλεκτρονίων :A :προβολή στον άξονα z , B:προβολή στον άξονα x	<b>53</b>
<b>Εικόνα 21:</b> ισοδύναμη δόση φωτονίων :A :προβολή στον άξονα z, B:στον άξονα χ	<b>54</b>
<b>Εικόνα 22:</b> ισοδύναμη δόση νετρονίων :A :προβολή στον άξονα z, B:προβολή στον άξονα x	<b>55</b>
<b>Εικόνα 23:</b> ο χώρος προσομοιώσεων μετά την προσθήκη απορροφητή ηλεκτρονίων έξω από τον σωλήνα κενού.	<b>56</b>
<b>Εικόνα 24:</b> ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας με απορροφητή πάχους 20cm και A:ηλεκτρονίωνB :φωτονίων, C: νετρονίων1: προβολή στο επίπεδο (ζ,χ) ,2: στο επίπεδο (x,y)	<b>57</b>
<b>Εικόνα 25:</b> Προβολή της ισοδύναμης δόσης A:ηλεκτρονίων και B:φωτονίων ως προς τον άξονα διάδοσης z για την περίπτωση με και χωρίς απορροφητή.	<b>59</b>
<b>Εικόνα 26:</b> προβολή της ισοδύναμης δόσης ηλεκτρονίων μετά την έξοδο της δέσμης από τον απορροφητή για τις τρεις περιπτώσεις υλικών :A. κατά τον άξονα διάδοσης z B. κατά τον κάθετο άξονα x.	<b>60</b>
<b>Εικόνα 27:</b> προβολή της ισοδύναμης δόσης φωτονίων μετά την έξοδο της δέσμης από τον απορροφητή για τις τρεις περιπτώσεις υλικών :A. κατά τον άξονα διάδοσης z B. κατά τον κάθετο άξονα x.	<b>61</b>
<b>Εικόνα 28:</b> προβολή της ισοδύναμης δόσης νετρονίων μετά την έξοδο της δέσμης από τον απορροφητή για τις τρεις περιπτώσεις υλικών :A. κατά τον άξονα διάδοσης z B. κατά τον κάθετο άξονα x.	<b>62</b>
<b>Εικόνα 29:</b> συνολική ροή σωματιδίων(particles/cm <sup>2</sup> /primary) εντός του απορροφητή για τις τρεις περιπτώσεις υλικών. A. προβολή κατά τον άξονα διάδοσης Z ,B. ακτινική προβολή R	<b>64</b>
<b>Εικόνα 30:</b> Συνολική ροή σωματιδίων εντός του απορροφητή για τις διάφορες ενέργειες δέσμης	<b>65</b>
<b>Εικόνα 31:</b> προβολή της ισοδύναμης δόσης ηλεκτρονίων στον χώρο: A κατά τον άξονα διάδοσης z κατά τον κάθετο άξονα x	<b>66</b>
<b>Εικόνα 32:</b> προβολή της ισοδύναμης δόσης στον χώρο: 1.φωτονίων, 2.νετρονίων	<b>67</b>
<b>Εικόνα 33:</b> Ισοδύναμη δόση φωτονίων στην περίπτωση SXR δέσμης	<b>69</b>
<b>Εικόνα 34:</b> Ισοδύναμη δόση φωτονίων στην περίπτωση HXR δέσμης	<b>70</b>
<b>Εικόνα A.1:</b> ορισμός ενέργειας ,σχήματος και θέσης δέσμης ηλεκτρονίων. Ορισμός περιοχών μαύρης τρύπας, χώρου ακτινοβολήσης , απορροφητή ηλεκτρονίων, applicator και σωλήνα κενού.	<b>74</b>



- Εικόνα A.2:** Ορισμός γεωμετρίας μαύρης τρύπας, χώρου ακτινοβολήσης, απορροφητή, προστατευτικού πετάματος, ομοιώματος από νερό, σωλήνα κενού και applicator. Εισαγωγή του υλικού μπετόν. 75
- Εικόνα A.3:** ορισμός υλικού κάθε περιοχής ρύθμιση του ενεργειακού καταφλίου διάδοσης για τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια σε κάθε περιοχή. 76
- Εικόνα A.4:** ορισμός ανιχνευτών συνολικής ισοδύναμης δόσης και ισοδύναμης δόσης νετρονίων σε όλο το χώρο και σε επιλεγμένα σημεία. 77
- Εικόνα A.5:** ορισμός ανιχνευτών συνολικής ισοδύναμης δόσης και ισοδύναμης δόσης νετρονίων σε επιλεγμένα σημεία. Ενεργοποίηση φωτοπυρηνικού φαινομένου σε όλες τις περιοχές. Ορισμός αριθμού πρωτογενών σωματιδίων της δέσμης. 78
- Εικόνα B.1:** ορισμός ενέργειας, σχήματος και θέσης δέσμης ηλεκτρονίων για τις πέντε διαφορετικές ενέργειες δέσμης που εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις. 79
- Εικόνα B.2:** Ορισμός περιοχών μαύρης τρύπας, χώρου πειράματος και σωλήνα κενού με απορροφητή. ορισμός υλικού κάθε περιοχής ρύθμιση του ενεργειακού καταφλίου διάδοσης για τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια σε κάθε περιοχή. Το υλικό σωλήνα και απορροφητή άλλαξε τρεις φορές στις προσομοιώσεις. 80
- Εικόνα B.3:** ορισμός ανιχνευτών ισοδύναμης δόσης φωτονίων, ηλεκτρονίων και νετρονίων σε όλο το χώρο. 81
- Εικόνα B.4:** ορισμός ανιχνευτών ροής σωματιδίων εντός του απορροφητή. Ορισμός αριθμού πρωτογενών ηλεκτρονίων. 82

## Πίνακας πινάκων

<b>Πίνακας 1:</b> παράμετροι δέσμης ηλεκτρονίων στον εισαγωγέα δέσμης[6]	<b>23</b>
<b>Πίνακας 2:</b> ρυθμός επαναληψιμότητας και ενέργεια εξερχόμενης δέσμης για παραγωγή HXR και SXR στην αρχική διάταξη και στις δύο αναβαθμίσεις[6]	<b>23</b>
<b>Πίνακας 3:</b> Παράμετροι εξερχόμενων δεσμών HRX και SRX [7]	<b>24</b>
<b>Πίνακας 4:</b> Παράγοντας μετατροπής προς υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης ανάλογα με τον τύπο ακτινοβολίας	<b>30</b>
<b>Πίνακας 5:</b> ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας στα τρία σημεία ενδιαφέροντος για ενέργεια δέσμης 9MeV και 12 MeV .	<b>43</b>
<b>Πίνακας 6:</b> ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας(pSv/primary) στα τρία σημεία ενδιαφέροντος για διαφορετικά πάχη απορροφητή.	<b>47</b>



# 1. Εισαγωγή στους επιταχυντές και τα λέιζερ ελευθέρων ηλεκτρονίων

## 1.1 Επιταχυντές σωματιδίων

Ένας επιταχυντής σωματιδίων είναι μια διάταξη που χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά πεδία για να επιταχύνει φορτισμένα σωματίδια σε πολύ υψηλές ταχύτητες και ενέργειες, διατηρώντας τα σε καλά εστιασμένα δέσμες[1]. Οι επιταχυντές σωματιδίων έχουν μια ευρεία γκάμα εφαρμογών. Συνήθως, μεγαλύτεροι και ισχυρότεροι επιταχυντές χρησιμοποιούνται σε πειράματα φυσικής, όπως το LHC στο CERN της Γενεύης. Μικρότεροι επιταχυντές χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές και ιατρικές εφαρμογές. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι επιταχυντών, οι γραμμικοί και οι κυκλικοί.

### 1.1.1 Κυκλικοί επιταχυντές

Στους κυκλικούς επιταχυντές, τα σωματίδια επιταχύνονται σε κυκλική τροχιά, και περιστρέφονται μέχρι να φτάσουν σε μια συγκεκριμένη ενέργεια. Η καμπυλότητα της τροχιάς τους επιτυγχάνεται με χρήση ισχυρών ηλεκτρομαγνητών. Η ενέργεια που αποκτούν τα σωματίδια μέσα στον επιταχυντή έχει ένα ανώτατο όριο. Αυτό καθορίζεται από την ακτινοβολία συχνότρου (synchrotron radiation), η οποία προκαλείται από τη σταθερή κεντρομόλο επιτάχυνση των σωματιδίων και τα οδηγεί στην εκπομπή φωτονίων και συνεπώς στην απώλεια μέρους της ενέργειάς τους.

### 1.1.2 Γραμμικοί επιταχυντές

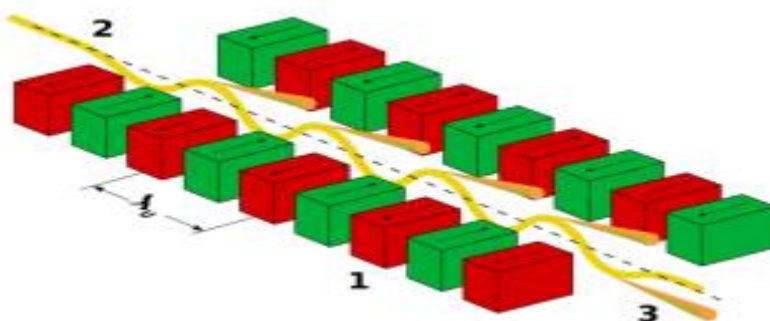
Στους γραμμικούς επιταχυντές, όπως υποδηλώνει το όνομά τους, τα σωματίδια επιταχύνονται σε ευθεία τροχιά και κατευθύνονται προς έναν στόχο ενδιαφέροντος με τον οποίο συγκρούονται. Οι εφαρμογές τους μπορεί να είναι η δημιουργία ακτίνων X από υψηλής ενέργειας δέσμες ηλεκτρονίων, η ένχυση σωματιδίων σε επιταχυντές υψηλότερης ενέργειας και πειράματα με ελαφριά σωματίδια (ηλεκτρόνια και θετικά ηλεκτρόνια, δηλαδή πρ/ωτόνια). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας γραμμικούς επιταχυντές συναντάμε στα δύο πρώτα από τα τρία στάδια της υπό μελέτης διάταξης.

## 1.2 Free electron lasers

Το λέιζερ ελευθέρων ηλεκτρονίων (FEL) αποτελεί μια πηγή φωτός που παράγει εξαιρετικά υψηλής έντασης και μικρής διάρκειας παλμούς ακτινοβολίας. Ένα FEL διαφέρει από τους υπόλοιπους τύπους λέιζερ, καθώς, αντί να χρησιμοποιεί ως μηχανισμό την εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων από διεγερμένες ατομικές ή μοριακές στιβάδες, χρησιμοποιεί ως μέσον κέρδους σχετικιστικά ηλεκτρόνια. Η ακτινοβολία παράγεται όταν ένα πακέτο (bunch) ηλεκτρονίων που διέρχονται μέσα από μια μαγνητική δομή που ονομάζεται κυματιστής (undulator). Σε ένα FEL, αυτή η ακτινοβολία ενισχύεται περαιτέρω καθώς αλληλεπιδρά ξανά με το πακέτο των ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να αρχίσουν να εκπέμπουν σύμφωνα, επιτρέποντας έτσι εκθετική αύξηση στη συνολική ένταση της ακτινοβολίας [2]. Πιο συγκεκριμένα, ο κυματιστής (εικόνα 1) παρέχει ένα ημιτονοειδές μαγνητικό πεδίο και μέσα σε αυτό το πεδίο κάθε ηλεκτρόνιο κινείται κατά μήκος μίας ημιτονοειδούς,

ταλαντούμενης τροχιάς, και εκπέμπει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, με αριθμό περιόδων ίσο με τον αριθμό περιόδων της διάταξης του κυματιστή και μήκος κύματος ίσο με το μήκος περιόδου του κυματιστή, μειωμένο κατά ένα σχετικιστικό συντελεστή, που είναι αντιστρόφως ανάλογος του τετραγώνου της ενέργειάς [3].

Η συχνότητα του λέιζερ ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ρυθμιζόμενη. Μάλιστα, έχουν το μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων από οποιονδήποτε τύπο λέιζερ, που κυμαίνεται σε μήκος κύματος από τα μικροκύματα, ακτινοβολία terahertz και υπέρυθρες, έως το ορατό φάσμα, την υπεριώδη ακτινοβολία και τις ακτίνες X [2]. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετάται FEL συχνοτήτων στο φάσμα των ακτίνων X (0.08-5nm).



Εικόνα1: Διάταξη κυματιστή (undulator): απεικονίζεται 1.το μήκος περιόδου κυματιστή 1, 2. η εγκάρσια ως προς τον άξονα διάδοσης ημιτονοειδής ταλάντωση των ηλεκτρονίων και 3. η σύμφωνη εκπομπή φωτονίων[3]

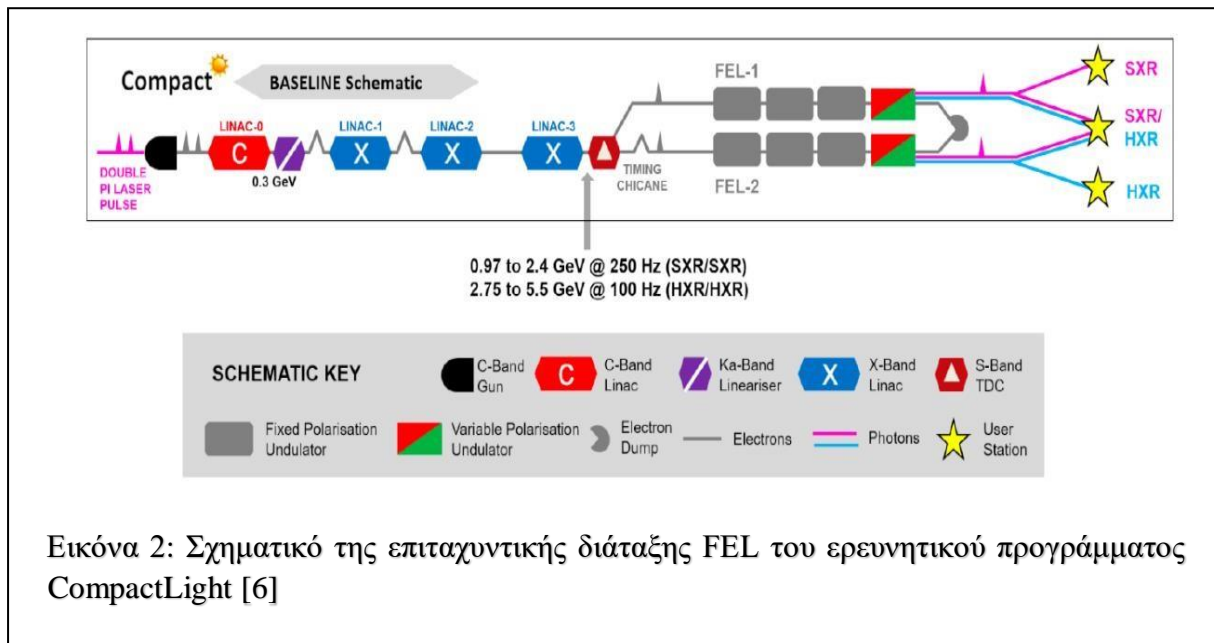
## 2. Αντικείμενο μελέτης – επιταχυντής FEL

### 2.1. Το ερευνητικό πρόγραμμα CompactLight

Το χρηματοδοτούμενο από την ΕΕ ερευνητικό πρόγραμμα σχεδίασης CompactLight, ξεκίνησε από μια ομάδα 22 Διεθνών Εργαστηρίων και δύο Βιομηχανιών τον Ιανουάριο του 2018, και συγκέντρωσε επιστήμονες από όλο τον κόσμο, εξειδικευμένους στους τομείς των επιταχυντών και των μαγνητικών δομών για την παραγωγή φωτονίων. Στόχος ήταν να χρησιμοποιηθούν οι πιο καινοτόμες τεχνολογίες για την υλοποίηση των κύριων εξαρτημάτων X- FEL, έτσι ώστε να παραδοθεί μία καινοτόμος και συμπαγής σχεδίαση ενός επιταχυντή υψηλής ενέργειας Ακτίνων-X Ελεύθερων Ηλεκτρονίων, χαμηλότερης ενεργειακής κατανάλωσης και χαμηλότερης ενέργειας δέσμης από του προϋπάρχοντες στην Ευρώπη. Η σχεδίαση βασίστηκε σε επιταχυντικές διατάξεις υψηλής βαθμίδας (100 MV/m) μέχρι τις συχνότητες X-band (12GHz), σε υπεραγωγίμο ή μη undulator (μονάδα κυματισμού της δέσμης για την εκπομπή ακτίνων X) μικρής περιόδου, και photoinjector (Φωτοεγχυτής: μονάδα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων από φωτοκάθοδο και εισαγωγή στον επιταχυντή) υψηλής φωτεινότητας. [4,5].

## 2.2 Περιγραφή διάταξης

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα τρία στάδια της επιταχυντικής διάταξης FEL του ερευνητικού προγράμματος CompactLight: εισαγωγέας δέσμης, κύρια επιταχυντική μονάδα και δύο παράλληλες μονάδες FEL.



Εικόνα 2: Σχηματικό της επιταχυντικής διάταξης FEL του ερευνητικού προγράμματος CompactLight [6]

Όπως φαίνεται στην εικόνα 2, η διάταξη αποτελείται από μια φωτοκάθοδο που ενεργοποιείται από πηγή laser ηλεκτρονίων διπλού παλμού. Οι δύο παλμοί έχουν διαφορά φάσης  $\pi$  rad και απέχουν χρονικά κατά μερικά fs. Μαζί με τον πρώτο γραμμικό επιταχυντή (LINAC-0) αποτελούν τον εισαγωγέα δέσμης (injector) της διάταξης, από τον οποίο βγαίνοντας η δέσμη είναι άρτια εστιασμένη και έχει ενέργεια 0.3GeV. Η ποιότητα της δέσμης ηλεκτρονίων στον γραμμικό επιταχυντή είναι καίριας σημασίας για την τελική επίδοση του X-FEL, εξαρτώμενη από πληθώρα παραμέτρων. Μια καλής ποιότητας δέσμη έχει μικρή εκπεμπιμότητα (emittance), υψηλή φωτεινότητα και τη δυνατότητα υψηλού ρυθμού επαναληψιμότητας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι τιμές των παραμέτρων τις δέσμης. Κάθε πακέτο (bunch) ηλεκτρονίων έχει χρονική εξάπλωση 350fs και αποτελείται από 468.113.182 ηλεκτρόνια.

Parameter	Unit	After VB and/or BC-1
Charge $Q$	pC	75
Beam energy	MeV	300
RMS Bunch Duration $\sigma_t$	fs	350
Peak Current	A	60
RMS Energy Spread	%	0.5
Projected RMS Norm. Emittance	$\mu\text{m}$	0.2
Repetition Rate	Hz	100–1000

Πίνακας 1: παράμετροι δέσμης ηλεκτρονίων στον εισαγωγέα δέσμης[6]

Στη συνέχεια, ακολουθεί η κυρία επιταχυντική μονάδα που αποτελείται από τρεις όμοιους σειριακούς γραμμικούς επιταχυντές, οι οποίοι λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων X-band .Η ενέργεια της δέσμης εξόδου από τον τρίτο γραμμικό επιταχυντή (linac3) κυμαίνεται από 0.97-2.4GeV, αν επιλέγει ρυθμός επαναληψιμότητας (repetition rate) 250Hz και 2.75-5.5GeV για ρυθμό επαναληψιμότητας 100Hz .

Στον πίνακα 2 φαίνεται αναλυτικά το εύρος ενεργειών της δέσμης ηλεκτρονίων , που είναι δυνατόν να παραχθεί ανάλογα με τον ρυθμό επαναληψιμότητας που εφαρμόζεται για την αρχική και για τις δύο αναβαθμίσεις που επιτελέστηκαν στην παραπάνω διάταξη.

OPERATING MODE	FEL-1 Wavelength	FEL-2 Wavelength	L0–L3 Rep. Rate (Hz)	L3 Output Energy (GeV)	L4 Rep. Rate (Hz)	L4 Output Energy (GeV)
<b>BASELINE</b>						
<b>B-HH</b>	HXR	HXR	100	2.75–5.5	-	-
<b>B-SS</b>	SXR	SXR	250	0.95–2.4	-	-
<b>UPGRADE-1</b>						
<b>U1-HH</b>	HXR	HXR	100	2.75–5.5	-	-
<b>U1-SS</b>	SXR	SXR	1000	0.95–2.4	-	-
<b>UPGRADE-2</b>						
<b>U2-SH</b>	SXR	HXR	100	2.75–5.5	100	0.95–2.4

Πίνακας 2: ρυθμός επαναληψιμότητας και ενέργεια εξερχόμενης δέσμης για παραγωγή HXR και SXR στην αρχική διάταξη και στις δύο αναβαθμίσεις.[6]

Τέλος, ακολουθούν δύο παράλληλες διατάξεις FEL οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα ή ξεχωριστά, καθώς οι δύο αρχικά παραγόμενοι παλμοί δέσμης μπορούν να περάσουν χωριστά στη μια ή στην άλλη διάταξη. Η καθεμιά αποτελείται από τρεις όμοιους σειριακούς μετατροπείς της ενέργειας της δέσμης σε φωτόνια (undulators) σταθερής πόλωσης και έναν μετατροπέα μεταβλητής πόλωσης. Κατά συνέπεια, η τελική δέσμη ακτινών X μπορεί να έχει σταθερή ή πόλωση που μεταβάλλεται χρονικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Ανάλογα με την ενέργεια της εισερχόμενης από την κύρια επιταχυντική διάταξη δέσμης, καθώς και τον ρυθμό επαναληψιμότητας, μπορούν να παραχθούν ακτίνες X υψηλής ενέργειας, γνωστές ως hard X-rays ή HXR ή χαμηλότερης ενέργειας, γνωστές ως soft X-rays ή SRX. Έτσι, η ίδια διάταξη μπορεί να φανεί χρήσιμη για πολλές διαφορετικές εφαρμογές, όπου απαιτούνται διαφορετικής ενέργειας ακτίνες X. Οι δέσμες αυτές μπορούν να κατευθυνθούν στον ίδιο στόχο ή σε διαφορετικούς με χρονική διαφορά λίγων fs, ενώ τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από το FEL απορροφώνται από απορροφητές ηλεκτρονίων, καθώς είναι ανεπιθύμητα. Βεβαίως, όσο αυξάνεται ο ρυθμός επαναληψιμότητας είναι δυσκολότερο να παραχθούν μεγάλες ενέργειες, για λόγους κατανάλωσης ισχύος, οπότε για παραγωγή HRX ο ρυθμός επαναληψιμότητας θα είναι σαφώς μικρότερος από ό,τι για τις SRX. Όπως όμως φαίνεται παραπάνω, ήδη από την πρώτη αναβάθμιση, έγινε δυνατή η παραγωγή SXR με ρυθμό επαναληψιμότητας 1000Hz, ενώ αρχικά δεν μπορούσε να ξεπεραστεί η τιμή των 250Hz.

Στον πίνακα 3 που ακολουθεί αποτυπώνονται οι παράμετροι των δεσμών που παράγονται από τον XFEL στην περίπτωση των HXR και των SXR. Η HXR δέσμη μπορεί να έχει ενέργεια στο εύρος 2-16keV και παράγεται με ρυθμό επαναληψιμότητας 100Hz, ενώ η SXR έχει ενέργεια 0.25-2keV και ρυθμό επαναληψιμότητας 1000Hz. Μάλιστα στην περίπτωση που οι δύο παραγόμενες δέσμες ανήκουν στην ίδια ενεργειακή κατηγορία, μπορούν να έχουν διαφορά μήκους κύματος της τάξης του 10% στην περίπτωση των SXR και 20% στην περίπτωση των HXR.

Parameter	Unit	Soft-x-ray FEL	Hard-x-ray FEL
Photon energy	keV	0.25 – 2.0	2.0 – 16.0
Wavelength	nm	5.0 – 0.6	0.6 – 0.08
Repetition rate	Hz	1000	100
Pulse duration	fs	0.1 – 50	1 – 50
Polarization		Variable, selectable	Variable, selectable
Two-pulse delay	fs	±100	±100
Two-colour separation	%	20	10
Synchronization	fs	<10	<10

Πίνακας 3: Παράμετροι εξερχόμενων δεσμών HRX και SRX [7]

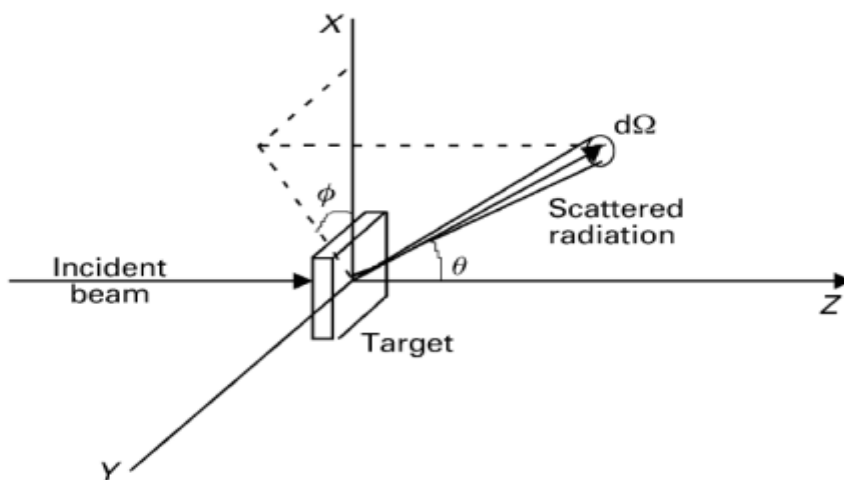


### 3. Θεμελιώδεις έννοιες σχετικά με τη διάδοση και αλληλεπίδραση δέσμης ηλεκτρονίων

#### 3.1 Ενεργός διατομή

Η ενεργός διατομή μιας αλληλεπίδρασης, συμβολίζεται ως  $\sigma$  και αποτελεί ένα μέτρο της πιθανότητας να συμβεί αυτού του τύπου η αλληλεπίδραση. Με πιο αυστηρούς όρους, όταν η αλληλεπίδραση μελετάται σωματιδιακά, η ενεργός διατομή ορίζεται ως ρυθμός σκέδασης ανά μονάδα ροής ακτινοβολίας. Ο ρυθμός σκέδασης είναι ο αριθμός των συμβάντων σκέδασης ανά μονάδα χρόνου και η ροή ακτινοβολίας είναι ο αριθμός των εισερχόμενων σωματιδίων που διασχίζουν μια επιφάνεια ανά μονάδα εμβαδού ανά μονάδα χρόνου. Όταν η αλληλεπίδραση μελετάται κυματικά, η ενεργός διατομή ορίζεται ως το κλάσμα της ισχύος του σκεδαζόμενου κύματος και του εισερχόμενου κύματος. Συνήθως, η ενεργός διατομή εκφράζεται σε μονάδες barns ( $= 10^{-28} \text{ cm}^2$ ). Σημειώνεται ότι η ενεργός διατομή δεν περιγράφει το γεωμετρικό τμήμα του σωματιδίου, αλλά εμβαδόν επιφάνειας κάθετης στον άξονα διάδοσης της δέσμης που είναι ανάλογη με την πιθανότητα σκέδασης μεταξύ δύο σωματιδίων [8,9]

Στην πυρηνική και σωματιδιακή φυσική, απαραίτητη καθίσταται η χρήση της διαφορικής και της διπλά διαφορικής ενεργού διατομής. Σε ένα εργαστηριακό περιβάλλον, αυτές μπορούν να προσδιοριστούν τοποθετώντας έναν ανιχνευτή ακτινοβολίας που βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη γωνιακή θέση και απόσταση από τον στόχο. Στο διάγραμμα σκέδασης του παρακάτω σχήματος (Σχήμα 2.1), τα σωματίδια σκεδαζονται σε ένα διαφορική στερεά γωνία  $d\Omega$ . Είναι βολική η χρήση σφαιρικών συντεταγμένων, έτσι ώστε το  $d\Omega$  να μπορεί να εκφραστεί στη γωνία σκέδασης  $\theta$  και τη αζιμουθιακή γωνία  $\phi$ , όπου η  $\theta$  μετριέται μεταξύ εισερχόμενης και σκεδαζόμενης δέσμης, δίνοντας  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ . Η διαφορική ενεργός διατομή μετριέται σε barn/sr και συμβολίζεται  $d\sigma/d\Omega$ . Η διπλά διαφορική ενεργός διατομή συμβολίζεται ως  $d^2\sigma/d\Omega dE$ , η οποία περιγράφει την πιθανότητα για ένα σωματίδιο με ενέργεια ανάμεσα σε  $E$  και  $E + \Delta E$  να σκεδαστεί σε διαφορική στερεά γωνία  $d\Omega$ . Η διαφορική ενεργός διατομή μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση στο ενεργειακό φάσμα των σκεδαζόμενων σωματιδίων [8].



