



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
"ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ ΚΑΙ ΤΗ ΒΙΟΛΟΓΙΑ"**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μελέτη σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε απεικονιστικά  
συστήματα**

**Μαριάννα-Κανέλλα Δ. Ξενάκη**

**Επιβλέπων: Νεκτάριος Καλύβας, Επίκουρος Καθηγητής**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2018**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Μελέτη σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε απεικονιστικά συστήματα

**Μαριάννα Κανέλλα Δ.Ξενάκη**  
**A.M.: ΠΙΒ0165**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ :**

**Νεκτάριος Καλύβας, Επίκουρος Καθηγητής**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Νεκτάριος Καλύβας, Επίκουρος Καθηγητής**  
**Ιωάννης Κανδαράκης, Καθηγητής**  
**Παντελής Ασβεστάς, Επίκουρος Καθηγητής**

Σεπτέμβριος 2018

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανωτέρω εργασία αφορά την μελέτη της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε απεικονιστικά συστήματα που αποτελούνται από ανιχνευτικές διατάξεις ιοντιζουσας ακτινοβολίας. Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία λόγω της αλλαγής θέσης στην απορρόφηση του φωτονίου από την αρχική αλληλεπίδραση, δημιουργεί επιπλέον ασάφεια στην ιατρικής απεικόνιση. Αυτό μέχρι ένα σημείο το επιλύει το αντιδιαχυτικό διάφραγμα (bucky) με επιβάρυνση όμως της δόσης στον εξεταζόμενο. Η γνώση της χωρικής κατανομής της ακτινοβολίας μπορεί μελλοντικά να βοηθήσει στην διόρθωση της ασάφειας με κατάλληλους ψηφιακούς αλγορίθμους. Η ανωτέρω μελέτη μπορεί να βρει εφαρμογή στην μαστογραφία, στην αξονική τομογραφία κωνικής δέσμης (CBCT) και στην απεικόνιση για διόρθωση της τοποθέτησης του ασθενούς κατά τη διάρκεια της ακτινοθεραπείας. Η μελέτη περιλαμβάνει την προσομοίωση της διαδρομής και των αλληλεπιδράσεων της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, μέσω της μεθόδου MONTE CARLO με χρήση του πακέτου λογισμικού PENELOPE. Κατά την προσομοίωση λαμβάνεται υπόψη (ως μεταβλητές), η ενέργεια της ακτινοβολίας, ο ανιχνευτής και το πάχος του εξεταζόμενου. Το πακέτο προσομοίωσης PENELOPE είναι ανοιχτού κώδικα και βασίζεται στη γλώσσα FORTRAN.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Σκέδαση Ακτινοβολίας

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Penelope, σκεδαζόμενη ακτινοβολία, Monte Carlo

## **ABSTRACT**

The above thesis concerns the study of scattered radiation in imaging systems consisting of ionizing radiation detection devices. The scattered radiation due to the change in position in the absorption of the photon from the initial interaction, creates additional ambiguity in medical imaging. This is resolved to a certain extent by the bucky, unfortunately with extra dose to the patient. Knowledge of the spatial distribution of radiation can in the future help to correct ambiguity with appropriate digital algorithms. The above study can be applied to mammography, CBCT and imaging for correction of patient placement during radiotherapy. The study includes the simulation of the ionizing radiation pathway and interactions through the MONTE CARLO method using the PENELOPE software package. The simulation takes into account (as variables) the energy of the radiation, the detector and the thickness of the subject. The PENELOPE simulation package is open source and is based on the FORTRAN language.