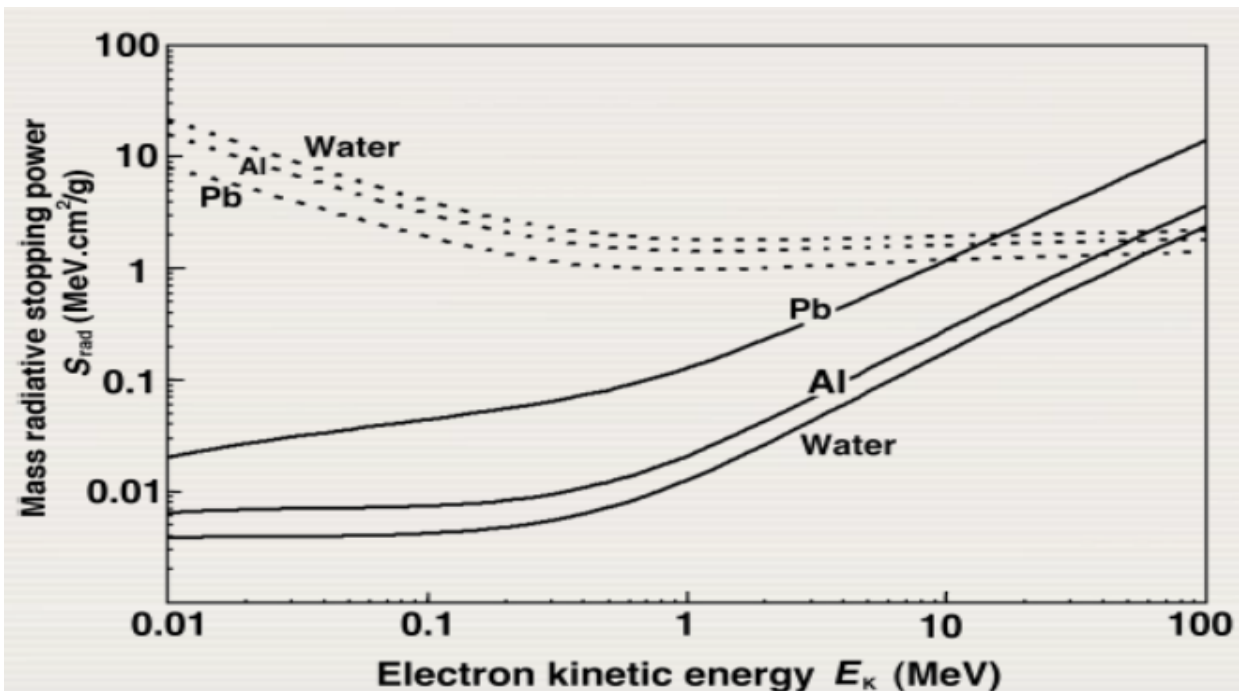
Εικόνα 3: διάγραμμα σκέδασης δέσμης σε διαφορική στερεά γωνία  $d\Omega$  [8]

### 3.2 Ανασχετική ισχύς ηλεκτρονίων

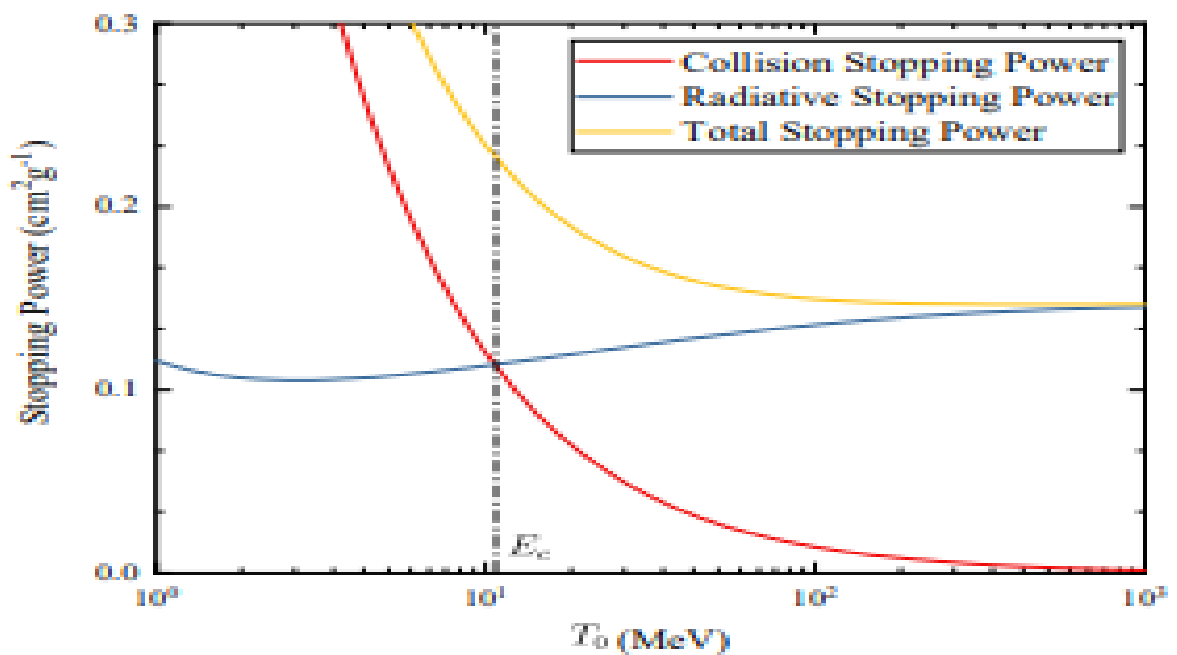
Τα ηλεκτρόνια, όπως και τα υπόλοιπα σωματίδια, χάνουν ενέργεια κατά την μεταφορά τους, όταν όταν αλληλοεπιδρούν με την ύλη. Η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα διαδρομής ορίζεται ως η ανασχετική ισχύς  $S(E)$  και δίνεται από την εξίσωση:  $S(E) = -\frac{dE}{dx}$ , όπου το αρνητικό πρόσημο εξασφαλίζει ότι  $S(E) > 0$  και συνήθως εκφράζεται σε MeV/cm. Η μαζική ανασχετική ισχύς είναι επίσης χρήσιμη ποσότητα, όπου η ανασχετική ισχύς διαιρείται με την πυκνότητα του υλικού. Αυτό είναι βολικό όταν συγκρίνουμε την ανασχετική ισχύ σε διαφορετικά υλικά, διότι η μαζική ανασχετική ισχύς είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την πυκνότητα του υλικού. Αυτή εκφράζεται κυρίως σε  $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$  [9].

Δύο είναι οι κύριοι μηχανισμοί απώλειας ενέργειας στην περίπτωση των ηλεκτρονίων: απώλεια λόγω ατομικού ιοντισμού ή ατομικής διέγερσης και απώλεια λόγω ακτινοβολήσης. Στην πρώτη περίπτωση πρόκειται για αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων μέσω δυνάμεων coulomb με τα τροχιακά ηλεκτρόνια του ατόμου, ενώ στη δεύτερη πρόκειται για εκπομπή ακτινοβολίας πέδησης όταν τα ηλεκτρόνια υπόκεινται σε μεγάλη επιτάχυνση κατά την σκέδαση από τον πυρήνα [9].

Στην παρακάτω γραφική παράσταση φαίνεται πως μεταβάλλεται η ανασχετική ισχύς συναρτήσει της ενέργειας των ηλεκτρονίων για καθέναν από τους δύο μηχανισμούς. Είναι φανερό ότι σε ένα ευρύ διάστημα ενεργειών μικρότερων των 10MeV οι απώλειες λόγω ιοντισμού είναι κυρίαρχες, ενώ για υψηλότερες ενέργειες αυτό αλλάζει. Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή ενέργειας για την οποία οι δύο απώλειες εξισώνονται και εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα με τον ατομικό αριθμό του υλικού διάδοσης των ηλεκτρονίων. Η συνολική ανασχετική ισχύς είναι το άθροισμα των δύο αυτών συνεισφορών όπως διαφαίνεται και από την εικόνα 5 [9].



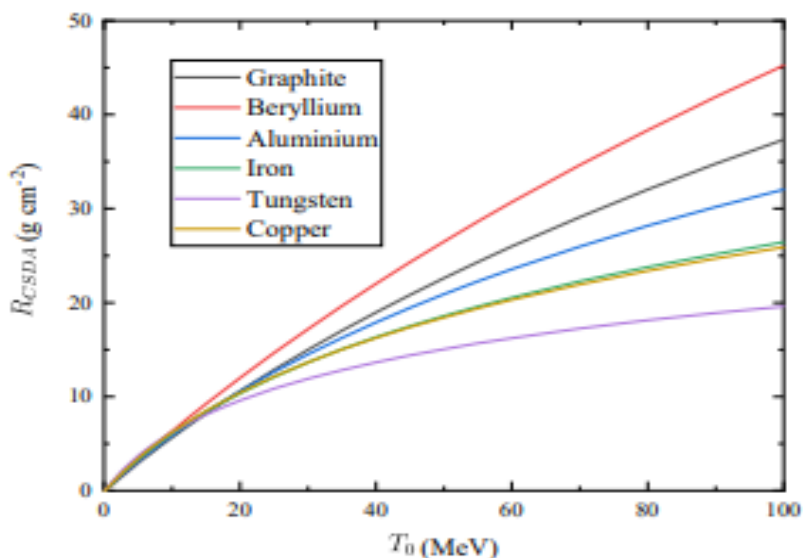
Εικόνα 4:μαζική ανασχετική ισχύς συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρονίου για τρία διαφορετικά υλικά. Με διακεκομμένες γραμμές η μαζική ανασχετική ισχύς λόγω ακτινοβόλησης και με συνεχή λόγω ιοντισμού [9]



Εικόνα 5: ανασχετική ισχύς λόγω ιοντισμού(κόκκινο),λόγω ακτινοβόλησης(μπλε) και ολική (κίτρινο) συναρτήσει της ενέργειας [10]

### 3.3 Εμβέλεια ηλεκτρονίων

Η εμβέλεια (continuous slowing down approximation ή SCDA) ορίζεται ως η απόσταση που διανύει ένα σωματίδιο μέσα στην ύλη εφόσον έχει συνεχή απώλεια ενέργειας. Στην πραγματικότητα η απώλεια ενέργειας δεν είναι συνεχής, αλλά στατιστικής φύσης. Σε αυτή την προσέγγιση όμως οι διακυμάνσεις της απώλειας ενέργειας αγνοούνται και το ποσό απώλειας ενέργειας θεωρείται σε κάθε σημείο της τροχιάς του σωματιδίου ίσο με την συνολική ανασχετική ισχύ. Έτσι, η εμβέλεια υπολογίζεται ολοκληρώνοντας το αντίστροφο της ανασχετικής ισχύος ως προς την ενέργεια. Εξαρτάται τόσο από τον τύπο και την ενέργεια του σωματιδίου, όσο και από το υλικό στο οποίο αυτό διαδίδεται. Συγκεκριμένα η εμβέλεια μειώνεται με την αύξηση του ατομικού αριθμού. Έχει ως μονάδα μέτρησης μάζα ανά επιφάνεια ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ). Από την ESTAR, που είναι βάση δεδομένων του NIST για ηλεκτρόνια, λήφθηκαν δεδομένα από την πηγή [10] για το CSDA range συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρονίου και για διάφορα στοιχεία που αναπαριστούνται σε κοινό γράφημα (εικόνα 6).



Εικόνα 6: εμβέλεια ηλεκτρονίου συναρτήσει της κινητικής ενέργειας του για διαφορετικά υλικά [10]

### 3.4 Αλληλεπίδραση δευτερογενών νετρονίων με την ύλη

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1, για δέσμη ηλεκτρονίων ενέργειας μεγαλύτερης της κρίσιμης τιμής οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας πέδησης γίνονται σημαντικές. Τα παραγόμενα φωτόνια, όταν έχουν ενέργεια μεγαλύτερη του φωτοπυρηνικού κατωφλίου (τάξης MeV), μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τον πυρήνα του ατόμου και να προκαλέσουν εκπομπή νετρονίου. Συνεπώς για ενέργειες μεγαλύτερες των 10 MeV η παραγωγή νετρονίων μέσω αλληλεπίδρασης ηλεκτρονίων με πυρήνες στοιχείων μεγάλου ατομικού αριθμού δεν πρέπει να θεωρείται αμελητέα. [9].

Η ακτινοβολία νετρονίων αποτελεί κύριο προβληματισμό για το σχεδιασμό ενός απορροφητή δέσμης, διότι τα νετρόνια έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν ενεργότητα σε υλικά. Αυτό συμβαίνει όταν οι μεγάλοι ατομικού αριθμού πυρήνες εχμαλωτίζουν νετρόνια (neutron

capture) και μπορούν να μετατραπούν σε ραδιενεργό ισότοπο. Επιπλέον, τα νετρόνια μπορούν να διαπεράσουν υλικά πιο εύκολα από τα φωτόνια και τα φορτισμένα σωματίδια, κάτι που καθιστά δύσκολη την προστασία από αυτά [9].

## 4 .Ραδιενέργεια επιταχυντή

### 4.1 Δοσιμετρία

Η ακτινοβολία μπορεί να είναι επικίνδυνη για τους έμβιους οργανισμούς. Το αντίκτυπο της ακτινοβολίας εξαρτάται από τον τύπο της ακτινοβολίας, την ένταση, το ρυθμό έκθεσης και τον τύπο του ιστού και του οργανισμού. Η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την ύλη μέσω ιοντισμού ή διέγερσης των ατόμων ή των μορίων και στη δοσιμετρία μετριέται το ποσό ιοντισμού ή η ποσότητα της ενέργειας που εναποτίθεται στο υλικό/ιστό [9].

### 4.2 Ποσότητες δοσιμετρίας

Στον τομέα της ραδιοπροστασίας χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες ποσότητες για να εκφράσουν τους κίνδυνους της ακτινοβολίας στην υγεία. Φυσικές ποσότητες όπως η ροή σωματιδίων ,το Kerma και η απορροφούμενη δόση δεν επαρκούν για να περιγράψουν τους κίνδυνους από ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως από τον τύπο της ακτινοβολίας ,τον ρυθμό δόσης και τον εκτιθέμενο ιστό .

Η διεθνής επιτροπή ραδιοπροστασίας (ICRP) ορίζει στη δημοσίευση ICRP-60 την **ισοδύναμη δόση (equivalent dose)** ως μια περιοριστική ποσότητα με σκοπό την ακτινοπροστασία. Η ισοδύναμη δόση ορίζεται σε ένα όργανο η ιστό και υπολογίζεται ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης από αυτόν επί κάποιους παράγοντες μετατροπής. [11]

Συγκεκριμένα , **απορροφούμενη δόση** ενός οργάνου είναι η δόση, κανονικοποιημένη πάνω στο όργανο η στον ιστό και δίνεται από τον τύπο  $D_t = E_t / m_t$ , όπου  $E_t$  η εναποτιθέμενη ενέργεια μέσα στο όργανο και  $m_t$  η μάζα του οργάνου, και εκφράζεται σε Gray.

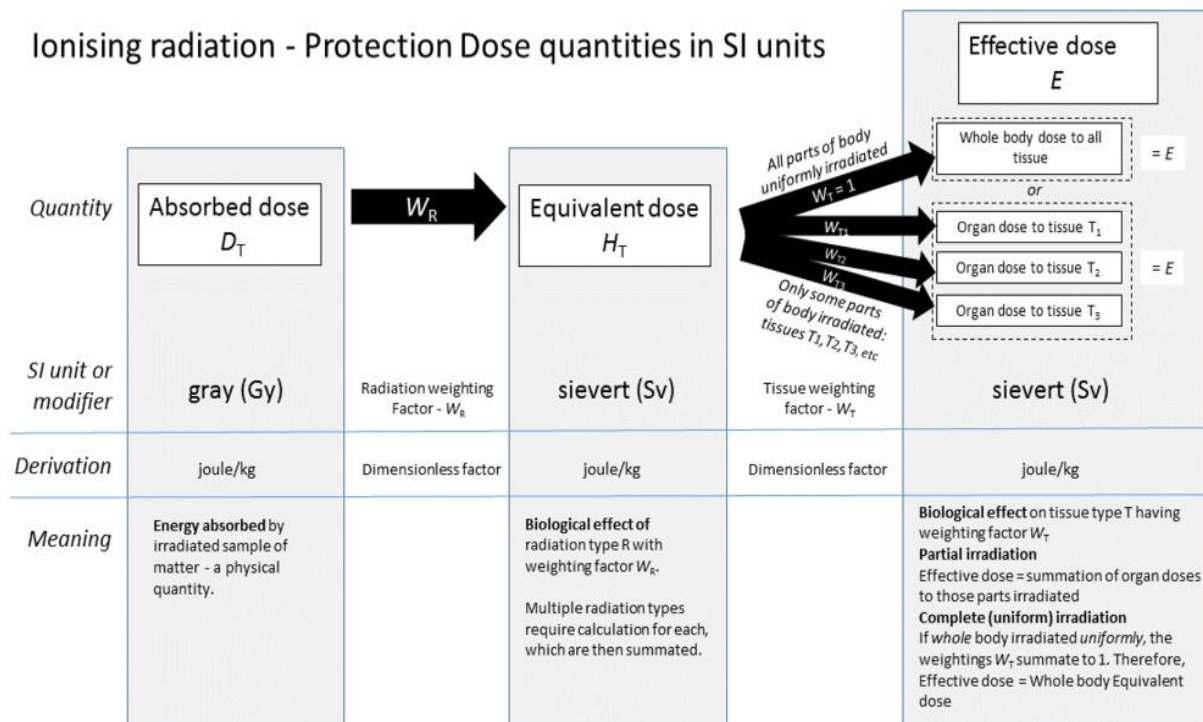
Για να ληφθεί υπόψη ο τύπος της ακτινοβολίας εισάχθηκαν οι παράγοντες μετατροπής  $W_T$  οι οποίοι υπάρχουν στην ICRP 60. Η ισοδύναμη δόση σε έναν ιστό τ ορίζεται λοιπόν ως  $H = \sum_T D_T \cdot W_{Tt}$ . Οι παράγοντες μετατροπής είναι αδιάστατοι και μονάδα για την H ορίζεται το sievert( Sv). Παρότι Gray και sievert έχουν την ίδια διάσταση J/Kg, στην πράξη οι δύο ποσότητες χρησιμοποιούνται διαφορετικά. Για την ακτινοβολία φωτονίων και ηλεκτρονίων ο παράγοντας μετατροπής έχει την τιμή 1 ανεξάρτητα από την ενέργεια της ακτινοβολίας, ενώ για την ακτινοβολία α, η τιμή είναι 20. Για τη ακτινοβολία νετρονίων, η τιμή εξαρτάται από την ενέργεια και κυμαίνεται από 5 έως 20 [9,11].

Radiation type and energy range	Radiation weighting factor, $w_R$
Photons, all energies	1
Electrons and muons, all energies	1
Neutrons, energy <10 keV	5
Neutrons, energy 10–100 keV	10
Neutrons, energy > 100 keV–2 MeV	20
Neutrons, energy > 2–20 MeV	10
Neutrons, energy > 20 MeV	5
Protons, other than recoil protons, energy > 2 MeV	5
Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei	20

Πίνακας 4: Παράγοντας μετατροπής προς υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης ανάλογα με τον τύπο ακτινοβολίας [11]

Η **αποτελεσματική δόση (effective dose)** ορίζεται για όλο το σώμα, όπου όλες οι ισοδύναμες δόσεις αθροίζονται πολλαπλασιασμένες η καθεμία με έναν παράγοντα βάρους που αντιστοιχεί για κάθε ιστό. Οι παράγοντες βάρους ορίζονται στην δημοσίευση 74 της ICRP. Η αποτελεσματική δόση είναι μια ποσότητα η οποία είναι δύσκολο να μετρηθεί. Η ICRU, μια αδελφική οργάνωση της ICRP όρισε λειτουργικές ποσότητες στις δημοσιεύσεις 47 και 51, οι οποίες είναι μετρήσιμες και αποτελούν σημείο αναφοράς για της περιοριστικές ποσότητες που περιεγράφηκαν παραπάνω. Αυτές ορίζονται σε ομοίωμα που αποτελεί γενικά μοντέλο ενός μέρους του ανθρώπινου σώματος. Η χρήση ομοιώματος κάνει εφικτή την συσχέτιση της επιθυμητής αποτελεσματικής δόσης με μια μετρήσιμη φυσική ποσότητα. Η η σφαίρα ICRU είναι μια σφαίρα διαμέτρου 30cm με πυκνότητα  $1\text{g cm}^{-3}$  που αποτελείται από 76.2% οξυγόνο, 10.1% υδρογόνο, 11.1% άνθρακα και 2.6% άζωτο. Σύμφωνα με την ICRU αυτό το ομοίωμα προσομοιάζει αρκετά απλοποιημένα τον ανθρώπινο κορμό [11,12].

## Ionising radiation - Protection Dose quantities in SI units



Εικόνα 7: Υπολογισμός της αποτελεσματικής δόσης σε όργανο/ιστό λαμβάνοντας υπόψη την ισοδύναμη δόση και τον παράγοντα βάρους του οργάνου/ιστού ενδιαφέροντος [12]

Στην συγκεκριμένη εργασία η βασική ποσότητα δοσιμετρίας είναι η ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας, τόσο η συνολική, όσο και αυτή που οφείλεται μεμονωμένα σε καθένα από τα σωματίδια που παράγονται εντός του επιταχυντή: ηλεκτρόνια, φωτόνια και νετρόνια στο στάδιο του εισαγωγέα δέσμης και της κύριας επιταχυντικής μονάδας και φωτόνια στον χώρο πειραμάτων, όπου τελικά κατευθύνεται η παραγόμενη δέσμη ακτίνων X.

## 5. Υπολογιστικές προσομοιώσεις

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις της μεταφοράς σωματιδίων είναι μια προσπάθεια να λυθεί ένα πρόβλημα με τουλάχιστον επτά βαθμούς ελευθερίας που περιγράφει τις θέσεις των σωματιδίων (τρεις συντεταγμένες), την ενέργειά τους, την κατεύθυνση της κίνησής τους (πολική και αζιμουθιακή) και τον χρόνο. Όταν λαμβάνεται υπόψη η μεταφορά πολλών διαφορετικών σωματιδίων, το είδος του σωματιδίου αποτελεί επίσης μια μεταβλητή [13].

### 5.1 Μέθοδος Monte Carlo :

Η μέθοδος Monte Carlo (MC) χρησιμοποιείται για την ανίχνευση πρωτογενών σωματιδίων και των παραγομένων δευτερογενών, κάνοντας χρήση συναρτήσεων πιθανοτήτων. Σε κάθε προσομοίωση γίνεται χρήση πολλών πρωτογενών σωματιδίων στα οποία εφαρμόζεται μια στοχαστική διεργασία και η σύγκλιση των αποτελεσμάτων προκύπτει μέσω επαναλαμβανομένης

δειγματοληψίας. Η μεταφορά των σωματιδίων είναι μια τέτοια χαρακτηριστική διαδικασία, η οποία μπορεί να περιγράψει στατιστικά, χάρη στη χρήση των ενεργών διατομών [14].

Η βάση οποιασδήποτε μεθόδου MC είναι έτσι η δημιουργία τυχαίων αριθμών. Ο αλγόριθμος MC υποθέτει ότι όλες οι αλληλεπιδράσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η μεταφορά των σωματιδίων αποτελεί μια αλυσίδα Markov, δηλαδή η πιθανότητα μετάβασης από μια κατάσταση μ σε μια κατάσταση ν εξαρτάται μόνο από την τρέχουσα κατάσταση, χωρίς να εξαρτάται από προηγούμενες καταστάσεις και η πιθανότητα μετάβασης δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο. Ένα περιορισμός του κώδικα είναι ότι τα σωματίδια δεν μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, καθώς μεταφέρονται ένα-ένα [13].

Κάθε σωματίδιο ακολουθείται κατά μήκος της διαδρομής του μέσα στην ύλη, και σε κάθε σημείο αλληλεπίδρασης γίνεται μια τυχαία επιλογή από την κατανομή που περιγράφει τα φυσικά αποτελέσματα. Καθορίζεται εάν θα υπάρξει αλληλεπίδραση ή όχι και ποιο είδος αλληλεπίδρασης θα είναι αυτή, αν πρόκειται για παράδειγμα για ελαστική ή ανελαστική σκέδαση. Η απόσταση που διανύεται μέχρι την επόμενη αλληλεπίδραση είναι μια άλλη τυχαία επιλογή. Οι συντεταγμένες και η ορμή του σωματιδίου αλλάζουν ανάλογα με την αλληλεπίδραση και το αποτέλεσμα. Εάν δημιουργηθεί ένα νέο σωματίδιο κατά την αλληλεπίδραση, αυτό θα μεταφέρεται επίσης. Η μεταφορά ενός αρχικού σωματιδίου και των δευτερογενών σωματιδίων του αποτελεί μια ιστορία σωματιδίου [13,14].

Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων μπορεί να είναι μια χρονοβόρα διαδικασία. Γι' αυτό ένας εμπειρικός τύπος (figure of merit) για να το υπολογιστικό κόστος είναι  $FOM = \sigma^2 \cdot t$ , δηλαδή το γινόμενο της διακύμανσης εξόδου και του υπολογιστικού χρόνου. Για N πρωτογενή σωματίδια ισχύει ότι  $\sigma^2 \sim 1/N$  και  $t \sim N$ . Για να μειώσουμε τη διακύμανση της εξόδου μας θα πρέπει να αυξήσουμε τον αριθμό των σωματιδίων στην προσομοίωση και συνεπώς τον συνολικό υπολογιστικό χρόνο. Αντίθετα, αν επιθυμούμε να έχουμε μικρό υπολογιστικό χρόνο, θα πάρουμε μεγαλύτερη διακύμανση στην έξοδο μας. Έτσι, θα πρέπει να υπάρξει ένας συμβιβασμός (trade off) μεταξύ των δυο αυτών ποσοτήτων ώστε να έχουμε το μικρότερο δυνατό υπολογιστικό κόστος [16].

## 5.2 Πρόγραμμα FLUKA

### 5.2.1 Περιγραφή του εργαλείου προσομοιώσεων FLUKA και του εικονικού περιβάλλοντος FLAIR

Το FLUKA είναι ένα πλήρως ολοκληρωμένο πακέτο προσομοιώσεων Monte Carlo. Αποτελεί ένα γενικού σκοπού εργαλείο για υπολογισμούς σχετικά με τη διάδοση σωματιδίων και της αλληλεπίδρασης τους με την ύλη. Καλύπτει ένα εκτεταμένο εύρος εφαρμογών όπως shielding επιταχυντών ηλεκτρονίων ή πρωτονίων, σχεδιασμό στόχων της δέσμης, θερμιδομετρία, δοσιμετρία, ραδιοθεραπεία, σχεδιασμό ανιχνευτών, μελέτη κοσμικής ακτινοβολίας και νεύρινων κα [14].

Προτεραιότητα στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη του FLUKA είναι η εφαρμογή και η βελτίωση αξιόπιστων και σύγχρονων φυσικών μοντέλων. Χρησιμοποιούνται μικροσκοπικά μοντέλα όπου είναι δυνατόν, εξασφαλίζεται η συνέπεια μεταξύ των αντιδράσεων, επιβάλλονται οι νόμοι διατήρησης και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα. Ως αποτέλεσμα, οι τελικές προβλέψεις πραγματοποιούνται με ένα ελάχιστο σύνολο ελεύθερων παραμέτρων που έχουν οριστεί για συνδυασμούς ενέργειας, στόχου και προτεινόμενου σωματιδίου. Το FLUKA μπορεί να προσομοιώνει την αλληλεπίδραση και τη μεταφορά στην ύλη για περίπου 60 διαφορετικά



στοιχειώδη σωματίδια, ενέργειας από 1 keV (θερμική ενέργεια για νετρόνια) έως χιλιάδες TeV ανάλογα με τον τύπο του σωματιδίου. Συγκεκριμένα, αυτά συμπεριλαμβάνουν φορτισμένα αδρονία, νετρόνια, μούονια, ηλεκτρόνια, τα αντίστοιχα αντισωματίδια, καθώς και φωτόνια και βαριά ιόντα [14].

Το Flair (FLUKA Advanced Interface) είναι ένα εξελιγμένο περιβάλλον διεπαφής για το FLUKA που διευκολύνει την επεξεργασία των αρχείων εισόδου, την εκτέλεση του κώδικα και την οπτικοποίηση των αρχείων εξόδου. Επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργεί και τροποποιεί ένα αρχείο εισόδου FLUKA, καθώς και παρέχει μετεπεξεργασία και γραφική οπτικοποίηση των αρχείων εξόδου. Μια άλλη λειτουργία του FLAIR είναι ο Geometry Editor, ο οποίος όχι μόνο οπτικοποιεί τη γεωμετρία σε δύο ή τρεις διαστάσεις, αλλά παρέχει επίσης δυνατότητες επεξεργασίας και εντοπισμού σφαλμάτων. Βασίζεται εξ ολοκλήρου στις γλώσσες προγραμματισμού python και Tkinter [15].

### 5.2.2 Βασική είσοδος και ορισμός της γεωμετρίας του πειράματος

Όταν ανοίγει κάποιος ένα νέο project στο Flair, μπορεί να δει ένα στάνταρτ αρχείο εισόδου. Το αρχείο εισόδου είναι σε μορφή ASCII μια .inp επέκτασή. Η **DEFAULTS** γραμμή εντολών (card) θέτει κάποιες προκαθορισμένες φυσικές ρυθμίσεις για την προσομοίωση (**PRECISION setting**). Η **BEAM card** ορίζει τον τύπο σωματιδίων και την ενέργεια/ορμή τους. Επίσης, σε αυτήν ορίζεται το σχήμα της δέσμης (pencil, gaussian/annular κλπ), το χωρικό και γωνιακό της εύρος αλλά και το ενεργειακό εύρος της (πχ ενεργειακή απόκλιση κατά FWHM, εάν η ενέργεια της περιγράφεται από gaussian κατανομή). Η **BEAMPOS** ορίζει τη θέση και την κατεύθυνση της δέσμης στον χώρο. Στο FLUKA χρησιμοποιείται συνδυαστική γεωμετρία. Έχουν οριστεί σε κάποια βασικά γεωμετρικά αντικείμενα (σφαίρα, κύβος, κύλινδρος τα πιο δημοφιλή και εύχρηστα) τα οποία καλούνται σώματα (bodies) και μπορούν να συνδυαστούν μέσω λογικών (Boolean) τελεστών, για να σχηματίσουν σύνθετες περιοχές. Οι τελεστές είναι της ένωσης, της τομής και της αφαίρεσης (|, +, -) και εφαρμόζοντας τους καταλληλά μεταξύ των βασικών σωμάτων μπορεί να παραχθεί οποιαδήποτε συνθέτη γεωμετρική διάταξη [14].

Επίσης, κάθε γεωμετρική διάταξη που κατασκευάζεται στο FLUKA πρέπει να περιβάλλεται από μια περιοχή, καλουμένη μαύρη τρύπα, η οποία είναι σφαιρικός φλοιός και όλα τα σωματίδια που διαδίδονται έως εκεί, απορροφώνται, λόγω της τεράστιας πυκνότητας του υλικού της.

Μέσω της **ASSIGNMA card** μπορεί να ορίσει κάποιος ένα υλικό για κάθε περιοχή, από το οποίο αυτή αποτελείται. Αυτό μπορεί να είναι κάποιο χημικό στοιχείο, ένωση, κράμα, το κενό ή το υλικό "BLACKHOLE" που ορίζεται στην περιοχή της μαύρης τρύπας. Διατίθεται στην βιβλιοθήκη του FLAIR ένα μεγάλο πλήθος χημικών στοιχείων και ενώσεων αλλά υπάρχει και η δυνατότητα να οριστεί κάποιο υλικό από τον χρήστη.

Τέλος, σε κάθε προσομοίωση ορίζεται ο αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων (primaries) για τα οποία θα εκτελεστεί το πείραμα. Όσο περισσότερα τα primaries, τόσο καλύτερη σύγκλιση (μικρότερες διακυμάνσεις) θα πάρουμε στο αποτέλεσμα του πειράματος. Η μεγάλη αύξηση των primaries, βέβαια, όπως προαναφέρθηκε, επιδρά πολύ επιβαρυντικά στον υπολογιστικό χρόνο [14].

### 5.2.3 Φυσική, διάδοση σωματιδίων και biasing

Όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ δέσμης και ύλης που έχουν μεγάλη φυσική σημασία είναι είδη ενσωματωμένες στο FLUKA και λαμβάνονται υπόψη σε κάθε προσομοίωση. Όμως, κάποια πιο σπάνια φαινόμενα πρέπει να εισαχθούν από τον χρήστη, αν θέλει να τα μελετήσει. Στις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν έχει εισαχθεί το ηλεκτροπυρηνικό φαινόμενο, δηλαδή λαμβάνονται υπόψη οι αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων της δέσμης με τους πυρήνες της ύλης, καθώς μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε την παραγωγή δευτερογενών νετρονίων. Έτσι ενεργοποιούμε την επιλογή **ELECTRONYC** από την κάρτα φυσικής **PHOTONUC** και επιλέγουμε το φαινόμενο να ληφθεί υπόψη για όλων των ενεργειών τα ηλεκτρόνια.

Μια ακόμα τεχνική που εφαρμόστηκε είναι ο αποκλεισμός της παραγωγής και διάδοσης ηλεκτρονίων και φωτονίων πολύ χαμηλής ενέργειας, καθώς η συνεισφορά τους στα φαινόμενα υπό μελέτη είναι αμελητέα, εφόσον έχουν πολύ μικρό βάθος αλληλεπίδρασης με την ύλη. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της **EMFCUT card**, όπου μπορεί να τεθεί από τον χρήστη ενεργειακό κατώφλι για την παραγωγή και διάδοση H/M ακτινοβολίας, διαφορετικό από το default του προγράμματος. Οι default τιμές κατωφλίου κινητικής ενέργειας είναι 75keV και 150keV για την διάδοση πρωτογενών ηλεκτρονίων σε υλικό μεγάλου και μικρού ατομικού αριθμού αντίστοιχα και 1keV για τη διάδοση δευτερογενών ηλεκτρονίων. Για τα φωτόνια η ελάχιστη ενέργεια που υποστηρίζεται από το πρόγραμμα είναι 1keV για πρωτογενή και 100eV για δευτερογενή. Θέτοντας υψηλότερα ενεργειακά κατώφλια μειώνεται το υπολογιστικό κόστος και ο χρόνος της προσομοίωσης, εφόσον κριθεί από το χρήστη ότι η συνεισφορά σωματιδίων τόσο χαμηλής ενέργειας δεν επιδρά στο τελικό αποτέλεσμα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για να μειώσει κανείς το υπολογιστικό κόστος μιας προσομοίωσης, θα πρέπει να μειώσει τον υπολογιστικό χρόνο και την επιθυμητή διακύμανση της εξόδου στο βέλτιστο βαθμό. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι με χρήση των **biasing cards**. Σε μια “αμερόληπτη” προσομοίωση, γίνεται δειγματοληψία από τις πιο ρεαλιστικές κατανομές πιθανοτήτων σωματιδίων-ύλης και έτσι παρέχεται η όσο το δυνατόν πιο ακριβής αναπαράσταση των πραγματικών φυσικών διεργασιών. Παρόλα αυτά σε μια ρεαλιστική διεργασία μπορεί να ενυπάρχουν φυσικοί μηχανισμοί που έχουν αμελείται επίδραση στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης η δεν συνεισφέρουν στο υπό μελέτη φαινόμενο. Μια biased προσομοίωση μπορεί να αυξήσει την παραγωγή σπάνιων γεγονότων ενδιαφέροντος για να μειώσει το υπολογιστικό κόστος. Το στατιστικό βάρος κάθε σωματιδίου θα προσαρμοστεί σε αυτή την προσομοίωση, ώστε παρότι μεταβάλλεται ο τρόπος σύγκλισης, το τελικό αποτέλεσμα να μείνει ανεπηρέαστο [15,17].

### 5.2.4 Ανάκτηση και ερμηνεία αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Ένας εκτιμητής (estimator) σε μια προσομοίωση Monte Carlo είναι το ισοδύναμο μιας πραγματικής μέτρησης. Το στατιστικό σφάλμα ανακτάται από τη δειγματοληψία στατιστικών κατανομών. Το FLUKA διαθέτει μεγάλη ποικιλία ενσωματωμένων εκτιμητών. Οι ποσότητες που εκτιμούνται στις ακόλουθες προσομοιώσεις είναι η ροή (fluence) και η ισοδύναμη δόση των σωματιδίων υπό μελέτη (ηλεκτρόνια, φωτόνια, νετρόνια). Η ροή σωματιδίων μετρείται σε σωματίδια/cm<sup>2</sup> και περιγράφει την πυκνότητα διαδρομής των σωματιδίων. Η ισοδύναμη δόση είναι μια περιοριστική ποσότητα που έχει οριστεί από τους οργανισμούς ραδιοπροστασίας και περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα της δοσιμετρίας. Οι **scoring cards** που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία είναι οι **USRBIN cards**. Η **USRBIN**, εκτιμά ποσότητες όπως την ροή, την

πυκνότητα εναπόθεσης ενέργειας, την εναποτιθέμενη δόση, για μεγάλο εύρος σωματιδίων. Το πλέγμα μπορεί να εκφραστεί σε διάφορα συστήματα συντεταμένων ανάλογα με την γεωμετρία της προσομοίωσης. Θέτοντας στην κάρτα **USRBIN** την επιλογή **DOSE-EQ**, θα εκτιμηθεί η συνολική ισοδύναμη δόση στο επιλεγμένο πλέγμα, ενώ εάν ενδιαφέρει η συνεισφορά ενός μόνο τύπου σωματιδίων στην ισοδύναμη δόση, αυτό επιτυγχάνεται με την **AUXSCORE card**, καθώς αυτή παρέχει τους παράγοντες μετατροπής που αντιστοιχούν στον επιλεγμένο τύπο σωματιδίων.

Τα δεδομένα που λαμβάνονται από την **USRBIN** μπορούν να αναπαρασταθούν γραφικά με διάφορους τρόπους. Μια **2D colorplot** μπορεί να δώσει μια καλή εποπτεία των αποτελεσμάτων πάνω στην ορισμένη γεωμετρία. Η μέση η μέγιστη τιμή πάνω σε έναν άξονα (1D) μπορεί επίσης να παρασταθεί. Εάν πχ θέλουμε να αναπαραστήσουμε την μέση ισοδύναμη δόση κατά μήκος του z άξονα, το FLAIR μπορεί να απεικονίσει την μέση δόση στο (x,y) επίπεδο για κάθε σημείο του z. Η ισοδύναμη δόση μετριέται σε picosieverts και όπως κάθε ποσότητα στο FLUKA είναι κανονικοποιημένη ανά πρωτογενές σωματίδιο(primary). Εάν επιθυμούμε κάποια πρακτική μονάδα όπως πχ pSv/hr, θα πρέπει το αποτέλεσμα να πολλαπλασιαστεί με το ρεύμα της δέσμης (C/sec) διαιρεμένο με το στοιχειώδες φορτίο e και με τον παράγοντα 3600 [18]

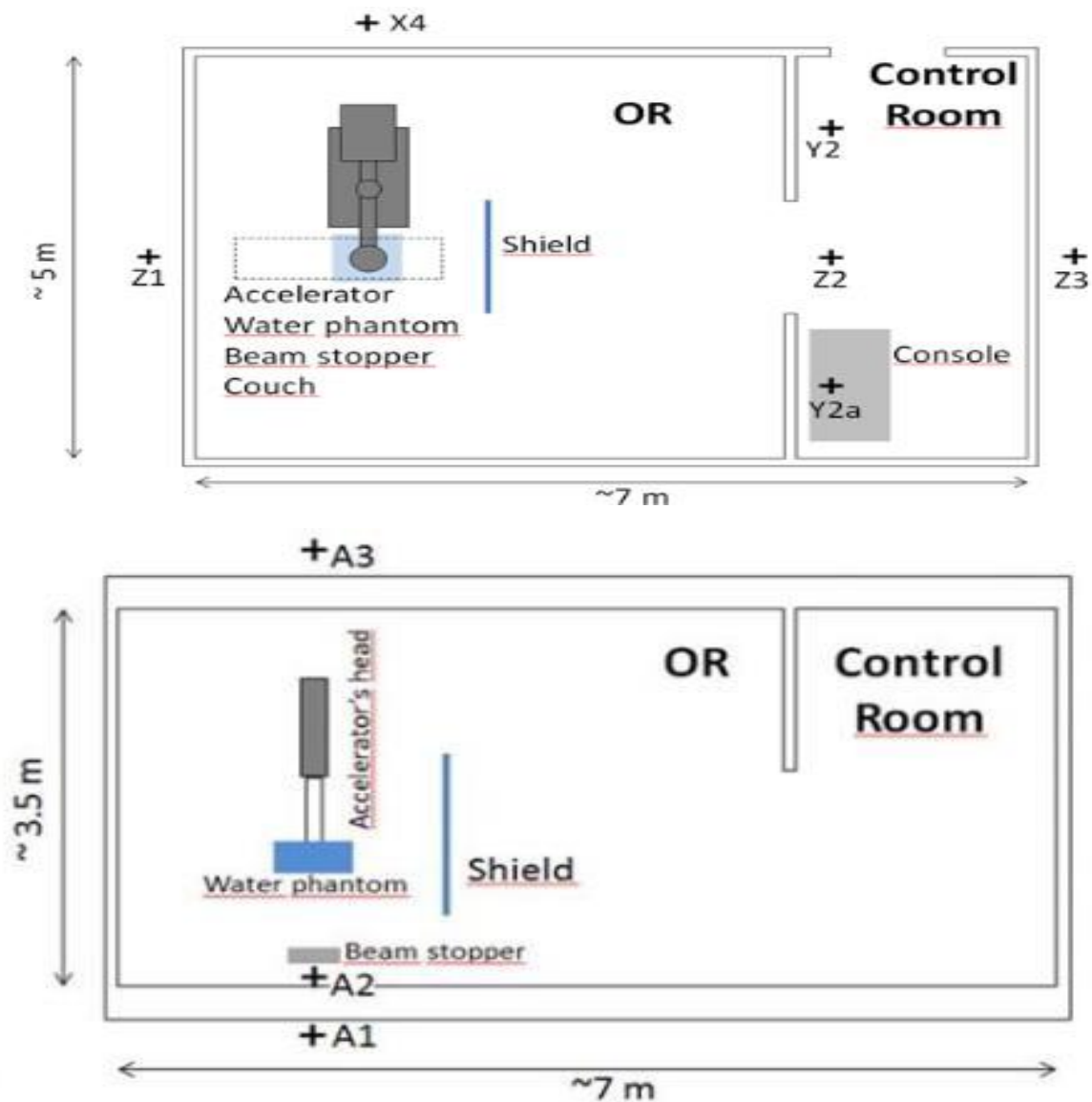
## 6. Ποιοτική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του FLUKA από άλλη μελέτη

### 6.1. Περιγραφή της γεωμετρίας του πειράματος

Προς επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του FLUKA, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις, όμοιες με αυτές που διεξάχθηκαν στα πλαίσια της μελέτης του Εθνικού Ινστιτούτου Πυρηνικής Ερευνάς της Πολωνίας, πάνω σε έναν καινούργιο φορητό επιταχυντή ηλεκτρονίων που προορίζεται για θεραπευτική χρήση (ακτινοθεραπεία IORT).

Οι προσομοιώσεις αφορούν την εκτίμηση της ισοδύναμης δόσης ακτινοβολίας που εναποτίθεται τόσο στο χώρο λειτουργίας του επιταχυντή (χώρος διεξαγωγής θεραπειών), όσο και στο δωμάτιο χειρισμού, έτσι ώστε να εξεταστεί κατά πόσο η λειτουργία του είναι ασφαλής τόσο για τον ασθενή όσο και για το ιατρικό προσωπικό. Αυτό γίνεται μέσω της σύγκρισής της ισοδύναμης δόσης που εναποτίθεται σε διάφορα σημεία του χώρου με τα όρια τιμών που έχουν τεθεί από τον διεθνή οργανισμό ακτινοπροστασίας. Σε περίπτωση που αυτά ξεπερνιούνται, θωράκιση αυτών των χώρων με κατάλληλα υλικά επαρκούς πάχους καθίσταται απαραίτητη.

Το κτίσμα στο οποίο στεγάζεται το δωμάτιο λειτουργίας του επιταχυντή και το δωμάτιο ελέγχου έχει διαστάσεις 7mX5mX3.5m και διαθέτει τσιμεντένια τοιχώματα πάχους 10cm, ενώ το πάτωμα και το ταβάνι έχουν πάχος 30cm. Τα δύο δωμάτια χωρίζονται μεταξύ τους με τοίχο πάχους 10cm και ύψους 1.5m που διαθέτει άνοιγμα (πόρτα) πλάτους 1m.



Εικόνα 8:προβολές του χώρου λειτουργίας του επιταχυντή ηλεκτρονίων και του δωματίου ελέγχου. Πάνω εικόνα :στο επίπεδο (x,y), κάτω εικόνα: στο επίπεδο (x,z) [19]

Ο επιταχυντής παράγει δέσμη ηλεκτρονίων ενέργειας από 3 έως 12MeV. Το πάχος της δέσμης είναι 3.6mm FWHM και η γωνιακή της απόκλιση 0.4mrad, όταν αυτή εξέρχεται από τον applicator, για να εφαρμοστεί στον ασθενή. Η διεύθυνση της δέσμης είναι ο άξονας Z και κατευθύνεται προς τον ασθενή (ομοίωμα από νερό στο πλαίσιο της προσομοίωσης), ενώ κάτω από το κρεβάτι θεραπείας τοποθετείται ένας απορροφητής ηλεκτρονίων από μόλυβδο ώστε να περιορίσει την περεταίρω διάδοση της στο χώρο.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας κατασκευάστηκε η γεωμετρία του χώρου και η δέσμη ηλεκτρονίων, όπως ακριβώς επιγράφηκε παραπάνω. Επίσης, εφαρμοστήκαν οι ίδιες παράμετροι διάδοσης: κατώφλι κινητικής ενέργειας 0.7MeV για τα δευτερογενή ηλεκτρόνια και 10keV για τα φωτόνια. Ο αριθμός πρωτογενών σωματιδίων είναι, επίσης, αρκετά μεγάλος,  $10^8$  ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη στατιστική ακρίβεια.

## 6.2 Περιγραφή των εκτελεσθέντων προσομοιώσεων

Οι προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν χωρίζονται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για τις οποίες υπάρχουν γραφήματα στο δημοσίευμα, ώστε να γίνουν συγκρίσεις. Στο δεύτερο μέρος, έγινε περαιτέρω μελέτη της ισοδύναμης δόσης και ποιοτική ερμηνεία αποτελεσμάτων, δεδομένου ότι, όπως αναλύεται και στην παράγραφο 6.3 υπήρχαν ελλιπή δεδομένα αλλά και περιορισμοί για ποσοτική επαλήθευση των αποτελεσμάτων.

Πιο αναλυτικά, στο πρώτο μέρος των προσομοιώσεων, έγινε εκτίμηση της ισοδύναμης δόσης ακτινοβολίας στον συνολικό χώρο (δωμάτιο θεραπείας και δωμάτιο ελέγχου), για δέσμη ενέργειας 12MeV και συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο δημοσίευμα, τόσο για την συνολική ισοδύναμη δόση, όσο και για την ισοδύναμη δόση νετρονίων. Τα νετρόνια λόγω του μηδενικού φορτίου τους δεν σκεδάζονται από την ύλη και διεισδύουν έτσι σε μεγάλο βάθος μέσα στο ανθρώπινο σώμα και λόγω της μεγάλης μάζας τους προκαλούν έντονες σκεδάσεις. Οπότε, ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δίνεται στην ακτινοπροστασία από δευτερογενή νετρόνια στα πλαίσια κάθε μελέτης.

Για την προστασία του προσωπικού είναι απαραίτητη η τοποθέτηση απορροφητή ηλεκτρονίων (shielding) μεταξύ του επιταχυντή και του δωματίου ελέγχου, δεδομένου μάλιστα ότι υπάρχει άνοιγμα μεταξύ των δύο χώρων. Γι' αυτό το σκοπό εκτελέστηκε προσομοίωση, με απορροφητή πάχους 5cm από μόλυβδο και έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα του δημοσιεύματος.

Εν συνεχεία, στο δεύτερο μέρος προσομοιώσεων έγινε μελέτη για ενέργειες 12MeV και 9MeV στον χώρο αλλά και σε ορισμένα σημεία ενδιαφέροντος. Το ένα σημείο: A2(0,0,185) βρίσκεται 10cm κάτω από τον απορροφητή, ακριβώς πάνω στη διεύθυνση της δέσμης, το δεύτερο: Z2(390,050) μέσα στο δωμάτιο ελέγχου μπροστά στο άνοιγμα και το τρίτο Y2a(390,150,-50), βρίσκεται 30cm πίσω από τον διαχωριστικό τοίχο, όπου μάλιστα σχεδιάζεται να τοποθετηθεί η κονσόλα ελέγχου. Εκεί θα βρίσκεται ο χειριστής κατά τη διάρκεια ακτινοβολήσης. Συνολικά, εκτελούνται τρεις προσομοιώσεις για κάθε ενέργεια δέσμης, μια χωρίς απορροφητή και άλλες δύο με απορροφητή από μόλυβδο πάχους 2cm και 5cm αντίστοιχα και παρατηρούνται οι διαφορές στην εναποτιθέμενη ισοδύναμη δόση.

## 6.3 Διευκρινίσεις και περιορισμοί περί των εκτελεσθέντων προσομοιώσεων

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι πολλές παράμετροι δεν ήταν γνωστές κατά την διαδικασία των προσομοιώσεων, ώστε να είναι εφικτή η ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που παρουσιάζονται στο δημοσίευμα [19]. Συγκεκριμένα, τα ακριβή χαρακτηριστικά του applicator του επιταχυντή δεν γίνονται γνωστά στο [19], αλλά ούτε στο [20] στο οποίο παραπέμπει η βιβλιογραφία του. Παρά την προσπάθεια επικοινωνίας με τους συγγραφείς δεν λάβαμε απάντηση ούτε εγώ ούτε ο κύριος Γαζής.

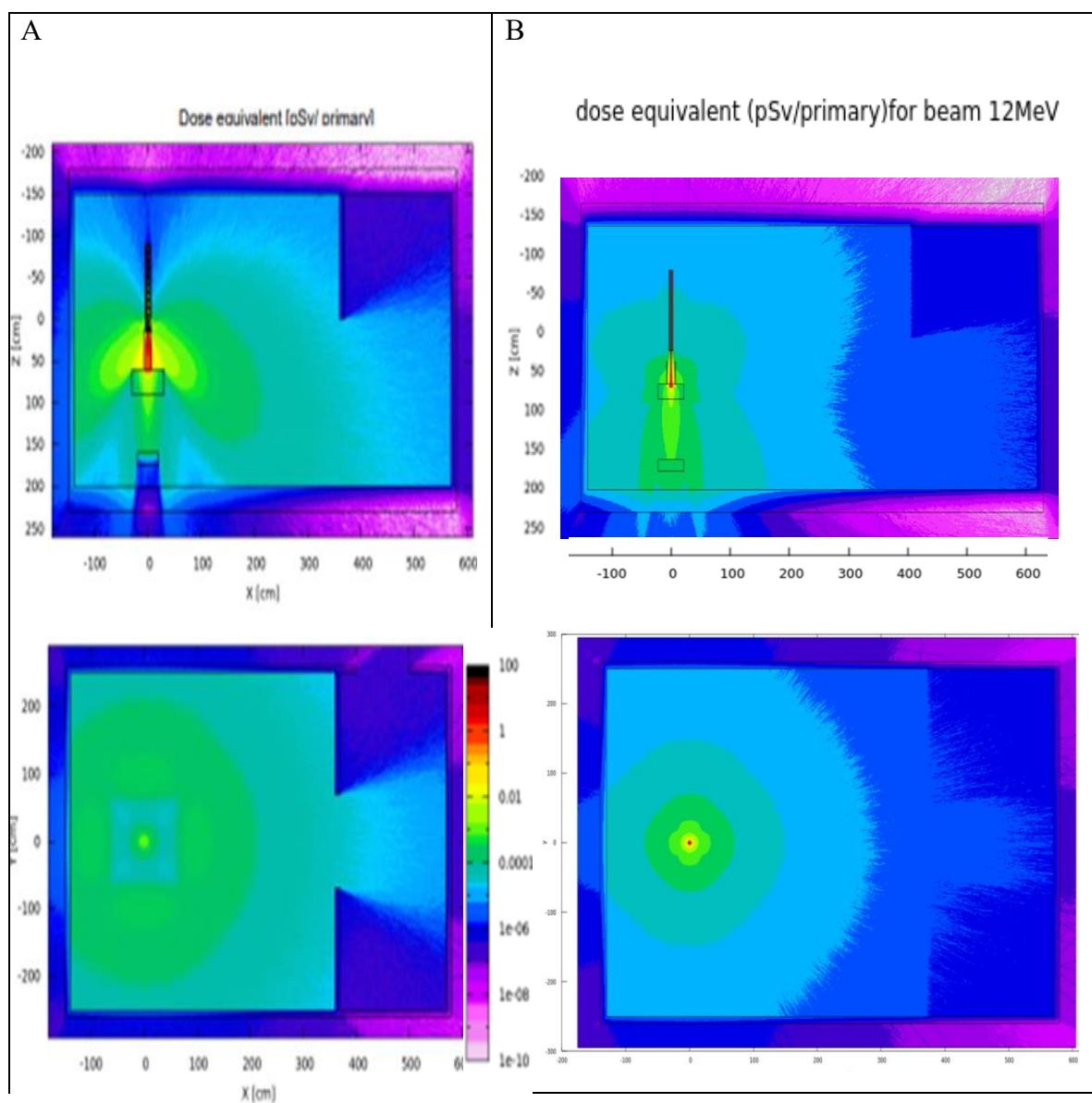
Μάλιστα, η σχεδίαση της θεραπευτικής κεφαλής και του applicator από το ινστιτούτο έγινε μέσω του κώδικα BEAMnrc, και κατόπιν εισήχθη στο εικονικό περιβάλλον Flair, όπου εκτελέστηκαν προσομοιώσεις πάνω στην ισοδύναμη δόση που εναποτίθεται στον χώρο. Αντίθετα, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε μόνο κώδικας του Fluka.

Επίσης, σαφής δεν γίνεται ο τρόπος που υπολογίζεται η ισοδύναμη δόση σε μονάδες mSv/year. Όπως προαναφέρθηκε, το Fluka δίνει την ισοδύναμη δόση σε pSv/primary. Το δημοσίευμα αναφέρει ότι πραγματοποιούνται τρεις θεραπείες την εβδομάδα, όμως δεν προσδιορίζεται από πόσα πρωτογενή σωματίδια αποτελείται η δέσμη ηλεκτρονίων και πόσες φορές σε μια θεραπεία ακτινοβολείται ο ασθενής, ώστε να γίνει η μετατροπή. Ακόμα, ο αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις από το για τον υπολογισμό ισοδύναμης δόσης νετρονίων ήταν  $2 \cdot 10^9$ , κάτι που τις καθιστά απαγορευτικές από άποψη μνήμης και χρόνου και έτσι το βέλτιστο που μπόρεσε να επιτευχθεί ήταν  $10^8$ , δηλαδή 20 φορές λιγότερα πρωτογενή ηλεκτρόνια. Αυτή η διαφορά γίνεται ιδιαίτερα αισθητή στις απεικονίσεις στον χώρο, όπως θα φανεί παρακάτω.

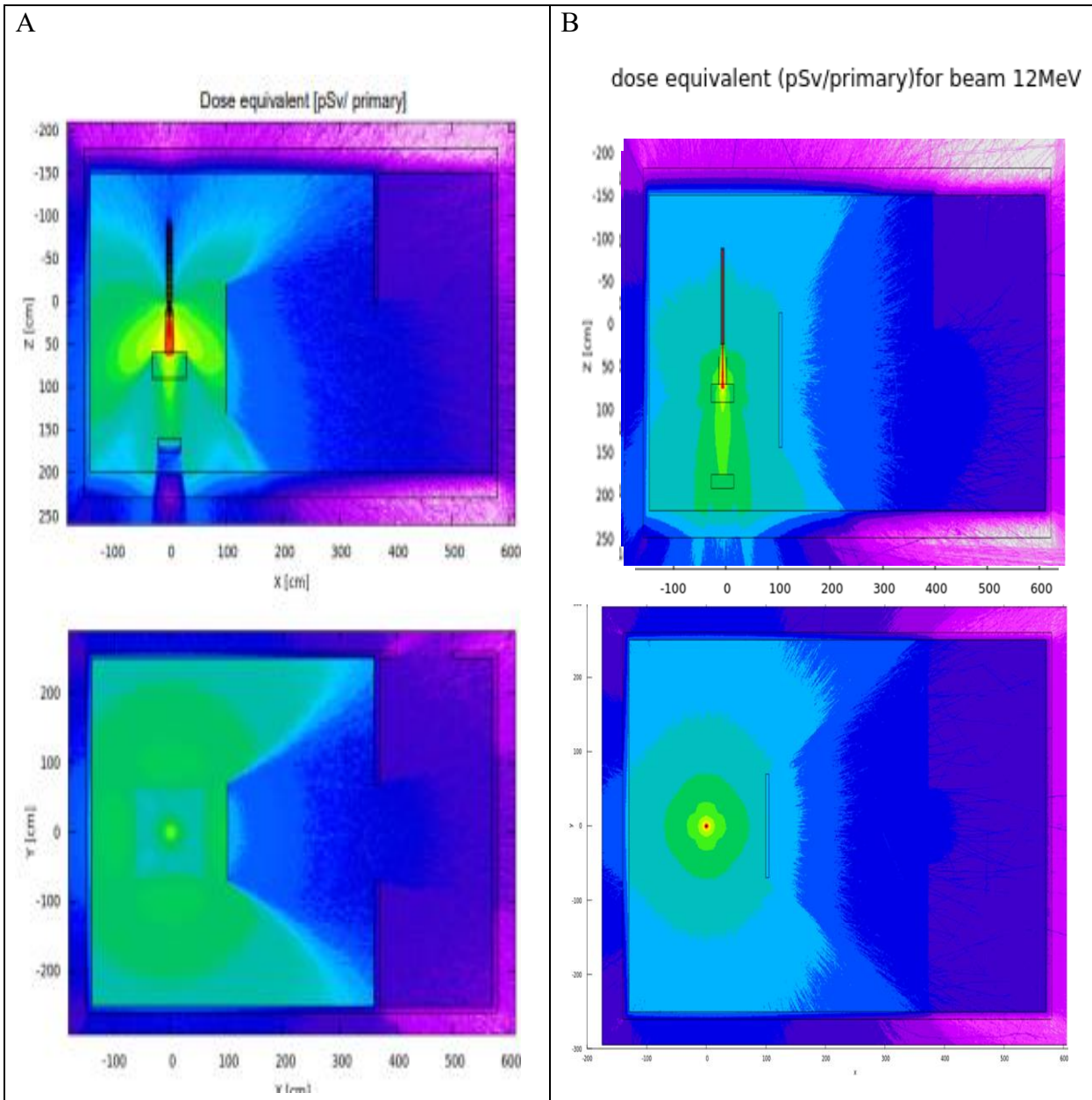
Βέβαια, για τον υπολογισμό ισοδύναμης δόσης σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου, όπως φαίνεται και από τον κώδικα στο παράρτημα, χρησιμοποιήθηκε πλέγμα 10 σημείων σε κάθε άξονα του χώρου γύρω από κάθε σημείο ενδιαφέροντος, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Παρόλα αυτά ιδιαίτερα στην περίπτωση της προσομοίωσης με δέσμη χαμηλότερης ενέργειας, 9MeV, η ισοδύναμη δόση νετρονίων υπολογίζεται μηδενική σε ορισμένα σημεία, λόγω ελλιπούς σύγκλισης και έτσι τελικά δεν παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα, αλλά μόνο τρία σημεία ενδιαφέροντος, όπως αναφέρθηκε στην 6.2.