**SUBJECT AREA:** Scattering Radiation

**KEYWORDS:** Penelope, scattered radiation, Monte Carlo

*Στους γονείς μου και στον αδερφό μου*

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ,θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Νεκτάριο Καλύβα για την εμπιστοσύνη του, καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση του και τον χρόνο που μου αφιέρωσε καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της μελέτης. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ι. Κανδαράκη και τον κ. Π. Ασβεστά για τη βοήθειά τους.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την στήριξη τους καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>21</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>22</b>
<b>1.1 Δομή ακτινογραφικής διάταξης</b> .....	<b>22</b>
1.1.1 Λειτουργία της Λυχνίας.....	22
1.1.2 Λειτουργία του ανιχνευτή .....	23
1.1.3 Φάσμα ακτίνων Χ .....	25
<b>2. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΥΛΗ</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>26</b>
2.1.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.....	26
2.1.2 Ελαστική σκέδαση .....	27
2.1.3 Φαινόμενο Compton (ανελαστική σκέδαση).....	28
2.1.4 Φαινόμενα παραγωγής ζεύγους και εξαύλωσης.....	29
2.1.5 Αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων με υλικά .....	30
<b>3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΟΝΤΕ ΚΑΡΛΟ</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1 Εισαγωγικές έννοιες Μόντε Κάρλο</b> .....	<b>31</b>
3.1.1 Εφαρμογή της τεχνικής Monte Carlo .....	32
3.1.2 Ιδιότητες τυχαίων αριθμών.....	32
<b>4. PENELOPE</b> .....	<b>34</b>
<b>4.1 Περιγραφή του Penelope</b> .....	<b>34</b>
<b>4.2 Περιγραφή FORTRAN</b> .....	<b>34</b>
<b>4.3 Περιγραφή του περιβάλλοντος εισαγωγής δεδομένων PENELOPE</b> .....	<b>34</b>

4.3.1 Ο κώδικας χρήση Peneasy .....	36
<b>5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....</b>	<b>41</b>
5.1 Σκοπός της μελέτης.....	41
5.1.1 Αποτελέσματα .....	60
5.1.2 Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων .....	174
5.1.3 Παραδείγματα σφαλμάτων.....	175
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>176</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ.....</b>	<b>177</b>
<b>ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....</b>	<b>178</b>
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>179</b>