## 6.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

### 6.4.1 Σύγκριση μεταξύ αποτελεσμάτων δημοσίευσης και παρούσας εργασίας

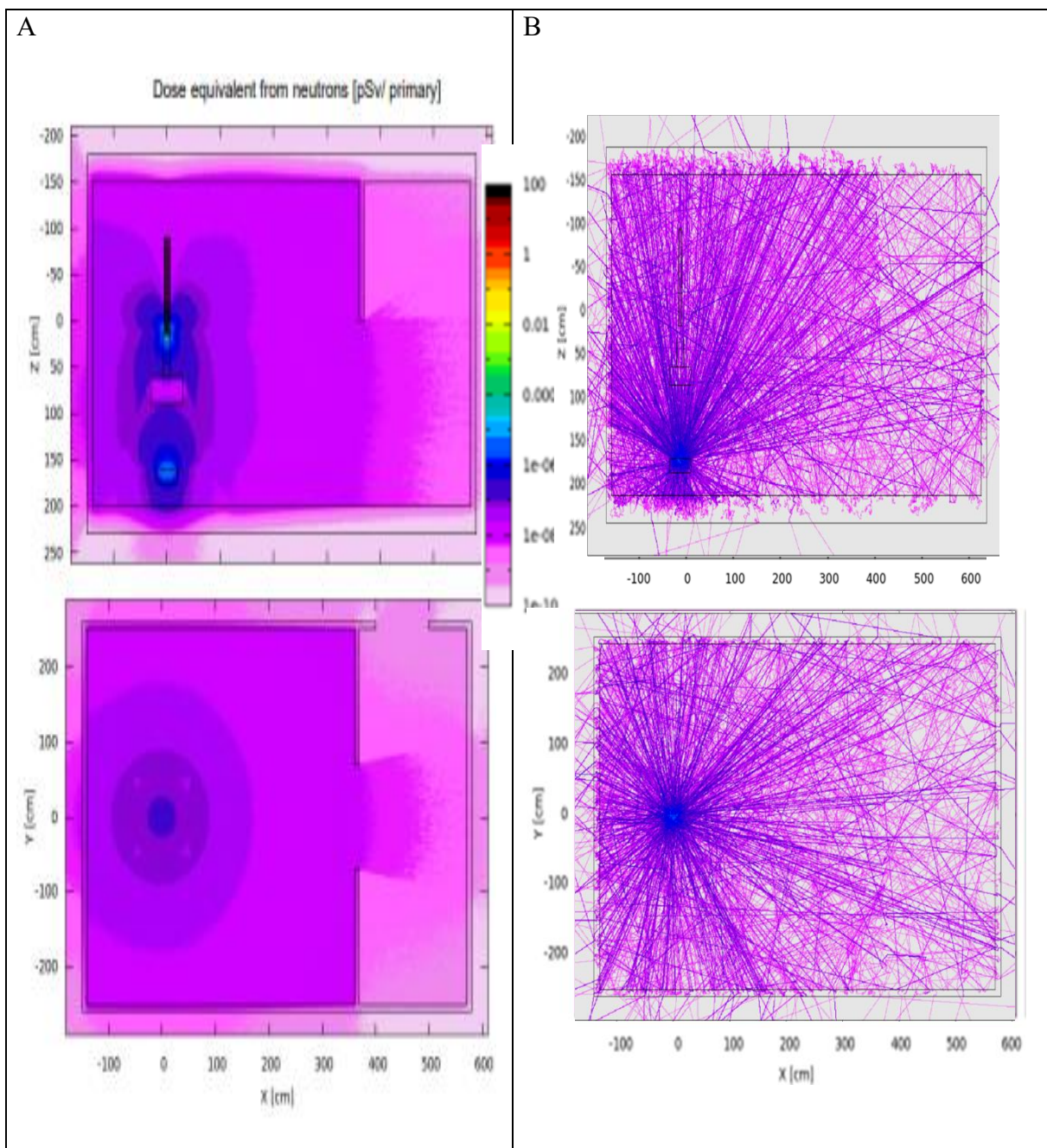


Εικόνα 9: Συνολική ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας A: στο [19] ,B :στην παρούσα εργασία. Πάνω: προβολή στο επίπεδο  $(x,z)$  ,κάτω: στο επίπεδο  $(x,y)$



Εικόνα 10: ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας σε περίπτωση τοποθέτησης πετάσματος μολύβδου πάχους 5cm. A: στο [19], B: στην παρούσα εργασία. Πάνω: προβολή στο επίπεδο (x,z), κάτω: στο επίπεδο (x,y)





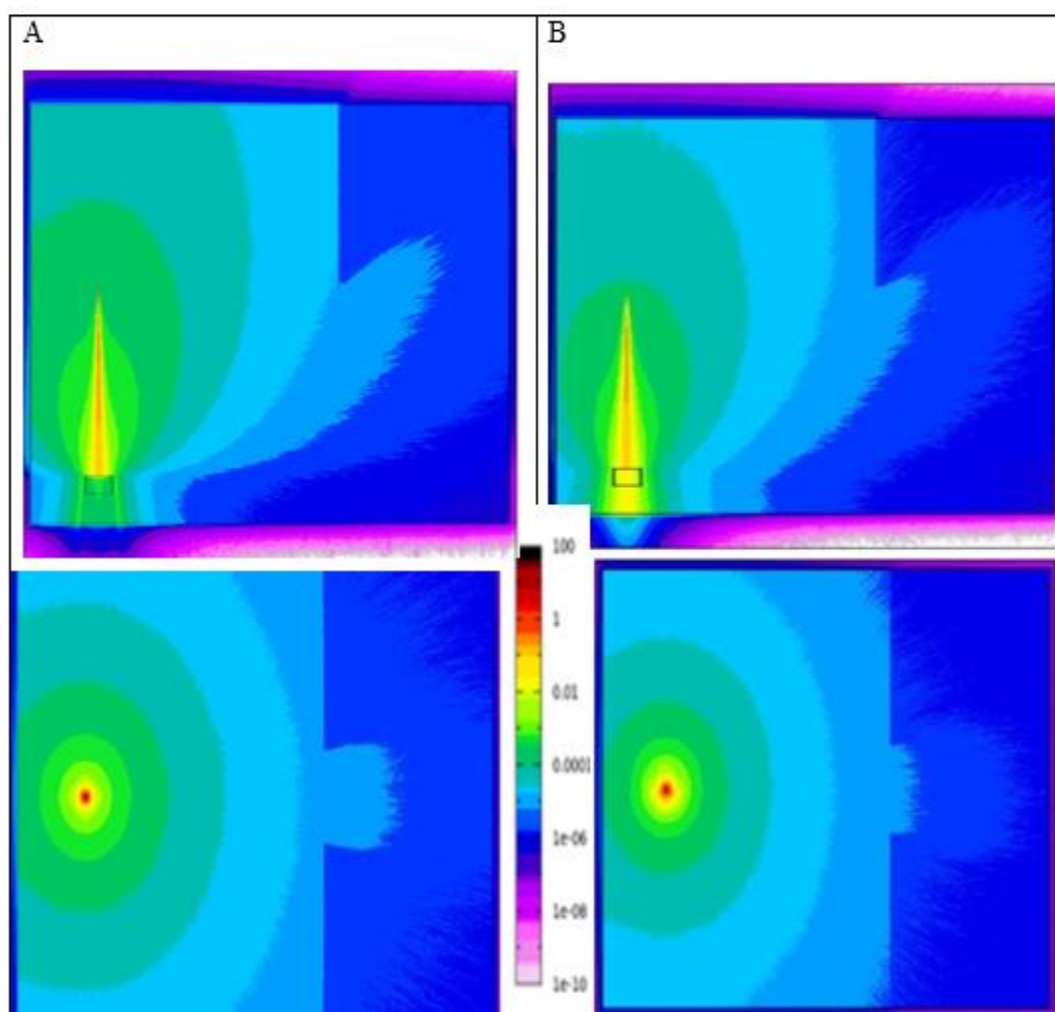
Εικόνα 11: ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας δευτερογενών νετρονίων A: στο [19] ,B :στην παρούσα εργασία. Πάνω: προβολή στο επίπεδο  $(x,z)$  ,κάτω: στο επίπεδο  $(x,y)$

Αρχικά να επισημανθεί ότι στο δημοσίευμα [19] δεν αναφέρεται από τι υλικό αποτελούνταν ο applicator που εισήχθει στην προσομοίωση. Όμως στο [20] υπάρχουν απεικονίσεις ισοδύναμης δόσης για προσομοιώσεις τόσο με μεταλικό όσο και με πλαστικό applicator και έτσι, κάνοντας σύγκριση καταλήξαμε ότι επρόκειτο για πλαστικό (PMMA).

Τόσο από την εικόνα 9 όσο και από την 10 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας κατανέμεται με όμοιο τρόπο στις δύο προσομοιώσεις και είναι ίδιας τάξης μεγέθους σε όλα τα σημεία του χώρου, εκτός από την περιοχή πολύ κοντά στον applicator του οποίου το σχήμα σαφώς επηρεάζει την ισοδύναμη δόση στο χώρο. Από εικόνα 11 παρατηρούμε ότι και η ισοδύναμη δόση νετρονίων είναι ίδιας τάξης μεγέθους σε όλον τον χώρο και για τις δύο προσομοιώσεις, όμως στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 20 φορές λιγότερα πρωτογενή σωματίδια, κάτι που είναι ορατό.

## 6.4.2 Μελέτη για διαφορετικές ενέργειες δέσμης και πάχος πετάσματος

### 6.4.2.1 Σύγκριση μεταξύ δέσμης ηλεκτρονίων 12MeV και 9MeV



Εικόνα 12: Συνολική ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας. A: για δέσμη 12MeV ,B : 9MeV. Πάνω: προβολή στο επίπεδο (x,z), κάτω: στο επίπεδο (x,y)

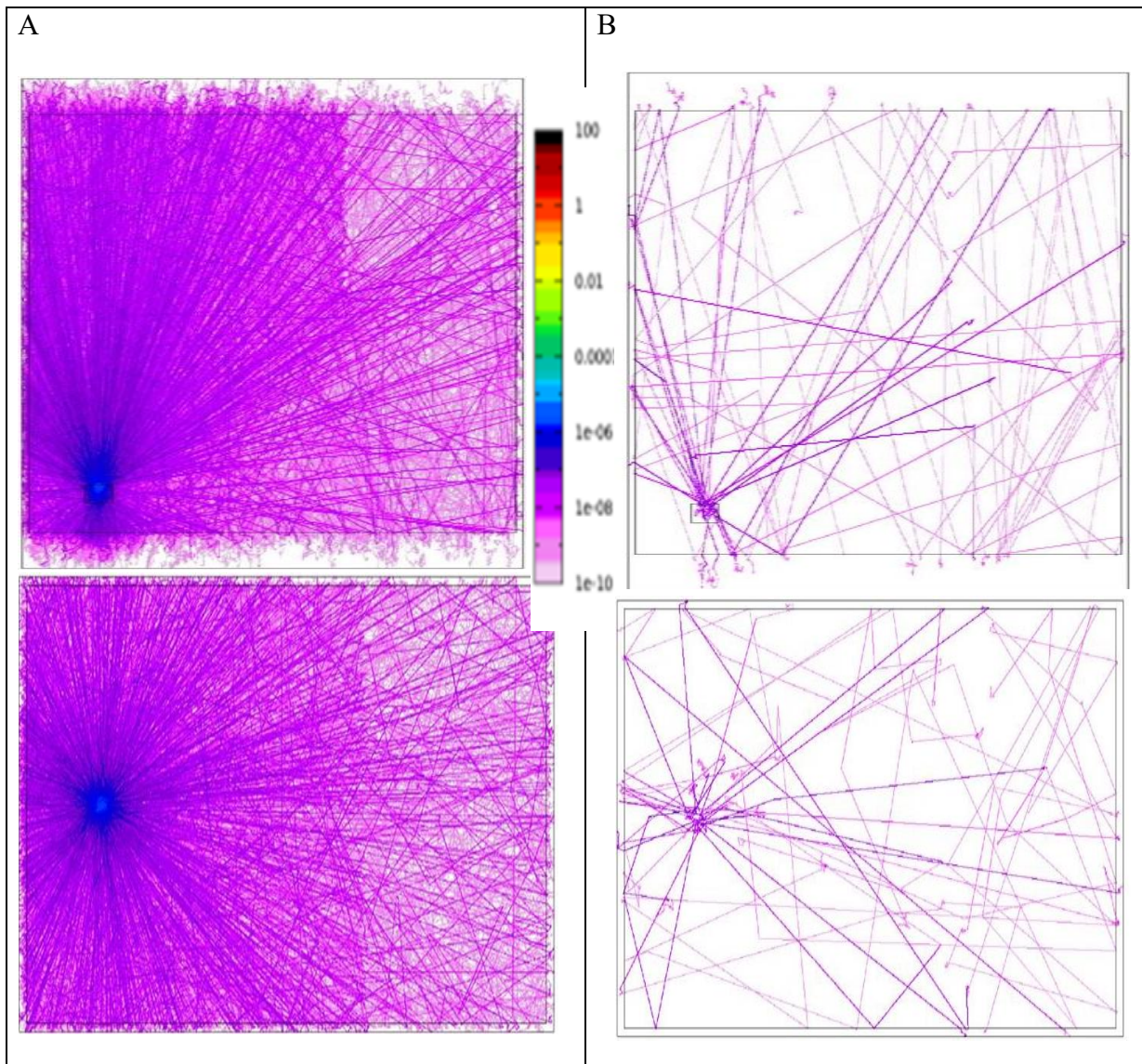
Είναι προφανές ότι η μέγιστη δόση ακτινοβολίας εναποτίθεται κοντά στην πηγή της δέσμης και όσο μεγαλώνει η απόσταση από αυτήν μειώνεται. Επίσης, τα τοιχώματα απορροφούν μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας και έτσι πίσω από αυτά η δόση είναι τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη. Το ίδιο συμβαίνει και στην περιοχή πίσω από τον απορροφητή. Με μια πρώτη ματιά φαίνεται ότι η ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας για 9MeV κατανέμεται με όμοιο τρόπο στο χώρο με την περίπτωση των 12MeV, όμως είναι παντού περίπου μία τάξη μεγέθους μικρότερη. Επίσης, φαίνεται η σύγκριση για τα σημεία ενδιαφέροντος που περιεγράφηκαν στην ενότητα 6.2.

Total dose equivalent(psv /primary)	A2	Z2	Y2a
9Mev	0.070837	8.037e-7	1.594e-7
12Mev	0.153066	2.0757e-5	1.2176e-6

Πίνακας 5: ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας στα τρία σημεία ενδιαφέροντος για ενέργεια δέσμης 9MeV και 12 MeV .

Παρατηρούμε ότι η ισοδύναμη δόση στην περίπτωση της δέσμης των 9MeV είναι σε κάθε σημείο μια τάξη μεγέθους μικρότερη από των 12MeV. Επίσης, όπως είναι λογικό ,η ισοδύναμη δόση στο σημείο Z2 που βρίσκεται πάνω στο άνοιγμα μεταξύ του χώρου θεραπειών και του χώρου ελέγχου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή στο Y2a που βρίσκεται πίσω από τον διαχωριστικό τοίχο. Τέλος, στο σημείο A2, που παρότι βρίσκεται πίσω από τον απορροφητή ηλεκτρονίων, είναι αρκετά κοντά στην πηγή της δέσμης, οπότε η ισοδύναμη δόση είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ότι στα Z2 και Y2a, που είναι σε αρκετά μεγαλύτερη απόσταση .

Παρακάτω παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της δέσμης 12MeV η ισοδύναμη δόση νετρονίων είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερη σε σχέση με την συνολική, όμως είναι υπαρκτή σε κάθε σημείο του χώρου και δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Έχει μέγιστη τιμή κοντά στην πηγή της δέσμης αλλά και μετά τον απορροφητή, όπως φαίνεται ξεκάθαρα από την (z,x) προβολή. Ο απορροφητής ηλεκτρονίων, λόγω του μεγάλου ατομικού αριθμού του μόλυβδου, από τον οποίο είναι κατασκευασμένος, συμβάλλει σημαντικά στο φωτοπυρηνικό φαινόμενο και έτσι σε αυτόν παράγεται το μεγαλύτερο μέρος των δευτερογενών νετρονίων. Μπορεί δηλαδή να συμβάλλει στην μείωση της συνολικής δόσης ακτινοβολίας, όμως σαφώς προκαλεί παράλληλα την αύξηση της παραγωγής δευτερογενών νετρονίων. Αντίθετα, στην περίπτωση της δέσμης των 9MeV, η ισοδύναμη δόση νετρονίων είναι αισθητά μικρότερη και σε πολλά σημεία του χώρου μηδενική. Αυτό ήταν αναμενόμενο, μιας και το φωτοπυρηνικό φαινόμενο λαμβάνει χωρά κυρίως για ηλεκτρόνια ενέργειας μεγαλύτερης των 10MeV.



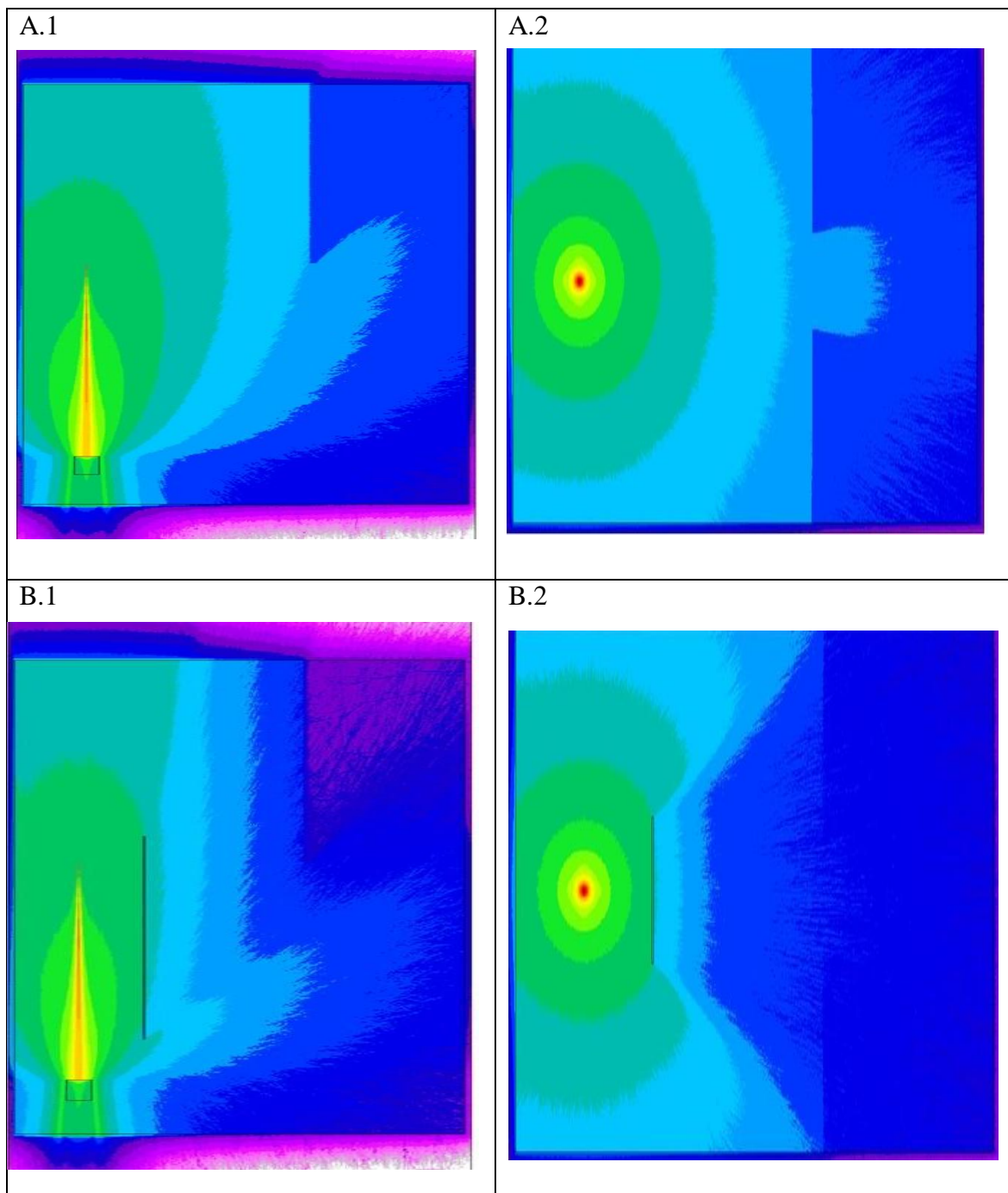
Εικόνα 13: Ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας δευτερογενών νετρονίων.Α: για δέσμη 12MeV, Β : 9MeV. Πάνω: προβολή στο επίπεδο (x,z), κάτω: στο επίπεδο (x,y)

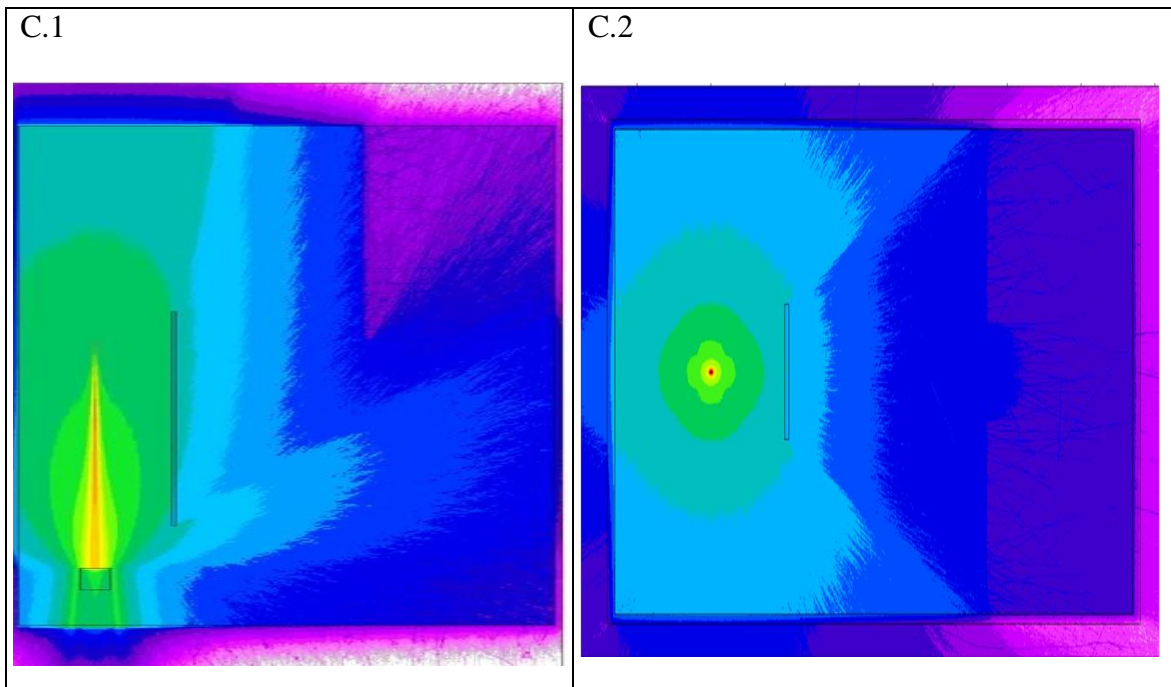
#### 6.4.2.2. Σύγκριση δόσης ακτινοβολίας για διαφορετικού πάχους απορροφητή

Για την περίπτωση όπου η δέσμη έχει τη μέγιστη ενέργεια(12MeV), έχουν ήδη εξαχθεί η συνολική ισοδύναμη δόση και η ισοδύναμη δόση νετρονίων στο χώρο. Θέλοντας να παρέχουμε μεγαλύτερη ακτινοπροστασία στο χώρο ελέγχου, τοποθετούμε προστατευτικό κάλυμμα (shielding) μολυβδου μπροστά από το άνοιγμα ώστε να μειώσουμε την ακτινοβολία που εισέρχεται σε αυτόν. Οι διαστάσεις του είναι 140cm πλάτος X150cm ύψος και μεταβλητό πάχος. Επαναλαμβάνουμε, λοιπόν, τις προσομοιώσεις για πάχος 2cm και 5cm και εξετάζουμε πως μεταβάλλεται η ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας, ιδίως μάλιστα πίσω από το προστατευτικό.

Παρατηρούμε από τις προβολές στα δύο επίπεδα (εικόνα 14) πως πράγματι η ισοδύναμη δόση πίσω από το προστατευτικό κάλυμμα έχει μειωθεί αισθητά και έτσι πολύ λιγότερη ακτινοβολία εισέρχεται στο χώρο ελέγχου,όταν αυτό τοποθετείται . Στην περίπτωση που το πάχος

προστατευτικού είναι 5cm , παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη μείωση της ισοδύναμης δόσης πίσω από αυτό, δηλαδή στο δωμάτιο ελέγχου απ' ότι στην περίπτωση που είχε πάχος 2cm.





Εικόνα 14:συνολική ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας για δέσμη 12MeV και A: χωρίς απορροφητή, B :με απορροφητή πάχους 2cm, C: 5cm.1: προβολή στο επίπεδο (x,z) ,2: στο επίπεδο (x,y)

Στον πίνακα 5 φαίνεται η ισοδύναμη δόση που υπολογίστηκε στα επιλεγμένα σημεία ενδιαφέροντος. Πράγματι, φαίνεται πως όσο αυξάνεται το πάχος του προστατευτικού μειώνεται ανάλογα και η ισοδύναμη δόση στα σημεία πίσω από αυτό Z2 και Y2a ενώ στο A2 που είναι μπροστά από αυτό μένει σχεδόν ανεπηρέαστη. Μάλιστα για πάχος 2cm η ισοδύναμη δόση έχει μειωθεί και στα δύο σημεία κατά μια τάξη μεγέθους, ενώ στα 5cm κατά δύο τάξεις μεγέθους από την αρχική τιμή της.

Πάχος shielding (cm)	A2	Z2	Y2a
0	0.153066	2.0757e-5	1.2176e-6
2	0.149699	2.0731e-6	1.326e-7
5	0.140781	1.512e-7	7.042e-8

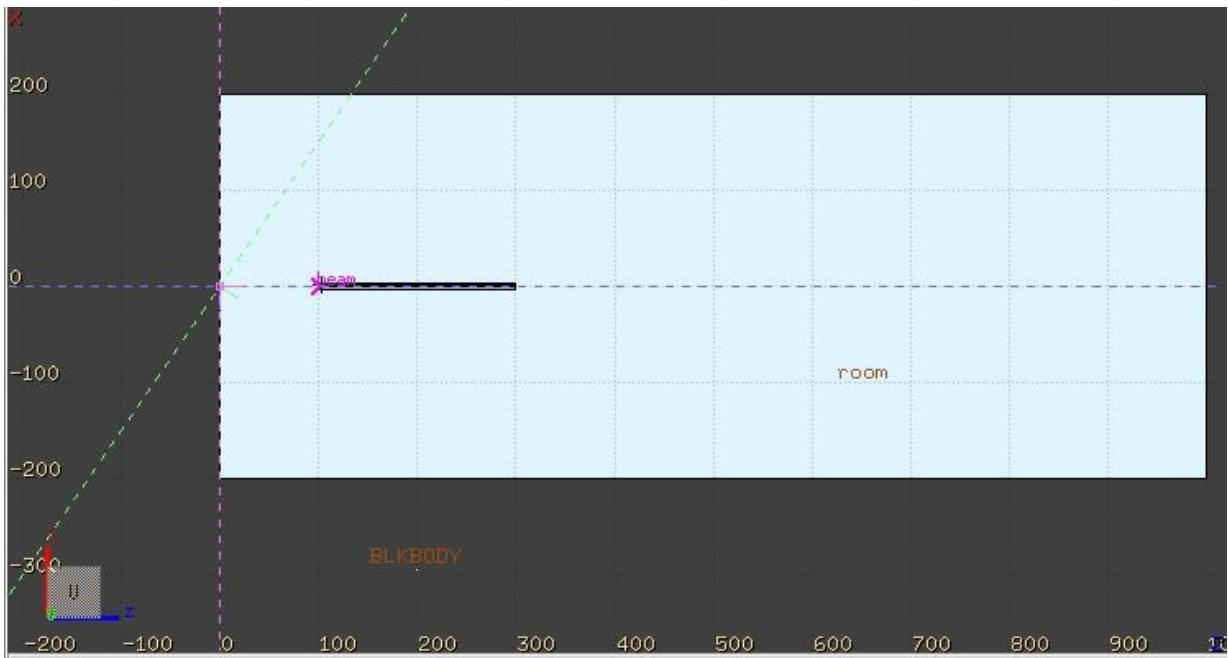
Πίνακας 6: ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας (pSv/primary) στα τρία σημεία ενδιαφέροντος για διαφορετικά πάχη απορροφητή.

## 7. ΜΕΛΕΤΗ ΡΑΔΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗ

### 7.1 Στον εισαγωγέα δέσμης

Η πρώτη κατηγορία προσομοιώσεων που εκτελέστηκε αφορά τη δέσμη ηλεκτρονίων, όταν εξέρχεται από τον εισαγωγέα δέσμης και έχει ενέργεια 300MeV. Επίσης, έχει ενεργειακή διασπορά της τάξης του 0.5% και το πάχος της δέσμης είναι 0.6mm. Η δέσμη βρίσκεται μέσα σε σωλήνα κενού, διαμέτρου 0.6cm και πάχους τοιχώματος 3cm. Το μήκος του σωλήνα κενού επιλέχθηκε 2m και είναι προσανατολισμένος κατά τον z άξονα, που επιλέχθηκε ως ο άξονας διάδοσης της δέσμης. Ο σωλήνας βρίσκεται σε χώρο διαστάσεων (4m X 3.2m X 10m), στον οποίο περιέχεται αέρας, και η πηγή της δέσμης έχει τοποθετηθεί στη θέση (x,y,z)=(0,0,100m).

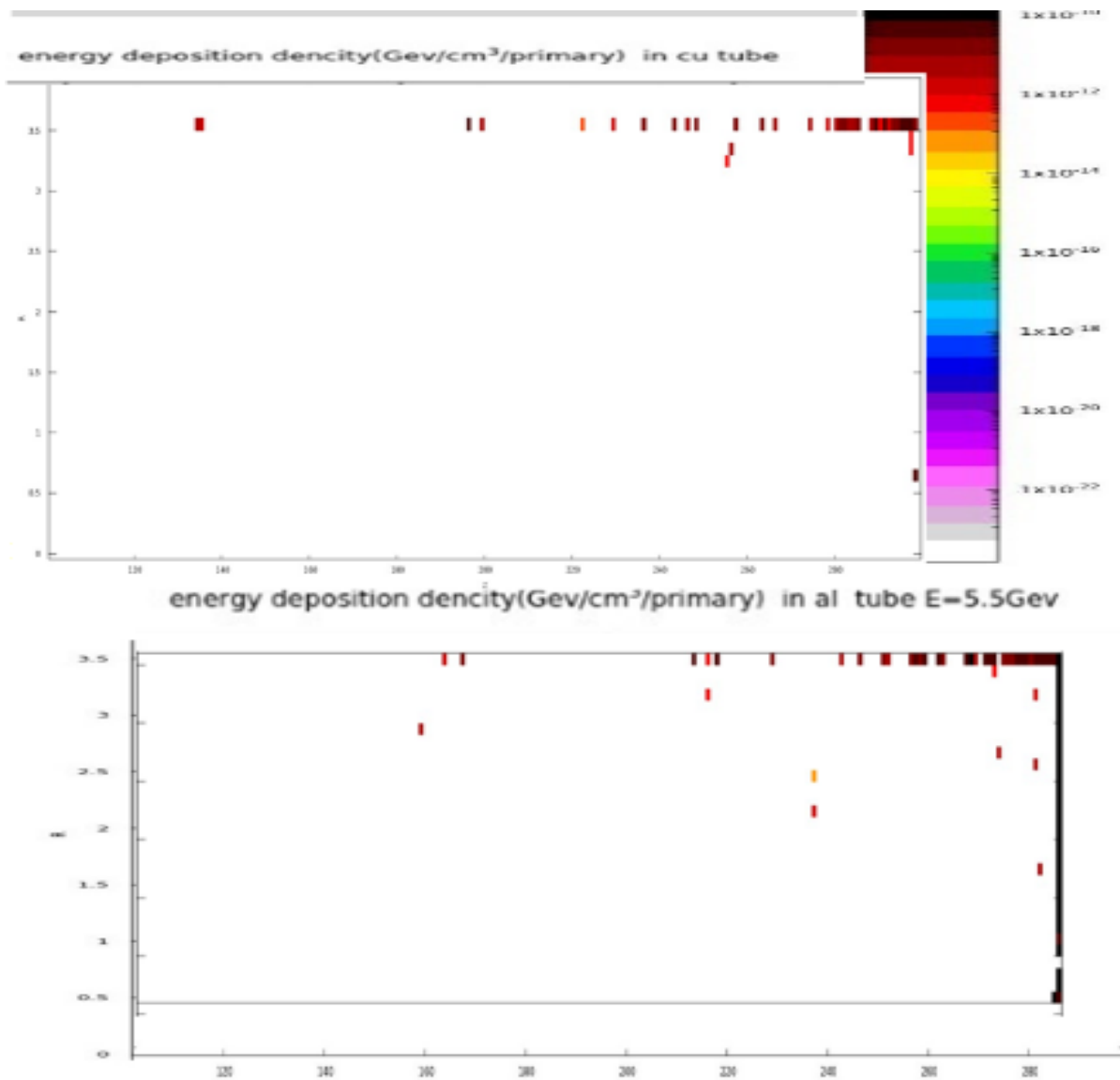
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο το πάχος της δέσμης όσο και η διάμετρος του σωλήνα δεν είναι ρεαλιστικά, καθώς σε έναν FEL απαιτείται να είναι ιδιαίτερα στενά, όμως επιλέχθηκαν μεγάλα για λόγους οπτικοποίησης αλλά και υπολογιστικού κόστους της προσομοίωσης.



Εικόνα 15:χώρος προσομοιώσεων: προβολή στο επίπεδο (z,x)

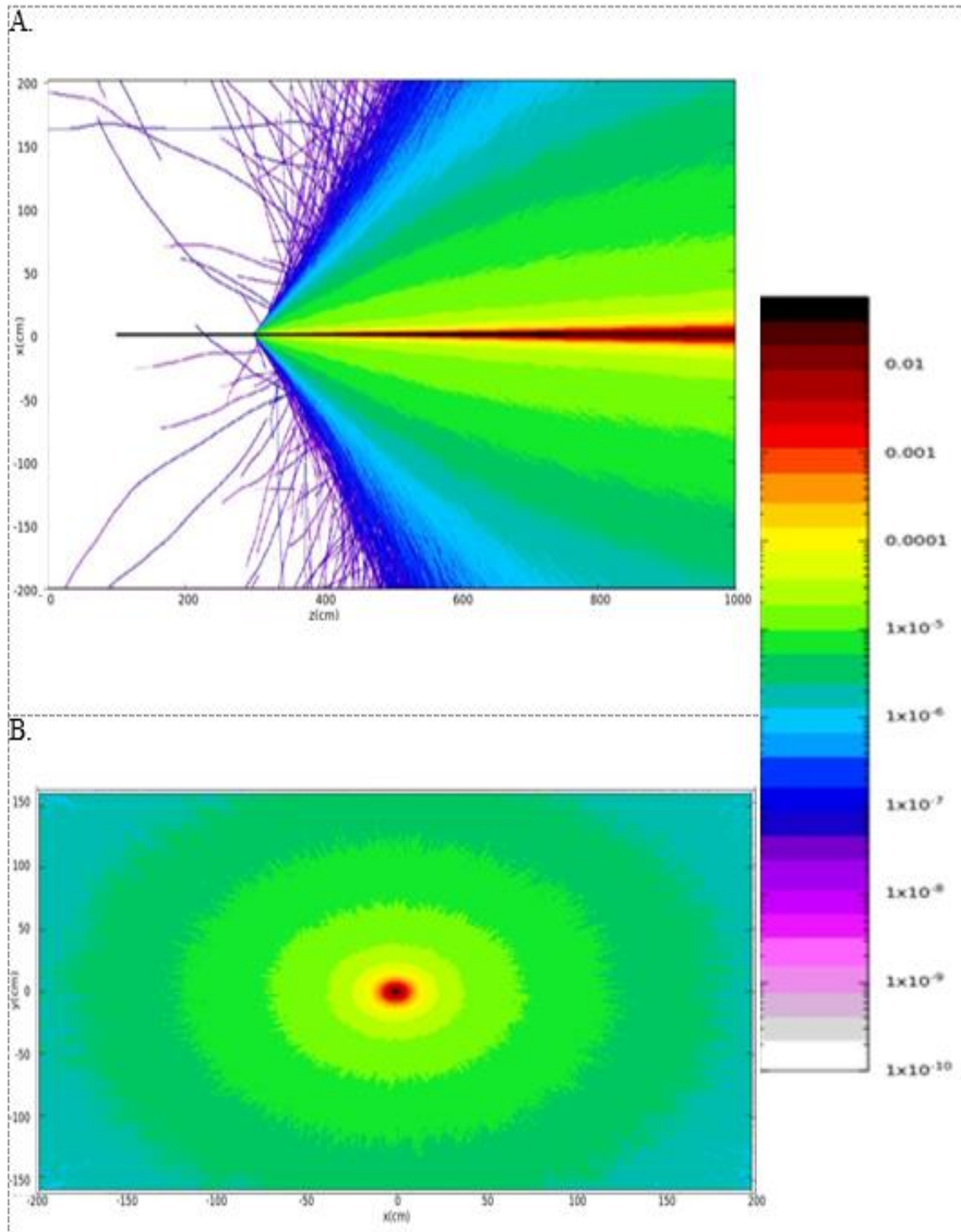
Παρατηρείται ότι εντός του σωλήνα, λόγω της αρτιότητας της προσομοίωσης που εκτελείται από το FLUKA, η δέσμη είναι πλήρως εστιασμένη και δεν αποκλίνει, οπότε δεν συγκρούεται με τα τοιχώματα του σωλήνα. Αυτό διαπιστώθηκε καθώς μετρήθηκε η πυκνότητα εναπόθεσης ενέργειας στο τοίχωμα σωλήνα χαλκού και, όπως φαίνεται παρακάτω είναι σχεδόν μηδενική. Δεν ξεπερνά πουθενά τα  $10^{-1} \text{eV/cm}^3/\text{primary}$ . Το ίδιο ισχύει και αν δοκιμάσουμε άλλο υλικό σωλήνα, όπως αλουμίνιο, αλλά και αν αυξήσουμε περισσότερο την ενέργεια της δέσμης, συγκεκριμένα στην ανώτερη τιμή ενέργειας δέσμης που παράγεται στην υπό μελέτη διάταξη: στα 5.5 GeV. Συνεπώς, δεν υφίσταται κίνδυνος σε καμία περίπτωση να υπάρξει φθορά του σωλήνα από πρόσκρουση σωματιδίων σε αυτόν.





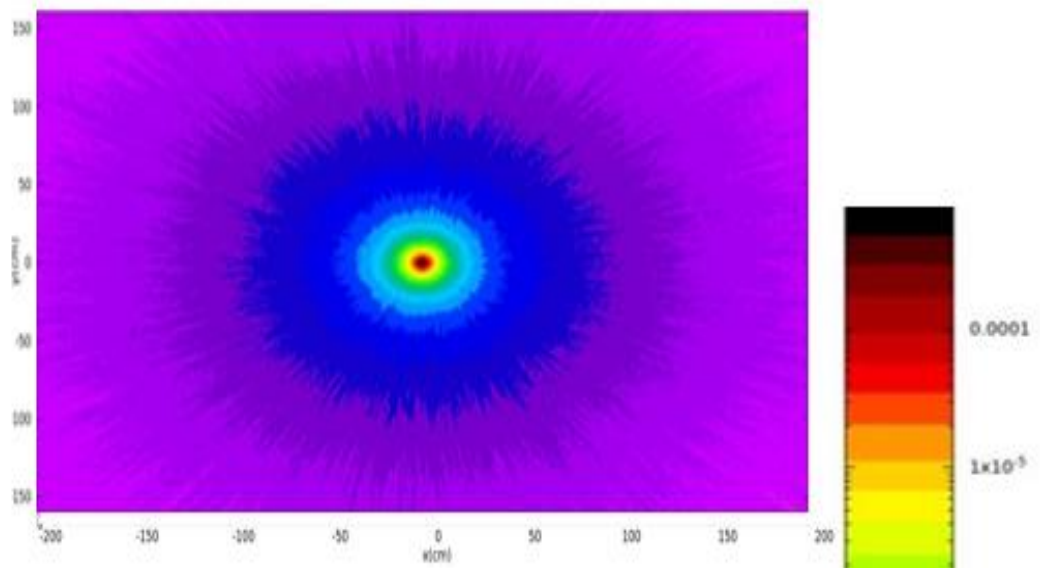
Εικόνα 16: πυκνότητα εναποτιθέμενης ενέργειας σε σωλήνα κενού : προβολή στο επίπεδο(Z,R)

Παρακάτω μελετάται η ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας στον χώρο της διάταξης και συγκεκριμένα οι **ισοδύναμες δόσεις ηλεκτρονίων, φωτονίων και νετρονίων**. Ακολουθούν απεικονίσεις τόσο προβολών πάνω σε επίπεδο (εικόνες 17-19) όσο και πάνω σε άξονα (εικόνες 20-22)

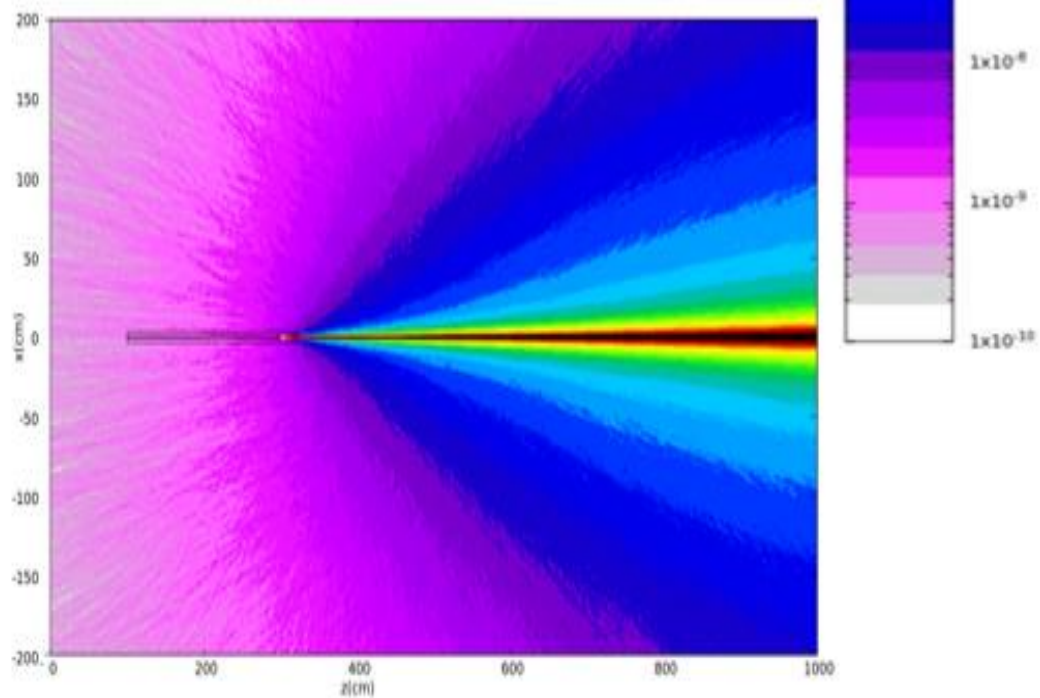


Εικόνα 17: 2D προβολή ισοδύναμης δόσης ηλεκτρονίων για δέσμη 0.3GeV. Α:στο επίπεδο (z,x)  
 Β:στο (x,y)

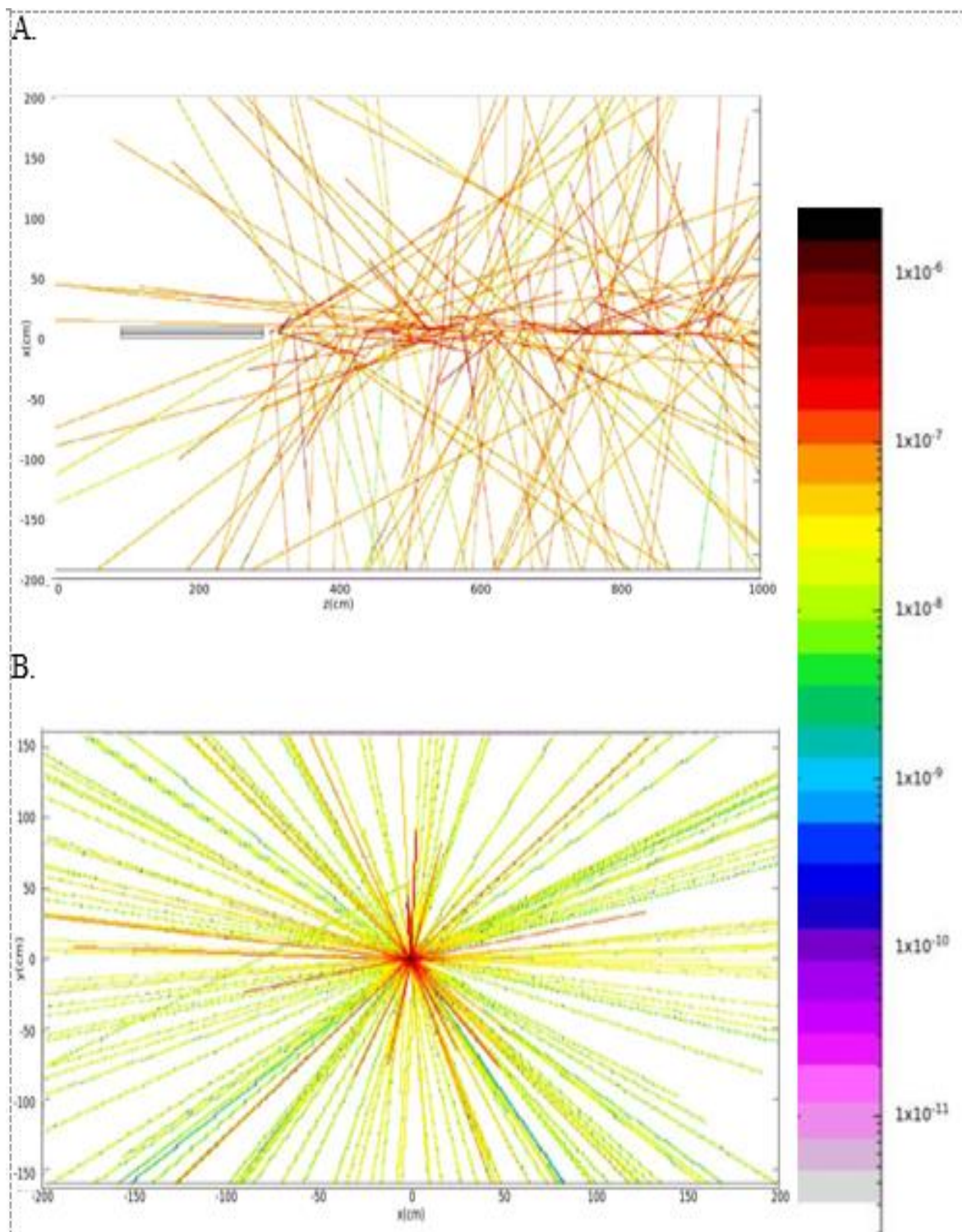
A.



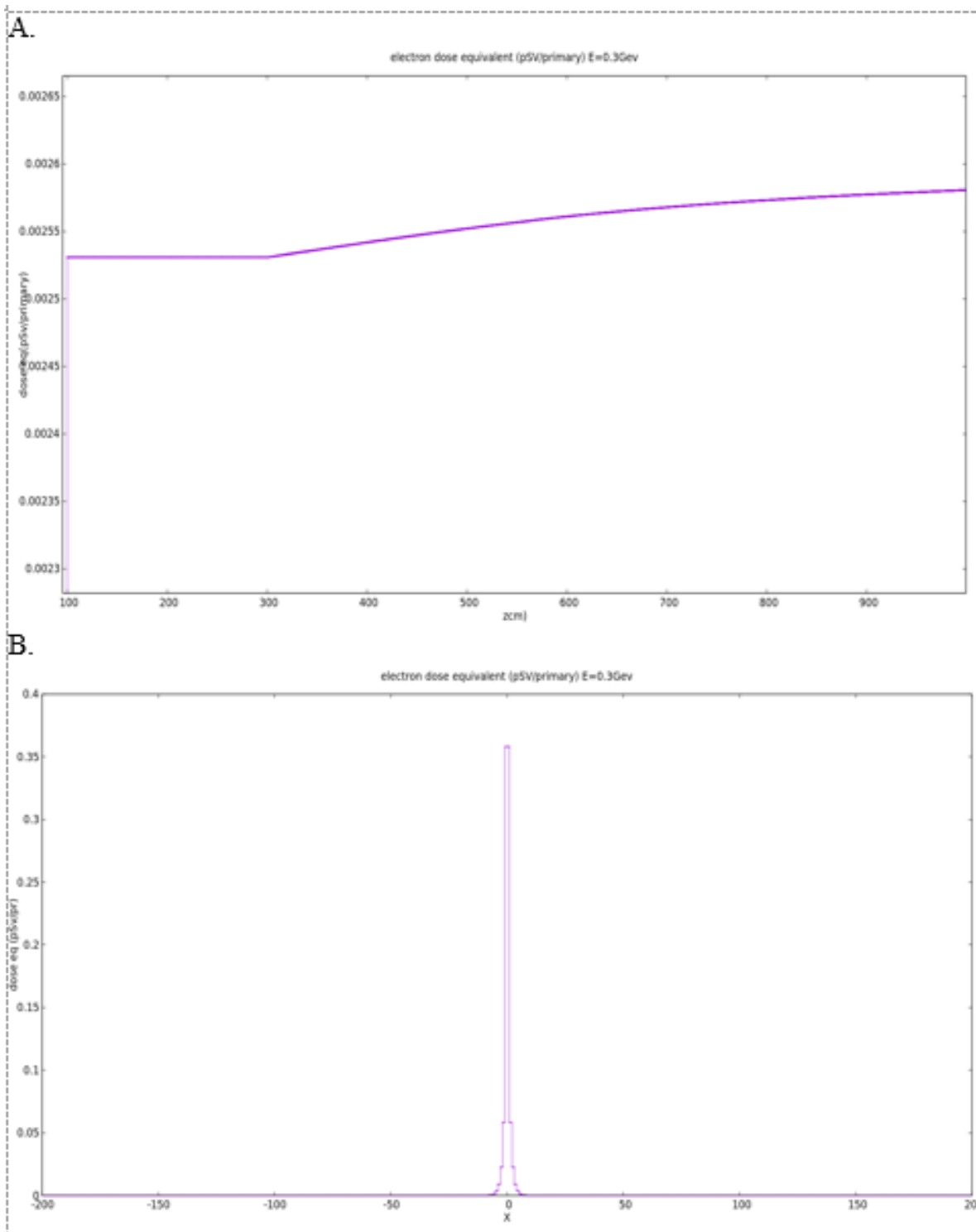
B.



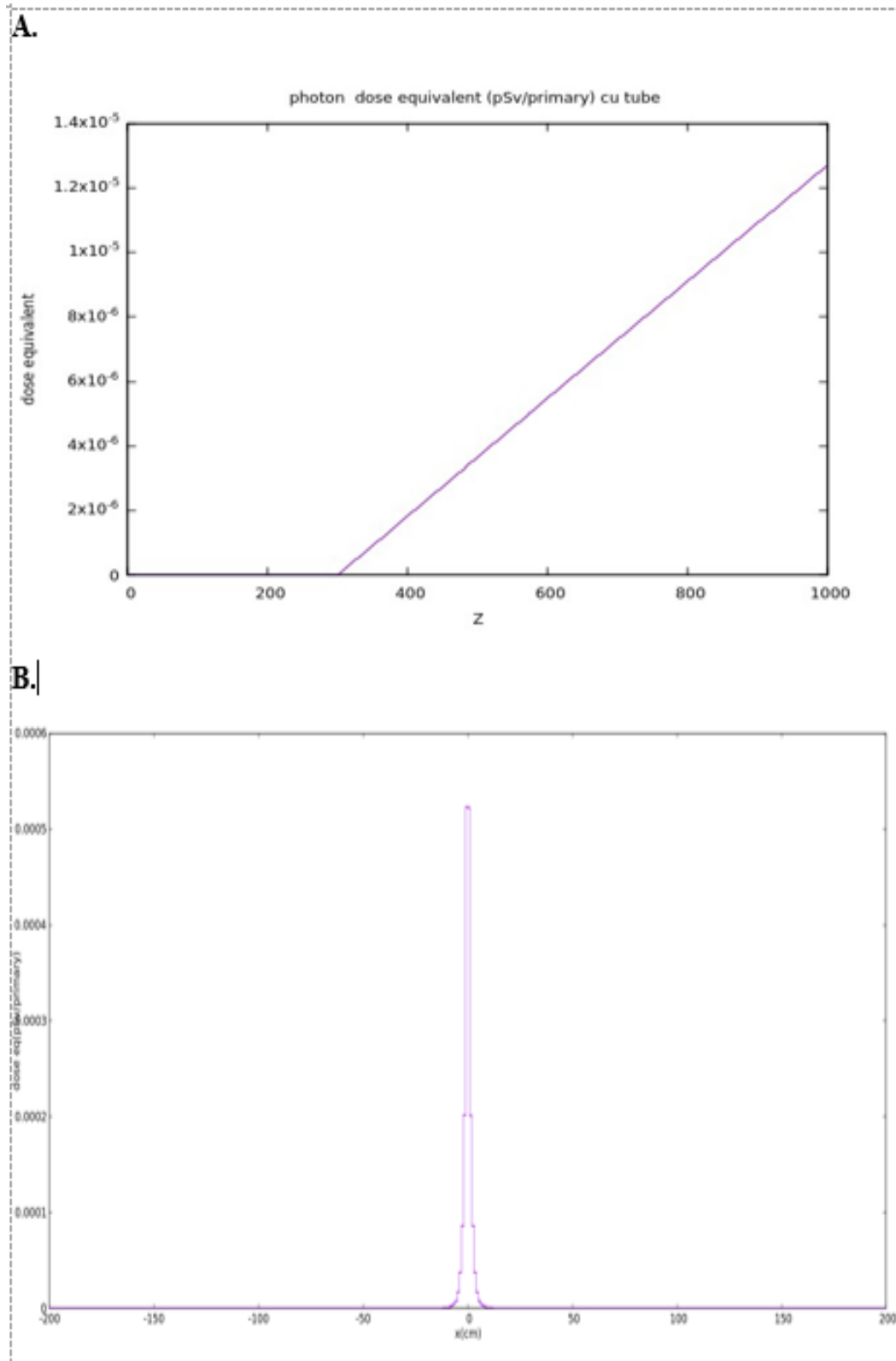
Εικόνα 18: 2D προβολή ισοδύναμης δόσης φωτονίων για δέσμη 0.3GeV. Α:στο επίπεδο  $(z,x)$   
Β:στο  $(x,y)$



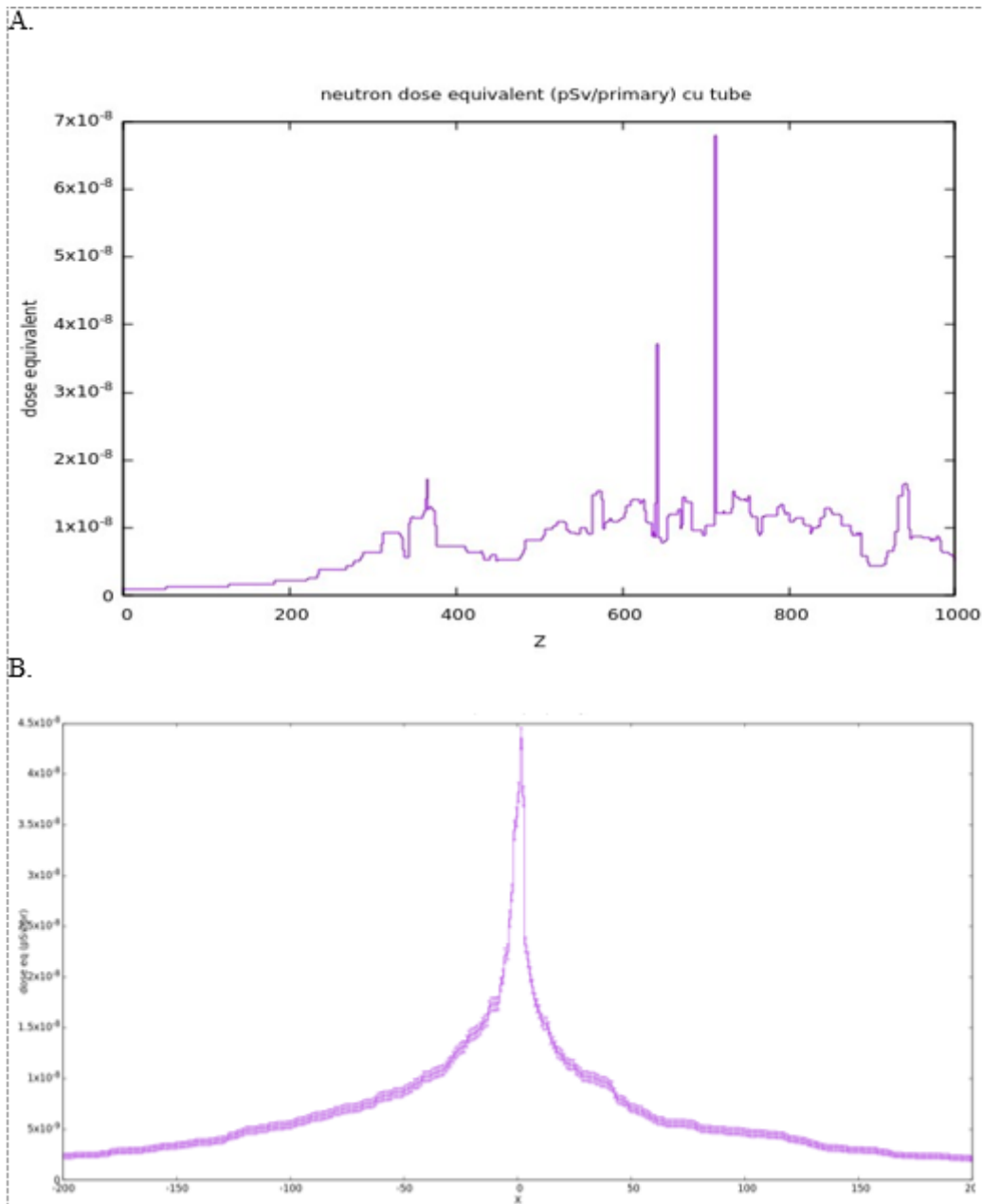
Εικόνα 19: 2D προβολή ισοδύναμης δόσης νετρονίων για δέσμη 0.3GeV. Α:στο επίπεδο  $(z,x)$   
 Β:στο  $(x,y)$