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Διάταξη Λυχνίας[1] .....	23
Εικόνα 2:Φωτοηλεκτρικού φαινομένου στο οποίο φαίνεται και η εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας –K (Φθορισμού)[2].....	26
Εικόνα 3: Το φωτόνιο σκεδάζεται από το άτομο του υλικού αλλάζοντας τη διεύθυνση του ενώ η τελική του ενέργεια $E_f$ διατηρείται ίση με την αρχική $E_a$ . [3] .....	27
Εικόνα 4: Το φωτόνιο έχοντας αρχική ενέργεια $E_a$ αλληλοεπιδρά με ηλεκτρόνιο της τελευταίας στοιβάδας δίνοντας του μέρος της ενέργειας του. Το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο και ελευθερώνεται. [3].....	29
Εικόνα 5 : Αλληλεπίδραση φωτονίου με τον πυρήνα και η εμφάνιση των σωματιδίων.[2] .	29
Εικόνα 8:Βοηθητικό πρόγραμμα TOTALCMD64 .....	35
Εικόνα 9:Γραμμή εντολών cmd.exe .....	36
Εικόνα 10 : Στην αρχή του προγράμματος περιγράφεται το πλήθος ιστοριών (number of histories), ο χρόνος προσομοίωσης (allotted time), το διάστημα ενημέρωσης, το αρχείο σφάλματος εξόδου (output dump file). Ύστερα περιγράφεται ο τύπος του σωματιδίου , όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι το φωτόνιο και εν συνεχεία φαίνεται η θέση των σωματιδίων. ....	37
Εικόνα 11: Σ' αυτή την εικόνα περιγράφεται το διάνυσμα κατεύθυνσης (direction vector), η γωνία και η ενέργεια που επιθυμεί ο χρήστης για την προσομοίωση. ....	37
Εικόνα 12: Σ' αυτό το σημείο του προγράμματος το reneasy.in "καλεί" το αρχείο εισόδου *.geo , το οποίο περιγράφει την γεωμετρία. ....	38
Εικόνα 13 : Το reneasy.in εισάγει τα υλικά που χρησιμοποιούνται στον σκεδαστή (scatterer) και στον ανιχνευτή (detector)τα οποία έχουν την μορφή *.mat . Στην παρούσα στιγμή ο χρήστης πρέπει να καθορίσει την ενέργεια των υλικών καθώς και παραμέτρους που ορίζονται από το πρόγραμμα όπως το WCC,WCR και το DSMAX. ....	38
Εικόνα 14: Στο τέλος του κώδικα ο χρήστης θέτει την κατανομή της χωρικής κατανομής της δόσης και την διατομή της κυλινδρικής κατανομής της δόσης. ....	39
Εικόνα 15: Σχηματική αναπαράσταση της πηγής ,του ομοιώματος και του ανιχνευτή. ....	41
Εικόνα 16:Δομή αρχείου γεωμετρίας για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	44
Εικόνα 17: Δομή αρχείου γεωμετρίας για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	45
Εικόνα 18: Δομή αρχείου γεωμετρίας για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	45
Εικόνα 19: Δομή αρχείου γεωμετρίας για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	46
Εικόνα 20: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	46
Εικόνα 21: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	47
Εικόνα 22: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	47
Εικόνα 23: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	48
Εικόνα 24: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	48
Εικόνα 25: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	49
Εικόνα 26: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	49
Εικόνα 27: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV. ....	50
Εικόνα 28 :Δομή αρχείου Peneasy.out. ....	50
Εικόνα 29 :Δομή αρχείου Peneasy.out. ....	51
Εικόνα 30:Δομή αρχείου Peneasy.out. ....	52
Εικόνα 31 : Δομή αρχείου Peneasy.out. ....	53
Εικόνα 32: Δομή αρχείου Peneasy.out. ....	54
Εικόνα 33: Δομή αρχείου Peneasy.out. ....	55
Εικόνα 34 : Δομή αρχείου Peneasy.out. ....	56























## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη .....	42
---	----

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα ερευνητική εργασία αφορά την μελέτη της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε απεικονιστικά μηχανήματα. Η μελέτη υλοποιείται μέσω της μεθόδου MONTE CARLO με χρήση του πακέτου λογισμικού PENELOPE. Κατά την προσομοίωση λαμβάνονται υπόψη η ενέργεια της ακτινοβολίας, ο ανιχνευτής και το πάχος του εξεταζόμενου. Το πακέτο προσομοίωσης PENELOPE είναι ανοιχτού κώδικα και βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να υπολογισθεί το εύρος της διασποράς της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας για διαφορετικά πάχη ομοιώματος σε κάθε προσομοίωση και για τρία τυπικά υλικά ανιχνευτών. Η μελέτη ολοκληρώνεται ύστερα από την προσομοίωση τριών διαφορετικών υλικών για τον ανιχνευτή (το άμορφο σελήνιο (a-Se), το οξυσουλφίδιο του γαδολινίου ( $Gd_2O_2S$  ή GOS) και το ιωδιούχο καίσιο (CsI)). Οι ενέργειες των προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν κυμαίνονται από 20keV έως 6MeV. Σε κάθε προσομοίωση υπολογίστηκε η βέλτιστη εξίσωση που περιγράφει την πλάγια διασπορά της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διόρθωση της ασάφειας που προκαλεί η σκεδαζόμενη ακτινοβολία σε ανιχνευτικές διατάξεις χωρίς αντιδιαχυτικό διάφραγμα.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην μελέτη της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε απεικονιστικά συστήματα που αποτελούνται από ανιχνευτικές διατάξεις ιονίζουσας ακτινοβολίας. Η μελέτη υλοποιείται μέσω ενός υπολογιστικού προγράμματος, προσομοιώνοντας διάφορα υλικά ανιχνευτών συγκρίνοντας τα με διαφορετικές ενέργειες, μέσω της μεθόδου MONTE CARLO με χρήση του πακέτου λογισμικού PENELOPE. Παρακάτω αναλύεται η δομή της ακτινογραφικής διάταξης (λυχνία, ανιχνευτής).