Εικόνα 20: ισοδύναμη δόση ηλεκτρονίων :A :προβολή στον άξονα z  
 B:προβολή στον άξονα x



Εικόνα 21:ισοδύναμη δόση φωτονίων :A :προβολή στον άξονα z B.στον άξονα χ



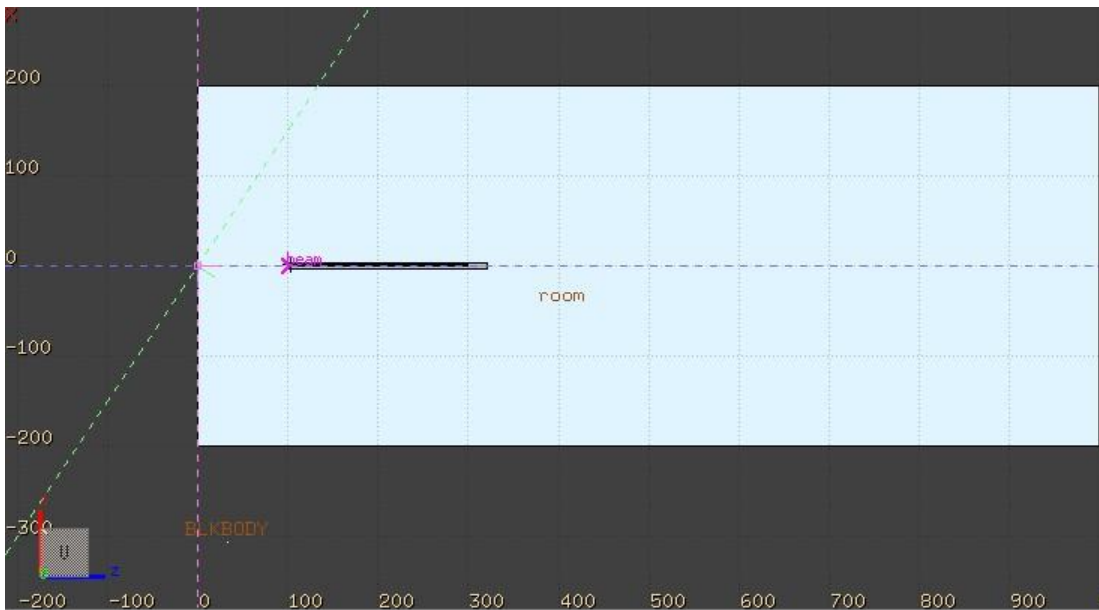
Εικόνα 22:ισοδύναμη δόση νετρονίων :Α :προβολή στον άξονα z  
 Β:προβολή στον άξονα x

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω αναπαραστάσεις η ισοδύναμη δόση ηλεκτρονίων στο χώρο είναι η μεγαλύτερη, καθώς αυτά αποτελούν τα πρωτογενή σωματίδια. Είναι φανερό πως η ισοδύναμη δόση που εναποθέτουν στο χώρο αυξάνεται κατά τον άξονα διάδοσης z, ενώ μειώνεται αρκετά απότομα στο κάθετο σε αυτόν επίπεδο (x,y) όσο

αυξάνεται η απόσταση από το (0,0). Μάλιστα σε καθέναν από τους άξονες x και y φαίνεται να έχει τη μορφή κατανομής gauss. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση των φωτονίων, των οποίων όμως η ισοδύναμη δόση είναι τάξεις μεγέθους μικρότερη και προφανώς ξεκινά από την μηδενική τιμή. Επίσης από τις προβολές τόσο στο επίπεδο διάδοσης της δέσμης, όσο και στο κάθετο σε αυτό γίνεται αισθητό ότι τα φωτόνια εναποθέτουν την ενέργειά τους με ιδιαίτερα ομοιόμορφο τρόπο σε σύγκριση με τα ηλεκτρόνια. Η ισοδύναμη δόση των νετρονίων είναι πάρα πολύ μικρή, κάτι που είναι αναμενόμενο. Επίσης παρουσιάζει κάποιες κορυφές σε σημεία του άξονα Z, όπου προφανώς έλαβε χώρο εντονότερα το ηλεκτροπυρηνικό φαινόμενο. Επίσης από την προβολή στον κάθετο ως προς την διάδοση της δέσμης επίπεδο x, είναι φανερό ότι η εναποτιθέμενη δόση νετρονίων παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά σε σχέση με τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια, κάτι που οφείλεται στην φύση των σωματιδίων αυτών και είναι φανερό σε όλες τις αντίστοιχες απεικονίσεις ισοδύναμης δόσης νετρονίων.

## 7.2 Για απορροφητές ηλεκτρονίων από διαφορετικά υλικά

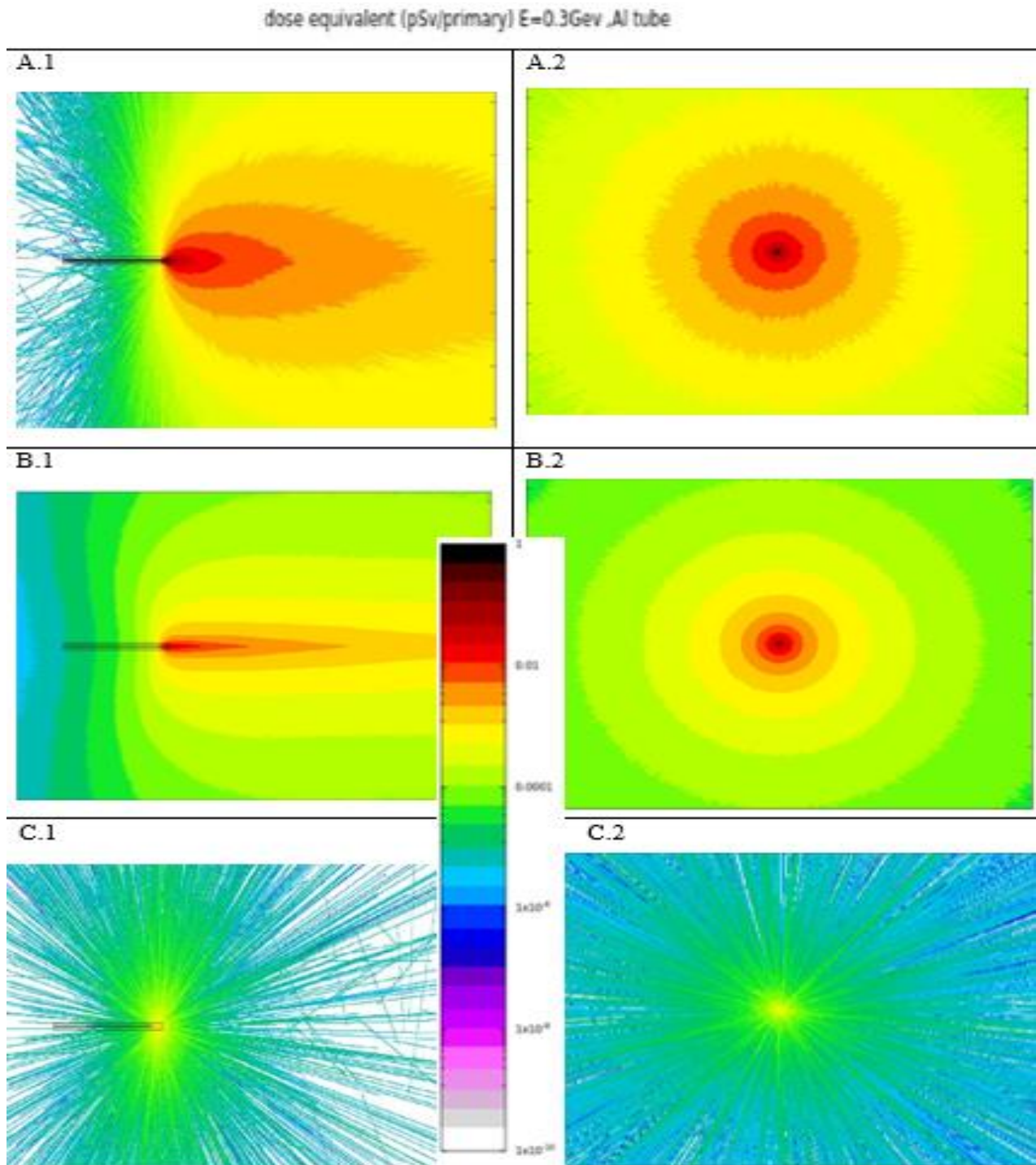
Εν συνεχεία, με σκοπό να μελετήσουμε το πως επιδρά η χρήση διαφόρων υλικών ως απορροφητές ηλεκτρονίων, τοποθετήθηκε απορροφητής πάχους 20cm ακριβώς στην έξοδο από τον σωλήνα κενού. Αυτός είναι από αλουμίνιο, χαλκό ή ανοξείδωτο χάλυβα και εξετάζεται σε καθεμιά από αυτές τις περιπτώσεις η ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας στον χώρο αλλά και η ροή σωματιδίων εντός του εκάστοτε υλικού.



Εικόνα 23: ο χώρος προσομοιώσεων μετά την προσθήκη απορροφητή ηλεκτρονίων έξω από τον σωλήνα κενού.

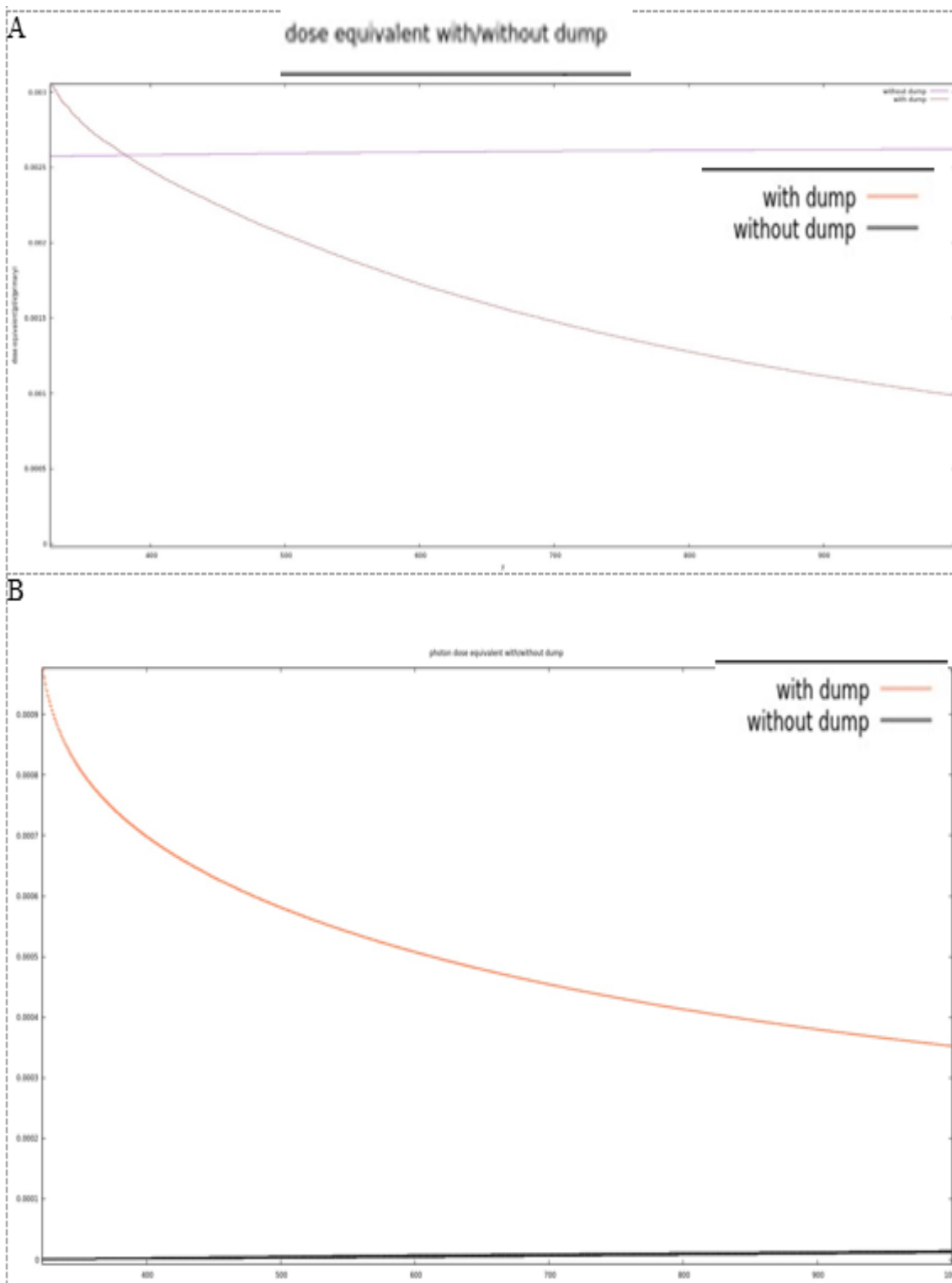


7.2.1 Σύγκριση ισοδύναμης δόσης με και χωρίς την χρήση απορροφητή ηλεκτρονίων από αλουμίνιο



Εικόνα 24: ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας με απορροφητή πάχους 20cm και A:ηλεκτρονίωνB :φωτονίων, C: νετρονίων1: προβολή στο επίπεδο ( $\zeta,\chi$ ) ,2: στο επίπεδο (x,y)

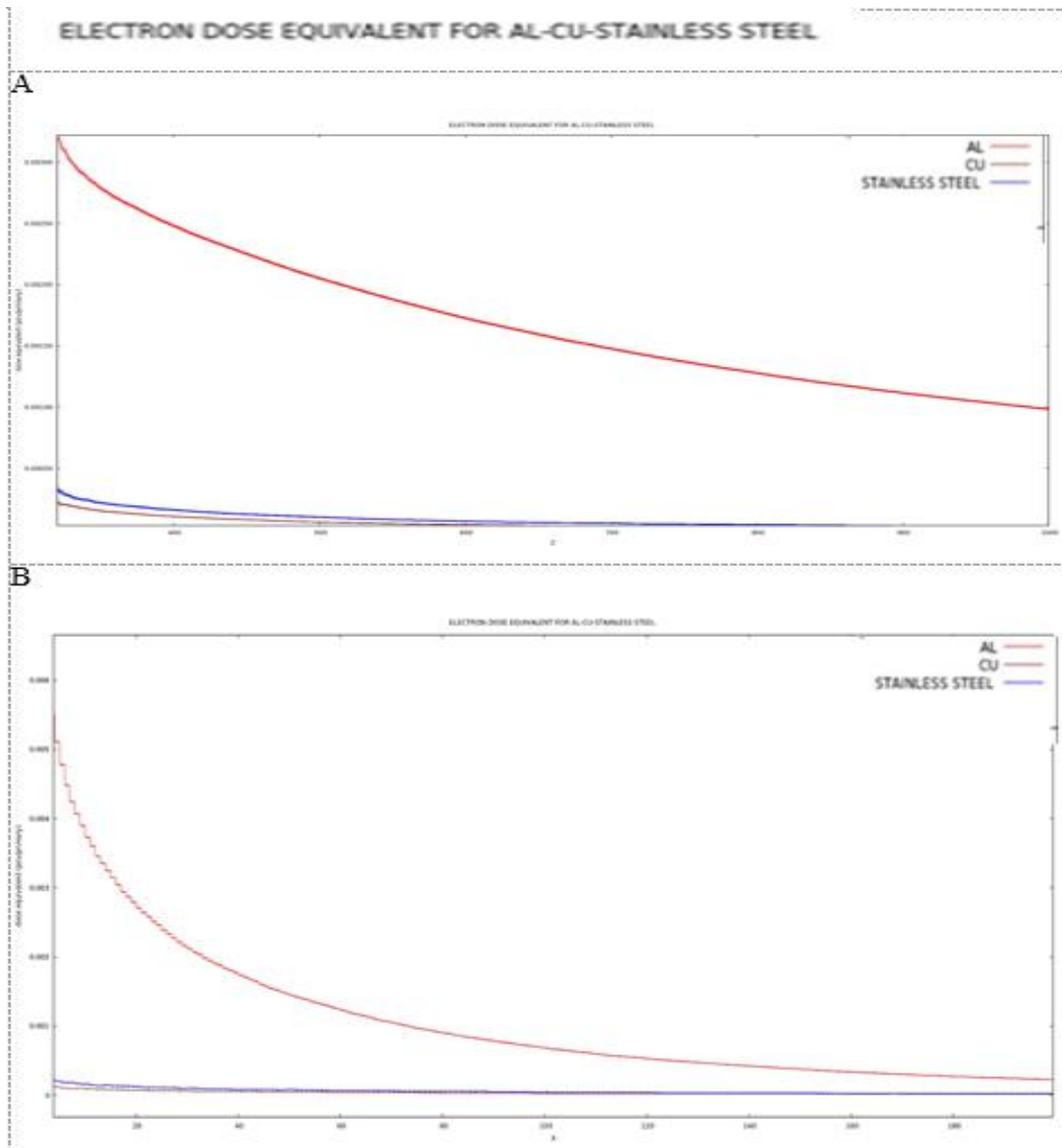
Στην εικόνα 25 παριστάνεται σε κοινό γράφημα η ισοδύναμη δόση ηλεκτρονίων στον χώρο ως προς τον άξονα διάδοσης z για τις περιπτώσεις με και χωρίς τοποθέτηση απορροφητή στην εξοδο του σωλήνα κενού. Είναι φανερό ότι στην περίπτωση που υπάρχει απορροφητής ηλεκτρονίων, η ισοδύναμη δόση τους στο χώρο είναι μικρότερη απ' ότι ήταν χωρίς αυτόν. Όμως η ισοδύναμη δόση τόσο των φωτονίων, όσο και των νετρονίων είναι αρκετά αυξημένη σε σχέση με την περίπτωση που δεν υπήρχε. Αυτό οφείλεται στο ότι στο εσωτερικό του υλικού, λόγω της αλληλεπίδρασης της δέσμης με τα ηλεκτρόνια αλλά και τους πυρήνες του, παράγονται πολλά δευτερογενή σωματίδια. Η διαφορά γίνεται ακόμα πιο αισθητή για τα νετρόνια, των οποίων η ισοδύναμη δόση ήταν αρχικά σχεδόν αμελητέα. Προς οπτικοποίησης αυτής της τεράστιας διαφοράς, παρατίθεται σε κοινό γράφημα η προβολή της ισοδύναμης δόσης φωτονίων πάνω στον z άξονα με και χωρίς τον απορροφητή. Η διαφορά είναι δύο τάξεις μεγέθους, καθώς στην περίπτωση χωρίς τον απορροφητή η μέγιστη τιμή είναι της τάξης του  $10^{-5}$  pSv/primary, ενώ με απορροφητή παρουσιάζει μέγιστη τιμή  $10^{-3}$  pSv/primary, όταν εξέρχεται από το υλικό.



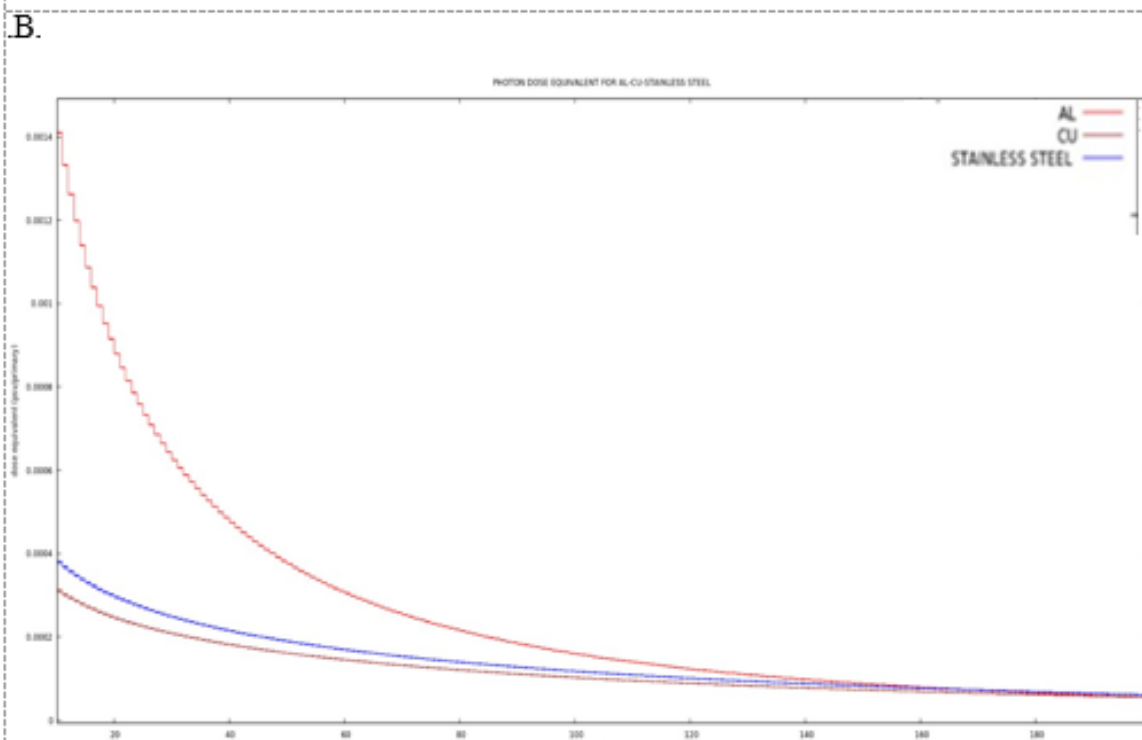
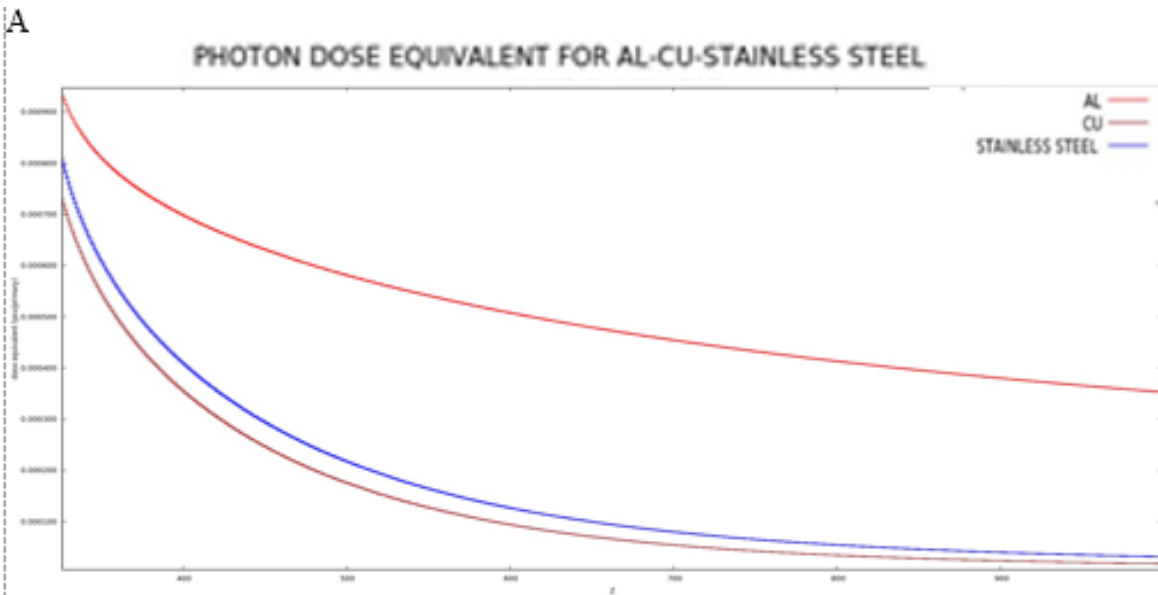
Εικόνα 25: Προβολή της ισοδύναμης δόσης A:ηλεκτρονίων και B:φωτονίων ως προς τον άξονα διάδοσης z για την περίπτωση με και χωρίς απορροφητή.

## 7.2.2 Συγκρίσεις μεταξύ των τριών υλικών απορροφητή

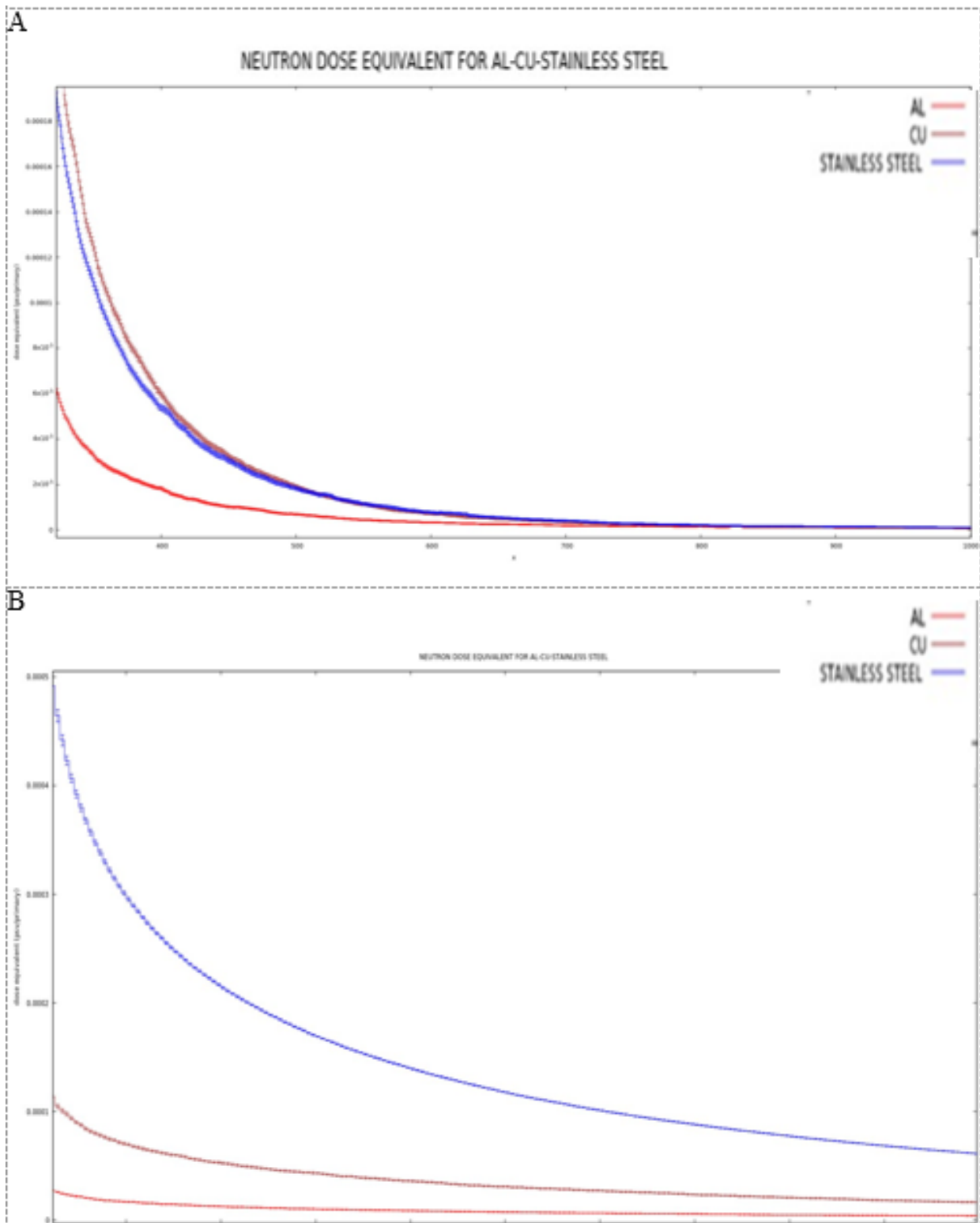
Για τις περιπτώσεις του χαλκού και του ανοξείδωτου χάλυβα, δεν είναι εύκολο να βγάλουμε συγκριτικά με την περίπτωση του αλουμινίου συμπεράσματα από τις 2D αναπαραστάσεις. Αντίθετα, μια καλή σύγκριση των τριών περιπτώσεων προκύπτει, εάν αναπαραστήσουμε τις αντίστοιχες ισοδύναμες δόσεις σε κοινά 1D γραφήματα: προβολής πάνω στον άξονα διάδοσης z (ξεκινώντας από z=320cm όπου η δέσμη βγαίνει από τον απορροφητή), καθώς και προβολής πάνω στον κάθετο άξονα x.



Εικόνα 26: προβολή της ισοδύναμης δόσης ηλεκτρονίων μετά την έξοδο της δέσμης από τον απορροφητή για τις τρεις περιπτώσεις υλικών :A. κατά τον άξονα διάδοσης z B. κατά τον κάθετο άξονα x.



Εικόνα 27: προβολή της ισοδύναμης δόσης φωτονίων μετά την έξοδο της δέσμης από τον απορροφητή για τις τρεις περιπτώσεις υλικών :Α. κατά τον άξονα διάδοσης z Β. κατά τον κάθετο άξονα x.