### 1.1 Δομή ακτινογραφικής διάταξης

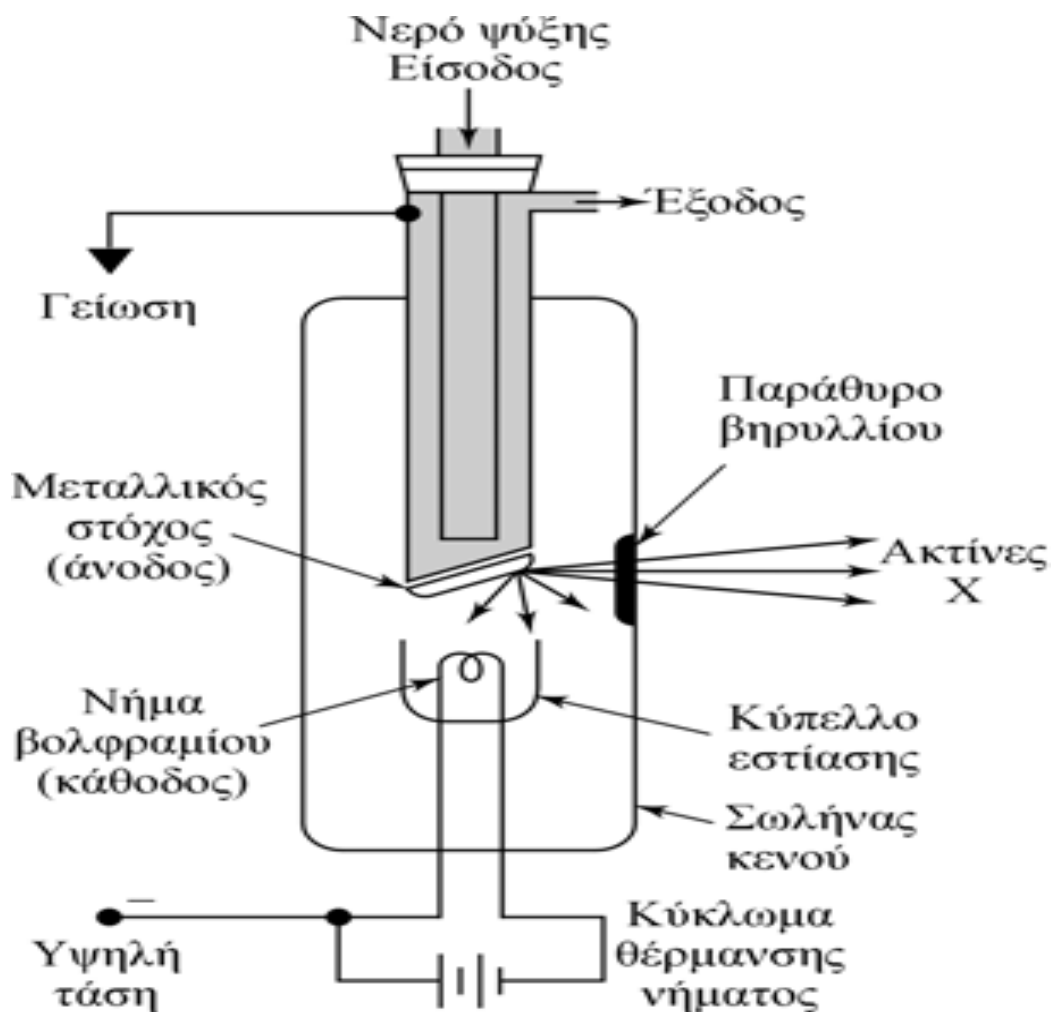
Η κάθε ακτινογραφική διάταξη αποτελείται από μια λυχνία ακτίνων-Χ, στην οποία παράγεται η ιονίζουσα ακτινοβολία με τη μορφή φάσματος ακτίνων-Χ, από τον εξεταζόμενο όπου βρίσκεται σε απόσταση περίπου 75 cm από τη λυχνία για απλές ακτινογραφίες, περίπου 55 cm για μαστογραφία (ο μαστός) και περίπου 120 cm για ακτινογραφία θώρακα. Οι διαφορές του σήματος, όπως αυτές εξέρχονται από τον εξεταζόμενο με τη μορφή διαφορών στην ένταση της ακτινοβολίας, λαμβάνονται από μία κατάλληλη ανιχνευτική διάταξη (ανιχνευτής).