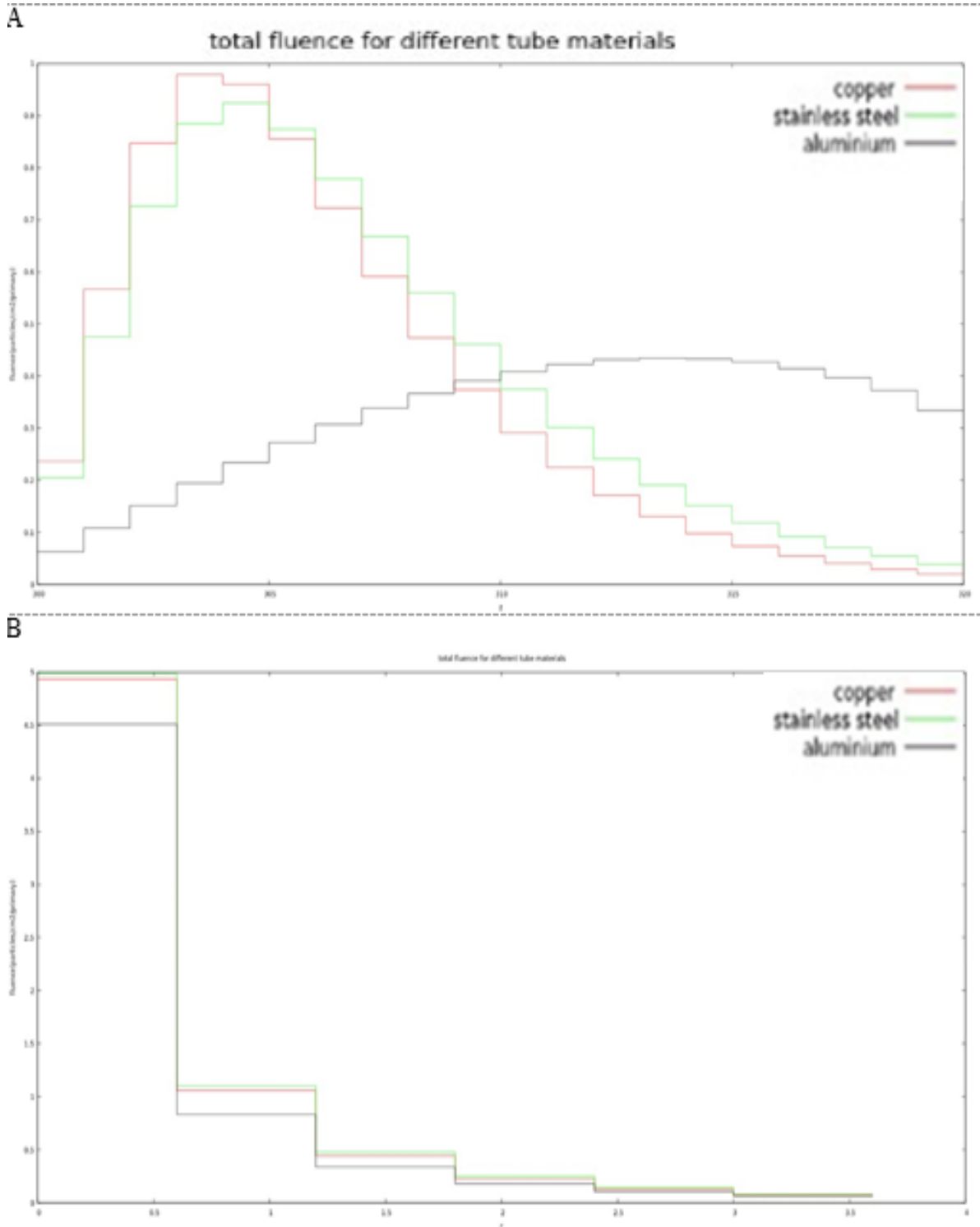
Εικόνα 28: προβολή της ισοδύναμης δόσης νετρονίων μετά την έξοδο της δέσμης από τον απορροφητή για τις τρεις περιπτώσεις υλικών :Α. κατά τον άξονα διάδοσης z Β. κατά τον κάθετο άξονα x.

Παρατηρούμε ότι τόσο στην περίπτωση των ηλεκτρονίων, όσο και φωτονίων, λαμβάνουμε την μεγαλύτερη ισοδύναμη δόση στην περίπτωση του απορροφητή. Την αμέσως μικρότερη, αλλά με μεγάλη διαφορά τιμών, λαμβάνουμε για τον ανοξείδωτο χάλυβα και τέλος για τον χαλκό. Οι ισοδύναμες δόσεις απέχουν ελάχιστα μεταξύ τους στην περίπτωση του χαλκού και του χάλυβα. Επίσης ο ρυθμός μείωσης της ισοδύναμης δόσης είναι αισθητά μεγαλύτερος στην περίπτωση του αλουμινίου, ιδίως μάλιστα ως προς τον άξονα x, όπου σε μεγάλες αποστάσεις η ισοδύναμη δόση σχεδόν εξισώνεται με αυτή των άλλων δύο περιπτώσεων.

Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να ερμηνευτεί μέσω τις εμβέλειας (CSDA range) των ηλεκτρονίων σε διαφορετικά υλικά, η οποία ορίστηκε στην παράγραφο. Είναι φανερό από την εικόνα 6 ότι ηλεκτρόνια ίδιας ενέργειας διασχίζουν μεγαλύτερη διαδρομή εντός του αλουμινίου έως ότου χάσουν την ενέργεια τους απ' ότι στον χαλκό η στον χάλυβα καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη εμβέλεια. Συνεπώς, στην περίπτωσή μας, όταν τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από τον απορροφητή, έχουν μεγαλύτερη ενέργεια αν αυτός είναι από αλουμίνιο και γι' αυτόν το λόγο αλληλοεπιδρούν εντονότερα με τα μόρια του αέρα και εναποθέτουν μεγαλύτερη ισοδύναμη δόση έξω από αυτόν.

Αντίθετα, όσον αφορά την ισοδύναμη δόση νετρονίων λαμβάνουμε την ελάχιστη στην περίπτωση του απορροφητή αλουμινίου. Την μέγιστη ως προς τον άξονα x λαμβάνουμε με τον ανοξείδωτο χάλυβα, ενώ ως προς τον άξονα z η διαφορά είναι ανεπαίσθητη μεταξύ χάλυβα και χαλκού. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί καθώς το ηλεκτροπυρηνικό φαινόμενο γίνεται εντονότερο με την αύξηση του ατομικού αριθμού  $Z$ . Το αλουμίνιο έχει  $Z=13$ , ενώ ο χαλκός 29 και ο σίδηρος (από τον οποίον αποτελείται ο ανοξείδωτος χάλυβας κατά μεγαλύτερο ποσοστό) 26, οπότε το αποτέλεσμα φαίνεται εύλογο.

Αντίστοιχη σύγκριση έγινε για την ροή (fluence) ακτινοβολίας εντός του απορροφητή για τις τρεις περιπτώσεις υλικών. Από αυτήν φαίνεται ότι η συνολική ροή ακτινοβολίας όταν εξέρχεται από το υλικό είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του αλουμινίου.



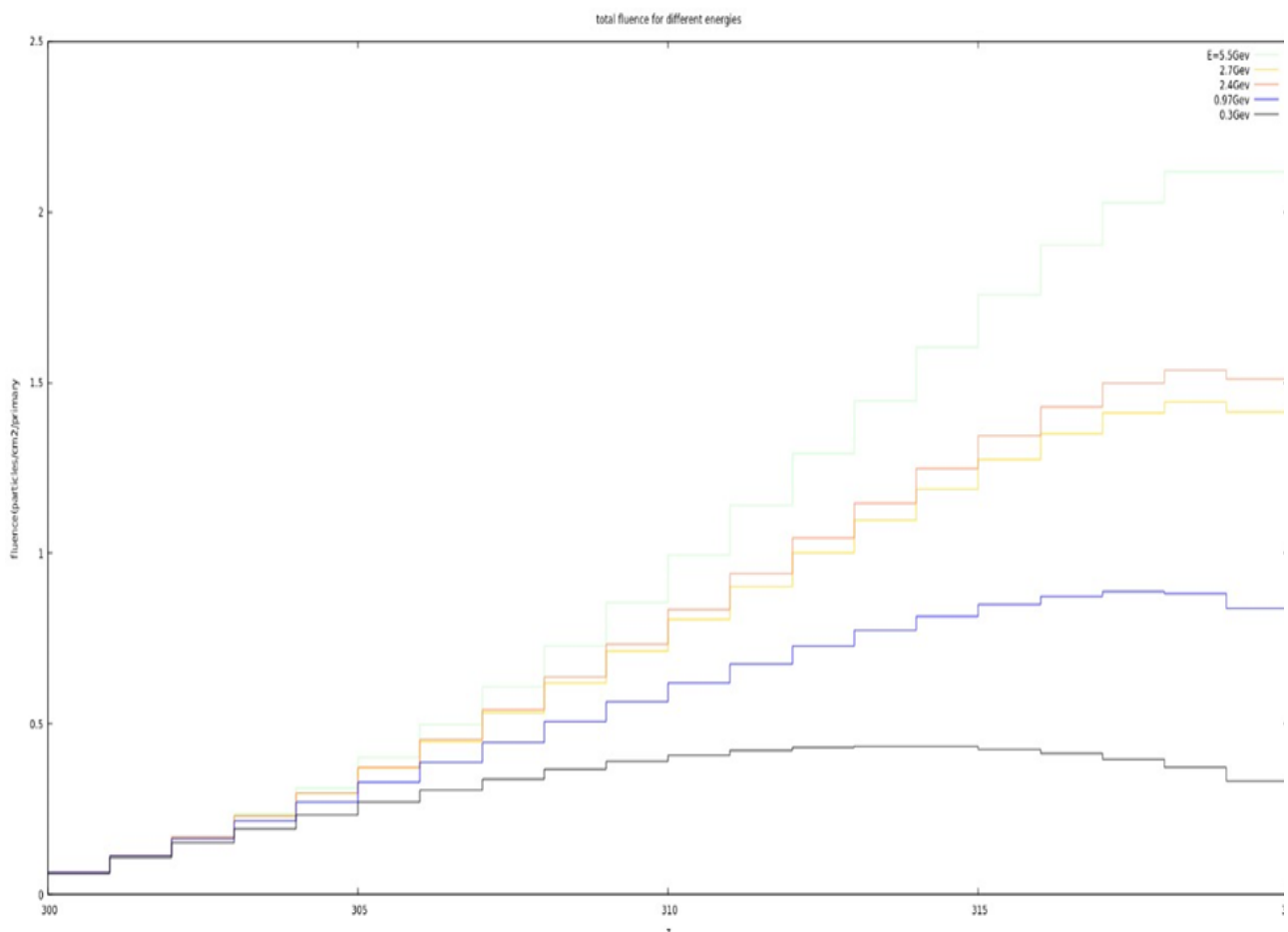
Εικόνα 29:συνολική ροή σωματιδίων(particles/cm<sup>2</sup>/primary) εντός του απορροφητή για τις τρεις περιπτώσεις υλικών. Α. προβολή κατά τον άξονα διάδοσης Z ,Β. ακτινική προβολή R



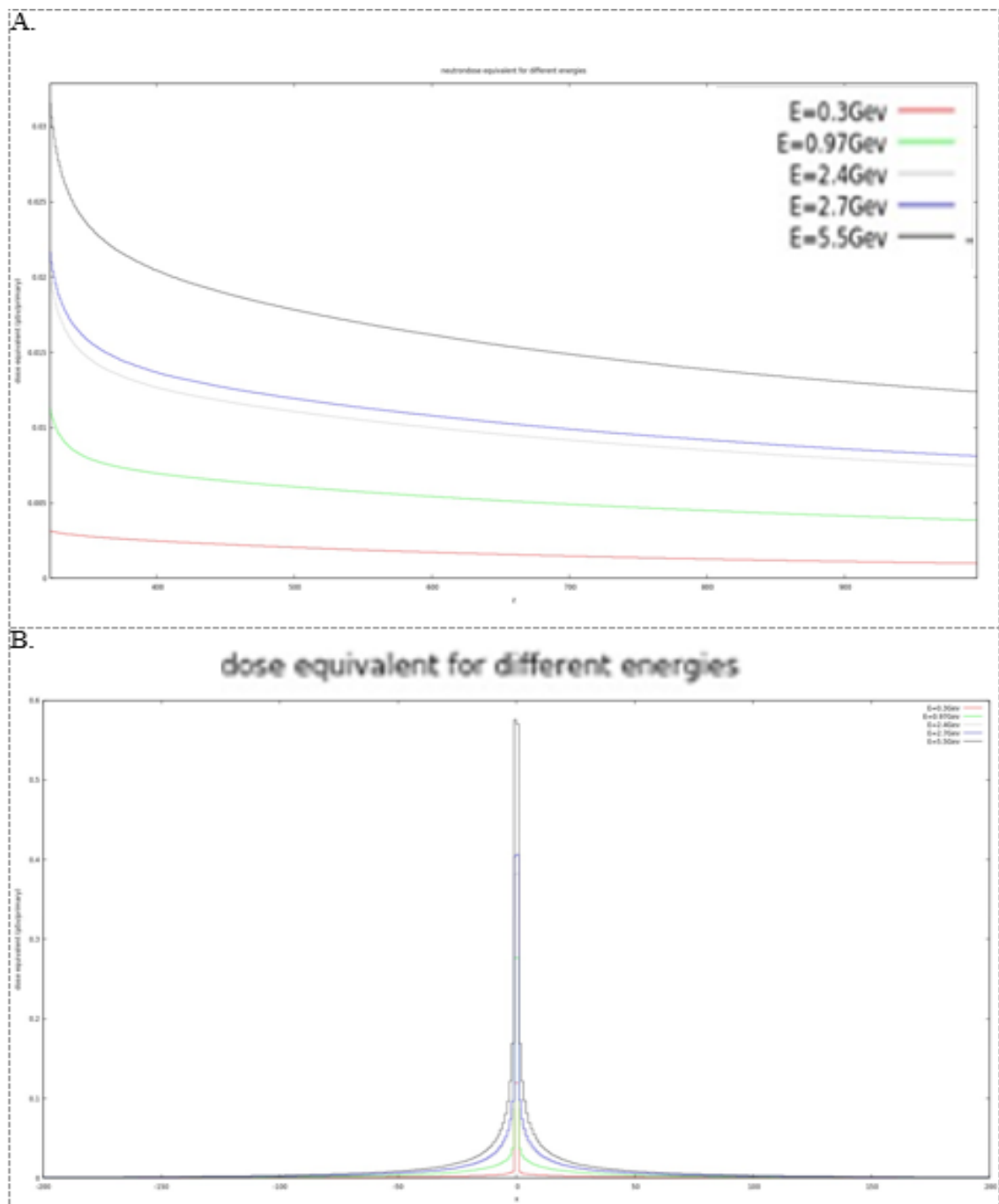
### 7.3 Σύγκριση για τις διάφορες ενέργειες δέσμης στην κύρια επιταχυντική μονάδα

Πλέον, μεταφερόμαστε σε υψηλότερες ενέργειες δέσμης ηλεκτρονίων, αυτές που παράγονται στην κύρια επιταχυντική διάταξη. Κάνουμε προσομοιώσεις για την ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας ηλεκτρονίων, φωτονίων και νετρονίων εντός του χώρου για καθεμιά από αυτές τις ενέργειες και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα σε κοινό γράφημα. Το ίδιο και για τη ροή σωματιδίων εντός του απορροφητή για τις διάφορες ενέργειες, αλλά με σταθερό υλικό το αλουμίνιο. **Οι ενέργειες προσομοίωσης είναι :0.3, 0.97, 2.4, 2.7, 5.5 GeV.**

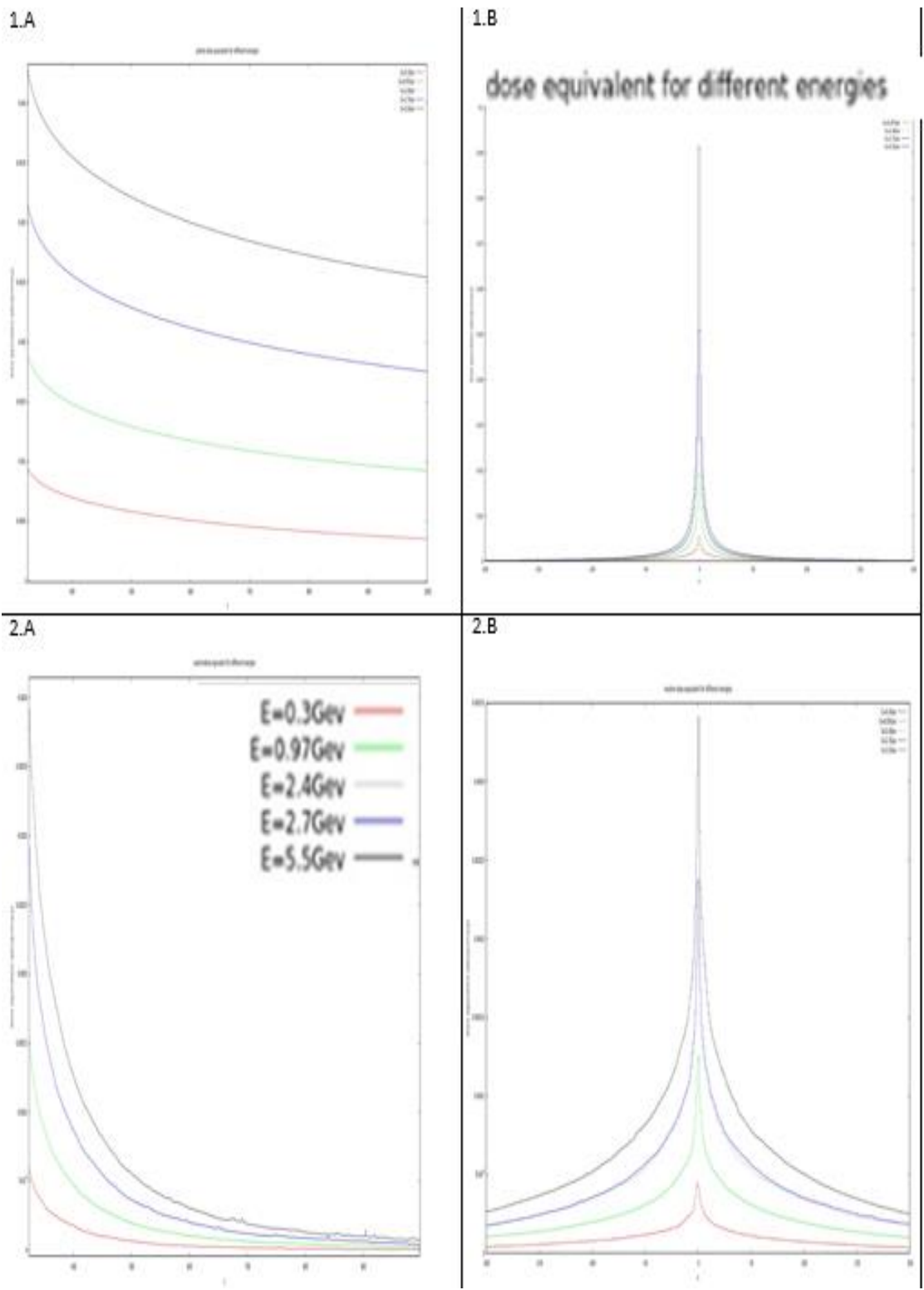
Ακολουθούν κοινά γραφήματα για τις πέντε αυτές ενέργειες, στα οποία παρίστανται οι προβολές της ισοδύναμης δόσης ακτινοβολίας στον άξονα διάδοσης της δέσμης  $z$  και στον κάθετο  $x$ . Είναι φανερό από τις εικόνες 31 και 32 ότι όσο μεγαλύτερη η ενέργεια της δέσμης, τόσο μεγαλύτερη η ισοδύναμη δόση όλων των σωματιδίων που εναποτίθεται στον χώρο, κάτι που είναι εύλογο. Το ίδιο ισχύει και με την ροή σωματιδίων εντός του απορροφητή, δηλαδή αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 30.



Εικόνα 30: Συνολική ροή σωματιδίων εντός του απορροφητή για τις διάφορες ενέργειες δέσμης



Εικόνα 31: προβολή της ισοδύναμης δόσης ηλεκτρονίων στον χώρο: Α κατά τον άξονα διάδοσης z κατά τον κάθετο άξονα x



Εικόνα 32: προβολή της ισοδύναμης δόσης στον χώρο: 1.φωτονίων, 2.νετρονίων

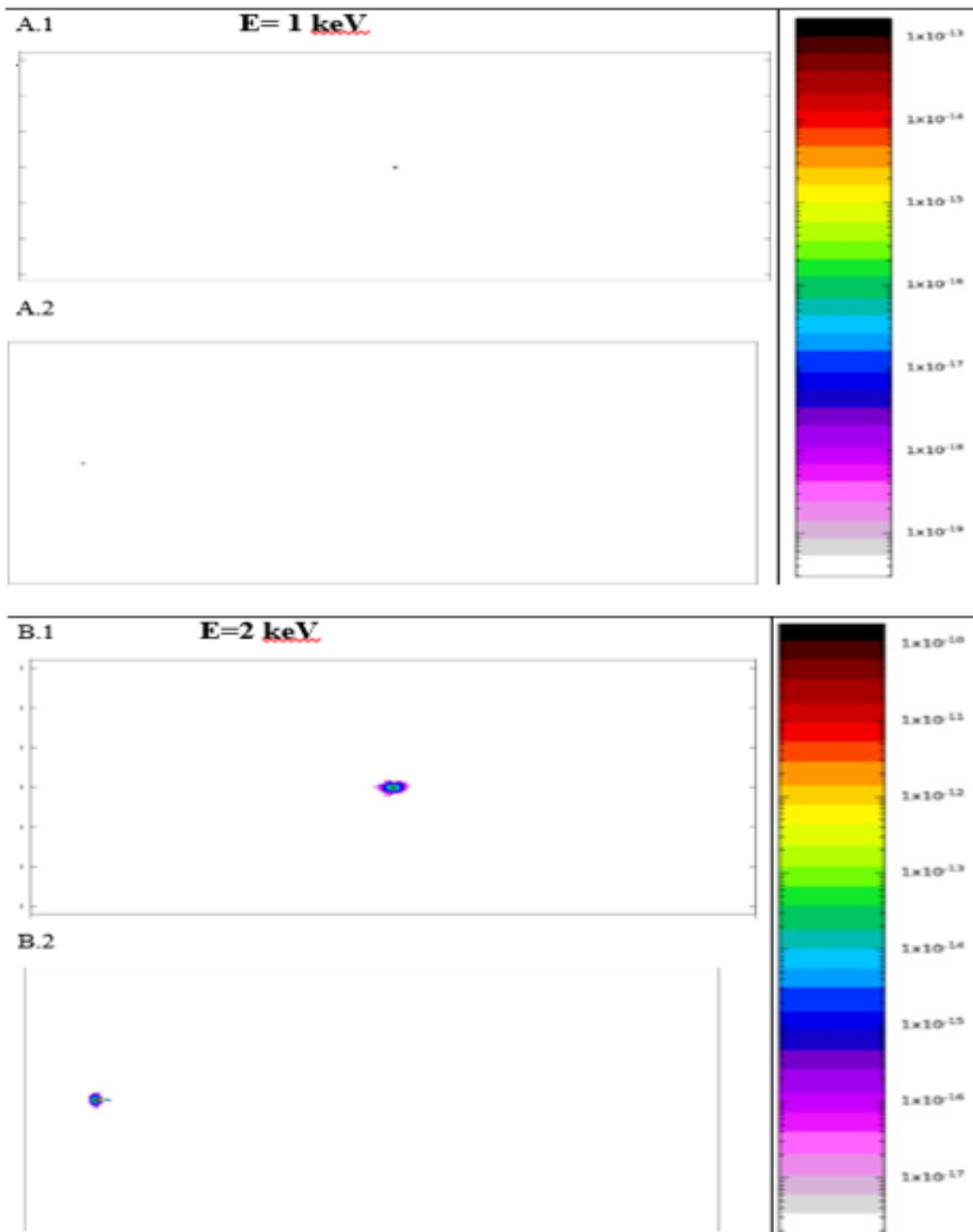
#### 7.4 Σύγκριση για τις ακτίνες X στο χώρο πειραμάτων

Τέλος, θεωρούμε ότι βρισκόμαστε στο χώρο πειραμάτων και μελετάμε την ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας φωτονίων που παράγεται για τις διάφορες δυνατές ενέργειες που μπορεί να έχει η τελική δέσμη ακτίνων X. Δεδομένου ότι το FLUKA υποστηρίζει την προσομοίωση διάδοσης φωτονίων ενέργειας από 1keV και πάνω, αυτή είναι κατώτερη ενέργεια για την οποία μπορεί να διεξαχθεί προσομοίωση, οπότε δεν μπορεί να μελετηθεί η περίπτωση της που η SXR έχει ενέργεια 250eV.

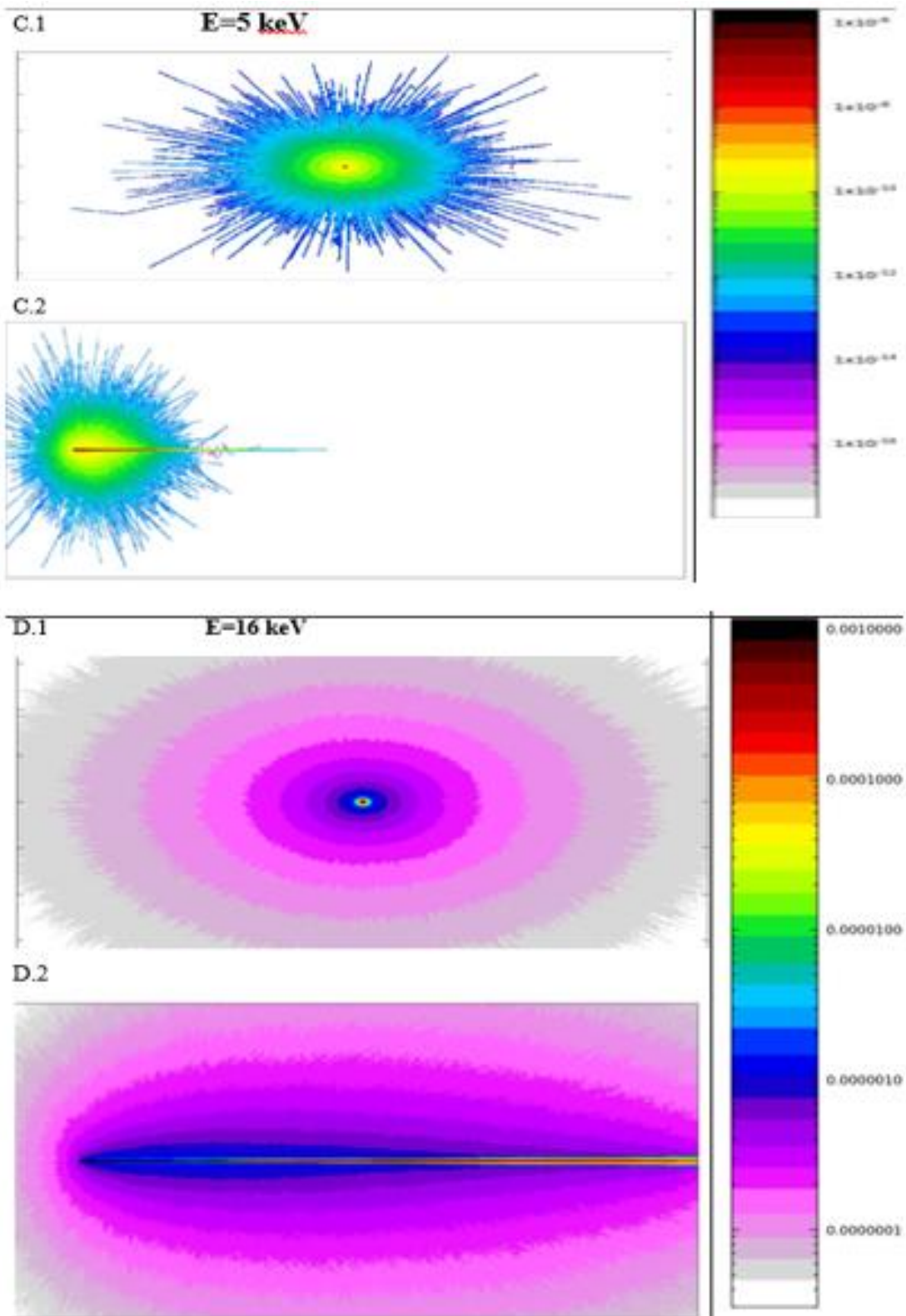
Επιλέγονται οι ενέργειες για SXR 1keV και 2keV ενώ για HXR 5keV και 16keV.

Όπως φαίνεται παρακάτω, στην περίπτωση των SXR, οι δέσμες δεν προκαλούν μεγάλη ισοδύναμη δόση στο χώρο. Λόγω της χαμηλής ενέργειάς τους, την χάνουν όλη και σταματάν αρκετά σύντομα μετά την παραγωγή τους. Αντίθετα, στην περίπτωση των 5keV, αν και η ισοδύναμη δόση παραμένει μικρή, υπάρχει εναπόθεση δόσης σε αρκετά μεγαλύτερο μέρος του χώρου και η διαφορά είναι αισθητή.

Τέλος, στα 16keV, η ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας είναι αισθητά αυξημένη, καθώς η δέσμη διαδίδεται σε όλο το χώρο και αλληλοεπιδρά με τα μόρια του αέρα.



Εικόνα 33:Ισοδύναμη δόση φωτονίων στην περίπτωση SXR δέσμης



Εικόνα 34:Ισοδύναμη δόση φωτονίων στην περίπτωση HXR δέσμης

## 8. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο 6 έγινε ποιοτική επαλήθευση των αποτελεσμάτων του FLUKA από έρευνα πάνω σε επιταχυντή ηλεκτρονίων. Ο συγκεκριμένος επιταχυντής προοριζόταν για ιατρική χρήση, οπότε και οι ενέργεια δέσμης ήταν της τάξης των 10 MeV. Κατόπιν, στο κεφάλαιο 7, έγιναν προσομοιώσεις ισοδύναμης δόσης ακτινοβολίας για δέσμη ηλεκτρονίων όπως αυτή στο FEL του CompactLight, δηλαδή πολύ υψηλότερης ενέργειας καθώς και για τις ακτίνες X που παράγονται τελικά σε αυτό. Ακολουθούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω μελέτη.

Στο χώρο του εισαγωγέα δέσμης, η ισοδύναμη δόση ηλεκτρονίων είναι πολύ μεγάλη και αυξάνεται κατά τον άξονα διάδοσης της δέσμης ενώ μειώνεται κατά το κάθετο σε αυτήν επίπεδο. Το ίδιο ισχύει για την ισοδύναμη δόση φωτονίων η οποία όμως είναι 5 τάξεις μεγέθους μικρότερη. Η ισοδύναμη δόση νετρονίων είναι σχεδόν αμελητέα.

Τοποθετώντας απορροφητή ηλεκτρονίων στην έξοδο του σωλήνα κενού μειώνεται η ισοδύναμη δόση ηλεκτρονίων, ενώ αυξάνεται κατά τάξεις μεγέθους για τα άλλα δύο σωματίδια.

Εάν μας ενδιαφέρει η ελάχιστη δυνατή ισοδύναμη δόση νετρονίων, το πιο κατάλληλο από τα τρία υλικά ως απορροφητή ηλεκτρονίων είναι το αλουμίνιο. Αντίθετα την ελάχιστη ισοδύναμη δόση φωτονίων και ηλεκτρονίων λαμβάνουμε για τον απορροφητή από χαλκό, ενώ ελαφρώς μεγαλύτερη για ανοξείδωτο χάλυβα.

Στον κυρίως επιταχυντή, όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια της δέσμης, τόσο μεγαλύτερη και η ισοδύναμη δόση όλων των τύπων σωματιδίων.

Στο χώρο πειραμάτων, στην περίπτωση των SXR, η ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας είναι πού μικρή αλλά και χωρικά περιορισμένη, λόγω της μικρής ενέργειας της δέσμης. Αντίθετα οι HXR δίνουν αισθητά μεγαλύτερη ισοδύναμη δόση και έτσι είναι απαραίτητο να ληφθούν κατάλληλα μέτρα ακτινοπροστασίας.

Σαφώς υπάρχει περιθώριο για εκτενέστερη μελέτη ώστε να διασφαλιστεί η ακτινοπροστασία των ατόμων που δουλεύουν στον χώρο πειραμάτων, δηλαδή οι μελετούμενες ποσότητες να προσδιοριστούν ποσοτικά με μεγαλύτερη ακρίβεια και να συγκριθούν με αυτές που ορίζονται από τον ICRP.

## 9. Βιβλιογραφία

- [1] Livingston, Milton Stanley., and John Paul. Blewett. Particle Accelerators. McGraw-Hill, 1962
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Free-electron\\_laser](https://en.wikipedia.org/wiki/Free-electron_laser)
- [3] <https://www-ssrl.slac.stanford.edu/stohr/xfels.pdf>
- [4] [CompactLight Project / HomePage](#)
- [5] [CompactLight Project / Objectives](#)
- [6] [CompactLight Project / Accelerator](#)
- [7] [CompactLight Project / ConceptsAndApproach](#)
- [8] M. Kotlarchyk. Scattering theory. In John C. Lindon, editor, Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry, pages 2074 – 2084. Elsevier, Oxford, 1999
- [9] Γαζής Ε. Ν., "Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες – Εφαρμογές στη Βιολογία & Ιατρική"
- [10] M.J. Berger, J.S. Coursey, M.A. Zucker, and J. Chang. ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer programs for calculating stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions (version 2.0.1). 1993.
- [11] 1990 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 60, 21(1), 1991
- [12] <https://en.wikipedia.org/wiki/Dosimetry>
- [13] M.E.J. Newman and G.T. Barkema. Monte Carlo Methods in Statistical Physics. Oxford University Press, Oxford, 2002.
- [14] A. Ferrari, P. Sala, A. Fasso, and J Ranft. FLUKA: a multi-particle transport code. CERN Yellow Reports: Monographs. 2005.
- [15] Vasilis Vlachoudis. Flair: A powerful but user friendly graphical interface for fluka. 04 2009.
- [16] Monte carlo sampling. 16th FLUKA Course - Brazilian Synchrotron Light Laboratory, 2015.
- [17] Biasing. 20th FLUKA Course - Stellenbosch University, 2018.
- [18] Estimators and scoring. 20th FLUKA Course - Stellenbosch University, 2018
- [19] A.Wysocka-Rabin, P.Adrich and A.Wasilewski, Radiation protection studies for a new mobile electron accelerator for intra operative radiation therapy (IORT), National Centre for Nuclear Research, 05-400 Otwock-Swierk, Poland
- [20] A.Wysocka-Rabin, P.Adrich and A.Wasilewski, Monte Carlo study of a new mobile electron accelerator head for Intra Operative Radiation Therapy (IORT), Progress in Nuclear Science and Technology 2 (2011)





# Παράρτημα Α

Εντολές στο FLUKA για τις προσομοιώσεις στον φορητό επιταχυντή ηλεκτρονίων

```

DEFAULTS : PRECISIO ▼
Define the beam characteristics
BEAM Beam: Energy ▼ E: 0.012 Part: ELECTRON ▼
  Δp: Flat ▼ Δp: Δφ: Gauss ▼ Δφ (FWHM): 4.0
  Shape(X): Gauss ▼ x(FWHM): 0.36 Shape(Y): Gauss ▼ y(FWHM): 0.36
Define the beam position
BEAMPOS x: y: z: -90
  cosx: cosy: Type: POSITIVE ▼
  Paren:
GEOBEGIN Accuracy: Option: ▼ Fmt: COMBNAME ▼
  Geometry: ▼ Out: ▼
  Title:
  Black body
  ● SPH blkbody x: 0.0 y: 0.0 z: 0.0
    R: 10000.0
  📦 RPP outer_sp Xmin: -175 Xmax: 610
    Ymin: -295 Ymax: 295
    Zmin: -215 Zmax: 265
  📦 RPP rin Xmin: -130 Xmax: 570
    Ymin: -250 Ymax: 250
    Zmin: -150 Zmax: 200
  📦 RPP rout Xmin: -140 Xmax: 580
    Ymin: -260 Ymax: 260
    Zmin: -180 Zmax: 230
  📦 RPP w1 Xmin: 370 Xmax: 380
    Ymin: -250 Ymax: -50
    Zmin: -150 Zmax: 0
  📦 RPP w2 Xmin: 370 Xmax: 380
    Ymin: 50 Ymax: 250
    Zmin: -150 Zmax: 0
  📦 RPP beamstop Xmin: -20 Xmax: 20
    Ymin: -20 Ymax: 20
    Zmin: 160 Zmax: 175
  🍌 RCC in_ap x: 0 y: 0 z: 30
    Hx: Hy: Hz: 30
    R: 6
  🍌 RCC out_ap x: y: z: 30
    Hx: Hy: Hz: 30
    R: 7
  🍌 RCC in_acc x: y: z: -90
    Hx: Hy: Hz: 105
    R: 2
  🍌 RCC out_acc x: y: z: -91
    Hx: Hy: Hz: 106
    R: 3

```

Εικόνα Α.1: ορισμός ενέργειας, σχήματος και θέσης δέσμης ηλεκτρονίων. Ορισμός περιοχών μαύρης τρύπας, χώρου ακτινοβολήσης, απορροφητή ηλεκτρονίων, applicator και σωλήνα κενού.

```

RPP water      Xmin: -20      Xmax: 20
                Ymin: -20      Ymax: 20
                Zmin: 60       Zmax: 80
RPP shield     Xmin: 100     Xmax: 105
                Ymin: -70     Ymax: 70
                Zmin: -20     Zmax: 130
END
Black hole
REGION BLKBODY      Neigh: 5
  expr: +blkbody-outer_sp
Void around
REGION outersS      Neigh: 5
  expr: +outer_sp -rout
REGION wall         Neigh: 5
  expr: +rout -rin |w1|w2
REGION room         Neigh: 5
  expr: +rin-w1 -w2 -beamstop-in_ap -out_ap-in_acc -out_acc-water
REGION bstop        Neigh:
  expr: +beamstop
REGION shieldin     Neigh: 5
  expr: +shield
REGION phantom      Neigh: 5
  expr: +water
REGION accel        Neigh: 5
  expr: +out_acc -in_acc
REGION accel1       Neigh: 5
  expr: +in_acc
REGION aplic        Neigh: 5
  expr: +out_ap -in_ap
REGION aplic1       Neigh: 5
  expr: +in_ap
END
GEOEND
MATERIAL POTASSIU      #:          ρ: 0.862
  Z: 19                Am:          A:          dE/dx: ▼
Concrete portland
Concrete has a wide variation in density and composition.
MATERIAL PORTLAND     #:          ρ: 2.3
  Z:                   Am:          A:          dE/dx: ▼
COMPOUND PORTLAND ▼   Mix: Mass ▼   Elements: 7..9 ▼
  f1: 0.01             M1: HYDROGEN ▼   f2: 0.001       M2: CARBON ▼
  f3: 0.529107        M3: OXYGEN ▼    f4: 0.016       M4: SODIUM ▼
  f5: 0.002           M5: MAGNESIU ▼  f6: 0.033872    M6: ALUMINUM ▼
  f7: 0.337021        M7: SILICON ▼   f8: 0.013       M8: POTASSIU ▼
  f9: 0.044           M9: CALCIUM ▼   f10: 0.014      M10: IRON ▼

```

















Εικόνα Α.2: Ορισμός γεωμετρίας μαύρης τρύπας, χώρου ακτινοβόλησης, απορροφητή, προστατευτικού πετάματος, ομοιώματος από νερό, σωλήνα κενού και applicator. Εισαγωγή του υλικού μπετόν.

	1	2	3	4	5	6	7
<b>ASSIGNMA</b>	Mat: BLCKHOLE ▼	Reg: BLKBODY ▼	to Reg: ▼				
	Mat(Decay): ▼	Step: ▼	Field: ▼				
<b>ASSIGNMA</b>	Mat: AIR ▼	Reg: outerS ▼	to Reg: ▼				
	Mat(Decay): ▼	Step: ▼	Field: ▼				
<b>ASSIGNMA</b>	Mat: VACUUM ▼	Reg: accel1 ▼	to Reg: ▼				
	Mat(Decay): ▼	Step: ▼	Field: ▼				
<b>ASSIGNMA</b>	Mat: COPPER ▼	Reg: accel ▼	to Reg: ▼				
	Mat(Decay): ▼	Step: ▼	Field: ▼				
<b>ASSIGNMA</b>	Mat: AIR ▼	Reg: room ▼	to Reg: ▼				
	Mat(Decay): ▼	Step: ▼	Field: ▼				
<b>ASSIGNMA</b>	Mat: WATER ▼	Reg: phantom ▼	to Reg: ▼				
	Mat(Decay): ▼	Step: ▼	Field: ▼				
<b>ASSIGNMA</b>	Mat: AIR ▼	Reg: aplic1 ▼	to Reg: ▼				
	Mat(Decay): ▼	Step: ▼	Field: ▼				
<b>ASSIGNMA</b>	Mat: PMMA ▼	Reg: aplic ▼	to Reg: ▼				
	Mat(Decay): ▼	Step: ▼	Field: ▼				
<b>ASSIGNMA</b>	Mat: LEAD ▼	Reg: shieldin ▼	to Reg: ▼				
	Mat(Decay): ▼	Step: ▼	Field: ▼				
<b>ASSIGNMA</b>	Mat: LEAD ▼	Reg: bstop ▼	to Reg: ▼				
	Mat(Decay): ▼	Step: ▼	Field: ▼				
<b>ASSIGNMA</b>	Mat: PORTLAND ▼	Reg: wall ▼	to Reg: ▼				
	Mat(Decay): ▼	Step: ▼	Field: ▼				
<b>EMFCUT</b>	Type: transport ▼						
	e-e+ Threshold: Kinetic ▼	e-e+ Ekin: 0.0007	γ: 10E-6				
	Reg: room ▼	to Reg: ▼	Step: ▼				
<b>EMFCUT</b>	Type: transport ▼						
	e-e+ Threshold: Kinetic ▼	e-e+ Ekin: 0.0007	γ: 10E-6				
	Reg: bstop ▼	to Reg: ▼	Step: ▼				
<b>EMFCUT</b>	Type: transport ▼						
	e-e+ Threshold: Kinetic ▼	e-e+ Ekin: 0.0007	γ: 10E-6				
	Reg: wall ▼	to Reg: ▼	Step: ▼				
<b>EMFCUT</b>	Type: transport ▼						
	e-e+ Threshold: Kinetic ▼	e-e+ Ekin: 0.0007	γ: 10E-6				
	Reg: phantom ▼	to Reg: ▼	Step: ▼				
<b>EMFCUT</b>	Type: transport ▼						
	e-e+ Threshold: Kinetic ▼	e-e+ Ekin: 0.0007	γ: 10E-6				
	Reg: aplic ▼	to Reg: ▼	Step: ▼				
<b>EMFCUT</b>	Type: transport ▼						
	e-e+ Threshold: Kinetic ▼	e-e+ Ekin: 0.0007	γ: 10E-6				
	Reg: aplic1 ▼	to Reg: ▼	Step: ▼				

Εικόνα Α.3: ορισμός υλικού κάθε περιοχής ρύθμιση του ενεργειακού κατωφλίου διάδοσης για τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια σε κάθε περιοχή.

 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼ Part: DOSE-EQ ▼	Xmin: -175 Ymin: -295 Zmin: -215	Unit: 21 BIN ▼ Xmax: 605 Ymax: 295 Zmax: 265	Name: dose_eq NX: 780 NY: 590 NZ: 480
 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼ Part: DOSE-EQ ▼	Xmin: -175 Ymin: -295 Zmin: -215	Unit: 22 BIN ▼ Xmax: 605 Ymax: 295 Zmax: 265	Name: dose_net NX: 780 NY: 590 NZ: 480
 <b>AUXSCORE</b>	Delta Ray: ▼	Type: USRBIN ▼ Det: dose_net ▼	Part: NEUTRON ▼ to Det: ▼	Set: AMB74 ▼ Step:
 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼ Part: DOSE-EQ ▼	Xmin: 405 Ymin: -155 Zmin: -55	Unit: 23 BIN ▼ Xmax: 415 Ymax: -145 Zmax: -45	Name: y NX: 11 NY: 11 NZ: 11
 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼ Part: DOSE-EQ ▼	Xmin: 385 Ymin: -155 Zmin: -55	Unit: 24 BIN ▼ Xmax: 395 Ymax: -145 Zmax: -45	Name: ynet NX: 11 NY: 11 NZ: 11
 <b>AUXSCORE</b>	Delta Ray: ▼	Type: USRBIN ▼ Det: ynet ▼	Part: NEUTRON ▼ to Det: ▼	Set: AMB74 ▼ Step:
 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼ Part: DOSE-EQ ▼	Xmin: 405 Ymin: -5 Zmin: 95	Unit: 25 BIN ▼ Xmax: 415 Ymax: 5 Zmax: 105	Name: z2 NX: 11 NY: 11 NZ: 11
 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼ Part: DOSE-EQ ▼	Xmin: 405 Ymin: -5 Zmin: 95	Unit: 26 BIN ▼ Xmax: 415 Ymax: 5 Zmax: 105	Name: z2net NX: 11 NY: 11 NZ: 11
 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼ Part: DOSE-EQ ▼	Xmin: -175 Ymin: -5 Zmin: 95	Unit: 34 BIN ▼ Xmax: -165 Ymax: 5 Zmax: 105	Name: z1 NX: 11 NY: 11 NZ: 11
 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼ Part: DOSE-EQ ▼	Xmin: -5 Ymin: 285 Zmin: 95	Unit: 42 BIN ▼ Xmax: 5 Ymax: 295 Zmax: 105	Name: x4 NX: 11 NY: 11 NZ: 11
 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼ Part: DOSE-EQ ▼	Xmin: 405 Ymin: -155 Zmin: 95	Unit: 27 BIN ▼ Xmax: 415 Ymax: -145 Zmax: 105	Name: y2a NX: 11 NY: 11 NZ: 11
 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼ Part: DOSE-EQ ▼	Xmin: 405 Ymin: -155 Zmin: 95	Unit: 38 BIN ▼ Xmax: 415 Ymax: -145 Zmax: 105	Name: y2an NX: 11 NY: 11 NZ: 11

Εικόνα Α.4: ορισμός ανιχνευτών συνολικής ισοδύναμης δόσης και ισοδύναμης δόσης νετρονίων σε όλο το χώρο και σε επιλεγμένα σημεία.

	<b>USRBIN</b>	Unit: 49 BIN ▼	Name: A2n
	Type: X-Y-Z ▼	Xmin: -5	Xmax: 5
	Part: DOSE-EQ ▼	Ymin: -5	Ymax: 5
		Zmin: 180	Zmax: 190
			NX: 11
			NY: 11
			NZ: 11
	<b>USRBIN</b>	Unit: 45 BIN ▼	Name: A1
	Type: X-Y-Z ▼	Xmin: -5	Xmax: 5
	Part: DOSE-EQ ▼	Ymin: -5	Ymax: 5
		Zmin: 255	Zmax: 265
			NX: 11
			NY: 11
			NZ: 11
	<b>USRBIN</b>	Unit: 46 BIN ▼	Name: A1n
	Type: X-Y-Z ▼	Xmin: -5	Xmax: 5
	Part: DOSE-EQ ▼	Ymin: -5	Ymax: 5
		Zmin: 255	Zmax: 265
			NX: 11
			NY: 11
			NZ: 11
	<b>AUXSCORE</b>	Type: USRBIN ▼	Part: NEUTRON ▼
	Delta Ray: ▼	Det: A1n ▼	Set: AMB74 ▼
		to Det: ▼	Step:
	<b>AUXSCORE</b>	Type: USRBIN ▼	Part: NEUTRON ▼
	Delta Ray: ▼	Det: A2n ▼	Set: AMB74 ▼
		to Det: ▼	Step:
	<b>AUXSCORE</b>	Type: USRBIN ▼	Part: NEUTRON ▼
	Delta Ray: ▼	Det: z2net ▼	Set: AMB74 ▼
		to Det: ▼	Step:
	<b>AUXSCORE</b>	Type: USRBIN ▼	Part: NEUTRON ▼
	Delta Ray: ▼	Det: y2an ▼	Set: AMB74 ▼
		to Det: ▼	Step:
	<b>PHOTONUC</b>	Type: ELECTNUC ▼	All E: On ▼
	E>0.7GeV: off ▼	Δ resonance: off ▼	Quasi D: off ▼
		Mat: LEAD ▼	Giant Dipole: off ▼
		to Mat: ▼	Step:
	<b>PHOTONUC</b>	Type: ELECTNUC ▼	All E: On ▼
	E>0.7GeV: off ▼	Δ resonance: off ▼	Quasi D: off ▼
		Mat: PORTLAND ▼	Giant Dipole: off ▼
		to Mat: ▼	Step:
	<b>PHOTONUC</b>	Type: ELECTNUC ▼	All E: On ▼
	E>0.7GeV: off ▼	Δ resonance: off ▼	Quasi D: off ▼
		Mat: WATER ▼	Giant Dipole: off ▼
		to Mat: ▼	Step:
	<b>PHOTONUC</b>	Type: ELECTNUC ▼	All E: On ▼
	E>0.7GeV: off ▼	Δ resonance: off ▼	Quasi D: off ▼
		Mat: PMMA ▼	Giant Dipole: off ▼
		to Mat: ▼	Step:
	<b>PHOTONUC</b>	Type: ELECTNUC ▼	All E: On ▼
	E>0.7GeV: off ▼	Δ resonance: off ▼	Quasi D: off ▼
		Mat: COPPER ▼	Giant Dipole: off ▼
		to Mat: ▼	Step:
	<b>PHOTONUC</b>	Type: ELECTNUC ▼	All E: On ▼
	E>0.7GeV: off ▼	Δ resonance: off ▼	Quasi D: off ▼
		Mat: AIR ▼	Giant Dipole: off ▼
		to Mat: ▼	Step:
	Set the random number seed		
	<b>RANDOMIZ</b>	Unit: 01 ▼	Seed:
	Set the number of primary histories to be simulated in the run		
	<b>START</b>	No.: 100000000	Core: ▼
		Time:	Report: default ▼
	<b>STOP</b>		

Εικόνα Α.5: ορισμός ανιχνευτών συνολικής ισοδύναμης δόσης και ισοδύναμης δόσης νετρονίων σε επιλεγμένα σημεία .Ενεργοποίηση φωτοπυρηνικού φαινομένου σε όλες τις περιοχές. Ορισμός αριθμού πρωτογενών σωματιδίων της δέσμης.

## Παράρτημα Β

### Εντολές στο FLUKA για τις προσομοιώσεις στον FEL

```
# #define injector      :
# #define low_s        :
# #define high_s       :
# #define low_h        :
# #define high_h       :
Set the defaults for precision simulations
DEFAULTS                : PRECISIO ▼
#if injector ▼
  * BEAM                Beam: Energy ▼      E: 0.3          Part: ELECTRON ▼
    Δp: Gauss ▼ Δp(FWHM): 0.0015          Δφ: Flat ▼      Δφ: 0.0
    Shape(X): Gauss ▼ x(FWHM): 0.06       Shape(Y): Gauss ▼ y(FWHM): 0.06
  * BEAMPOS             x:                  y:              z: 100
                        cosx:               cosy:          Type: POSITIVE ▼
#elif high_h ▼
  * BEAM                Beam: Energy ▼      E: 5.5          Part: ELECTRON ▼
    Δp: Gauss ▼ Δp(FWHM): 0.0275          Δφ: Flat ▼      Δφ:
    Shape(X): Gauss ▼ x(FWHM): 0.3        Shape(Y): Gauss ▼ y(FWHM): 0.3
  * BEAMPOS             x:                  y:              z: 100
                        cosx:               cosy:          Type: POSITIVE ▼
#elif low_h ▼
  * BEAM                Beam: Energy ▼      E: 2.75         Part: ELECTRON ▼
    Δp: Gauss ▼ Δp(FWHM): 0.01375         Δφ: Flat ▼      Δφ:
    Shape(X): Gauss ▼ x(FWHM): 0.3        Shape(Y): Gauss ▼ y(FWHM): 0.3
  * BEAMPOS             x:                  y:              z: 100
                        cosx:               cosy:          Type: POSITIVE ▼
#elif high_s ▼
  * BEAM                Beam: Energy ▼      E: 2.4          Part: ELECTRON ▼
    Δp: Gauss ▼ Δp(FWHM): 0.012           Δφ: Flat ▼      Δφ:
    Shape(X): Gauss ▼ x(FWHM): 0.3        Shape(Y): Gauss ▼ y(FWHM): 0.3
  * BEAMPOS             x:                  y:              z: 100
                        cosx:               cosy:          Type: POSITIVE ▼
#else
  * BEAM                Beam: Energy ▼      E: 0.97         Part: ELECTRON ▼
    Δp: Gauss ▼ Δp(FWHM): 0.00485         Δφ: Flat ▼      Δφ:
    Shape(X): Gauss ▼ x(FWHM): 0.3        Shape(Y): Gauss ▼ y(FWHM): 0.3
  * BEAMPOS             x:                  y:              z: 100
                        cosx:               cosy:          Type: POSITIVE ▼
#endif
```

Εικόνα Β.1: ορισμός ενέργειας, σχήματος και θέσης δέσμης ηλεκτρονίων για τις πέντε διαφορετικές ενέργειες δέσμης που εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις.

```

GEOBEGIN      Accuracy:      Option: ▼      Paren:
                Geometry: ▼      Out: ▼        Fmt: COMBNAME ▼

  Title:
  Black body
  ● SPH blkbody      x: 0.0          y: 0.0          z: 0.0
                    R: 100000.0

  📦 RPP room_in      Xmin: -200      Xmax: 200
                    Ymin: -160      Ymax: 160
                    Zmin: 0         Zmax: 1000

  📡 ZCC tube_in      x:              y:              R: 0.6
  📡 ZCC tube_out      x:              y:              R: 1
  📏 XYP z_low1       z: 99
  📏 XYP z_high1      z: 100
  📏 XYP z_low2       z: 101.7
  📏 XYP z_high2      z: 104.7

◆ END
  Black hole
  🌑 REGION BLKBODY      Neigh: 5
  expr: +blkbody-room_in
  Target
  🌑 REGION room        Neigh:
  expr: (+room_in -tube_out )|+z_low1 |- z_high2
  Target
  🌑 REGION alum        Neigh:
  expr: (+tube_out -z_low1 +z_high2 )-(+tube_in +z_low2 -z_high1 )
  🌑 REGION vac        Neigh:
  expr: +tube_in -z_high1+z_low2








◆ END
↕ GEOEND      : ▼
...+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7...

👤 ASSIGNMA      Mat: BLCKHOLE ▼  Reg: BLKBODY ▼  to Reg: ▼
                    Mat(Decay): ▼      Step:           Field: ▼
👤 ASSIGNMA      Mat: AIR ▼      Reg: room ▼     to Reg: ▼
                    Mat(Decay): ▼      Step:           Field: ▼
👤 ASSIGNMA      Mat: ALUMINUM ▼  Reg: alum ▼     to Reg: ▼
                    Mat(Decay): ▼      Step:           Field: ▼
👤 ASSIGNMA      Mat: VACUUM ▼   Reg: vac ▼      to Reg: ▼
                    Mat(Decay): ▼      Step:           Field: ▼
👤 PHOTONUC     Type: ELECTNUC ▼  All E: On ▼
  E>0.7GeV: off ▼  Δ resonance: off ▼  Quasi D: off ▼  Giant Dipole: off ▼
                    Mat: AIR ▼        to Mat: ▼      Step:
👤 PHOTONUC     Type: ELECTNUC ▼  All E: On ▼
  E>0.7GeV: off ▼  Δ resonance: off ▼  Quasi D: off ▼  Giant Dipole: off ▼
                    Mat: ALUMINUM ▼  to Mat: ▼      Step:








```

Εικόνα Β.2:Ορισμός περιοχών μαύρης τρύπας, χώρου πειράματος και σωλήνα κενού με απορροφητή . ορισμός υλικού κάθε περιοχής ρύθμιση του ενεργειακού κατωφλίου διάδοσης για τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια σε κάθε περιοχή. Το υλικό σωλήνα και απορροφητή άλλαξε τρεις φορές στις προσομοιώσεις.



 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼	Xmin: -200	Xmax: 200	Unit: 24 BIN ▼	Name: dose_el_ou
	Part: DOSE-EQ ▼	Ymin: -160	Ymax: 160		NX: 400
		Zmin: 0	Zmax: 1000		NY: 320
					NZ: 1000
 <b>USRBIN</b>	Type: R-Φ-Z ▼	Rmin: 0	Rmax: 3.6	Unit: 30 BIN ▼	Name: ene_dep
	Part: ENERGY ▼	X:	Y:		NR: 36
		Zmin: 100	Zmax: 300		NΦ:
					NZ: 200
 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼	Xmin: -200	Xmax: 200	Unit: 25 BIN ▼	Name: dose_ph_ou
	Part: DOSE-EQ ▼	Ymin: -160	Ymax: 160		NX: 400
		Zmin: 0	Zmax: 1000		NY: 320
					NZ: 1000
 <b>USRBIN</b>	Type: X-Y-Z ▼	Xmin: -200	Xmax: 200	Unit: 26 BIN ▼	Name: dose_ne_ou
	Part: DOSE-EQ ▼	Ymin: -160	Ymax: 160		NX: 400
		Zmin: 0	Zmax: 1000		NY: 320
					NZ: 1000
 <b>AUXSCORE</b>	Delta Ray: ▼	Type: USRBIN ▼	Part: PHOTON ▼	Set: AMB74 ▼	Step:
		Det: dose_ph_ou ▼	to Det: ▼		
 <b>AUXSCORE</b>	Delta Ray: ▼	Type: USRBIN ▼	Part: ELECTRON ▼	Set: AMB74 ▼	Step:
		Det: dose_el_ou ▼	to Det: ▼		
 <b>AUXSCORE</b>	Delta Ray: ▼	Type: USRBIN ▼	Part: NEUTRON ▼	Set: AMB74 ▼	Step:
		Det: dose_ne_ou ▼	to Det: ▼		

Εικόνα Β.3: ορισμός ανιχνευτών ισοδύναμης δόσης φωτονίων, ηλεκτρονίων και νετρονίων σε όλο το χώρο.

 <b>USRBIN</b>	Unit: 21 BIN ▼	Name: ph_fl
Type: R-Φ-Z ▼	Rmin: 0	NR: 6
Part: PHOTON ▼	X:	NΦ:
Zmin: 300	Y:	NZ: 20
	Zmax: 320	
 <b>USRBIN</b>	Unit: 21 BIN ▼	Name: net_fl
Type: R-Φ-Z ▼	Rmin: 0	NR: 6
Part: NEUTRON ▼	X:	NΦ:
Zmin: 300	Y:	NZ: 20
	Zmax: 320	
 <b>USRBIN</b>	Unit: 21 BIN ▼	Name: el_fl
Type: R-Φ-Z ▼	Rmin: 0	NR: 6
Part: ELECTRON ▼	X:	NΦ:
Zmin: 300	Y:	NZ: 20
	Zmax: 320	
 <b>USRBIN</b>	Unit: 21 BIN ▼	Name: tot_fl
Type: R-Φ-Z ▼	Rmin: 0	NR: 6
Part: ALL-PART ▼	X:	NΦ:
Zmin: 300	Y:	NZ: 20
	Zmax: 320	
Set the random number seed		
 <b>RANDOMIZ</b>	Unit: 01 ▼	Seed:
Set the number of primary histories to be simulated in the run		
 <b>START</b>	No.: 10000000	Core: ▼
	Time:	Report: default ▼
 <b>STOP</b>		

Εικόνα Β.4: ορισμός ανιχνευτών ροής σωματιδίων εντός του απορροφητή. Ορισμός αριθμού πρωτογενών ηλεκτρονίων.