#### 1.1.1 Λειτουργία της Λυχνίας

Η λυχνία ακτίνων-Χ παράγει μια δέσμη φωτονίων που προσπίπτει στο ανθρώπινο σώμα και αλληλεπιδρά με τους ιστούς. Η αλληλεπίδραση εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων-Χ και το είδος των ιστών. Το εμβαδό της δέσμης που προσπίπτει εγκάρσια στο άνθρωπο εξαρτάται από την ανατομική περιοχή που πρέπει να απεικονισθεί. Η λυχνία περιέχει ένα ελικοειδές σύρμα βολφραμίου το οποίο διαρρέεται από έντονο ηλεκτρικό ρεύμα. Το σύρμα θερμαίνεται (20000C) με σκοπό να απελευθερώνονται ηλεκτρόνια, μέσω θερμιονικής εκπομπής. Ο λόγος που επιλέγεται το Βολφραμίο είναι το υψηλό σημείο τήξης (3387°C) και η ανθεκτικότητά του. Οι περισσότερες λυχνίες διαθέτουν δύο ξεχωριστά «νήματα» διαφορετικού μήκους. Τα νήματα ονομάζονται και εστίες (μικρή και μεγάλη). Οι εστίες έχουν την δυνατότητα να τοποθετηθούν είτε σε παράλληλη είτε σε σειριακή διάταξη. Στη λυχνία επιπλέον υπάρχει μια κοιλότητα εστίασης (focusing cup). Πρόκειται για μια κυλινδρική «εσοχή» από Νικέλιο, που βρίσκεται σε σε κατάλληλο ηλεκτρικό δυναμικό έτσι ώστε να εστιάζει στην ηλεκτρονική δέσμη και να επιταχύνει τα ηλεκτρόνια που παράγονται προς ένα στόχο βολφραμίου, ή αλλιώς άνοδος. Ο στόχος τοποθετείται σε μια απόσταση μερικών εκατοστών από την πηγή των ηλεκτρονίων και έχει συνήθως τη μορφή στρεφόμενου δίσκου ώστε να επιτύχει καλύτερη διασπορά θερμότητας. Το Βολφράμιο εκτός του υψηλού σημείου τήξης, έχει και σχετικά υψηλό ατομικό αριθμό ( $Z=74$ ), πράγμα που συμβάλλει στην αύξηση της ποσότητας των παραγομένων φωτονίων Χ. Τέλος η κοιλότητα μαζί με το νήμα συνιστούν την κάθοδο της λυχνίας.

Η λυχνία ακτίνων Χ περιβάλλεται από ένα μεταλλικό κύλινδρο, ο οποίος ονομάζεται περίβλημα (tube housing). Το υλικό του είναι από κράμα Αλουμινίου ή Χάλυβα με θωράκιση Μολύβδου για ακτινοπροστασία. Η θωράκιση πρέπει να είναι καλά γειωμένη για την ηλεκτρική προστασία. Στο εσωτερικό του κυλίνδρου υπάρχει λάδι το οποίο προσφέρει ηλεκτρική μόνωση και συγχρόνως συμβάλλει στην απαγωγή της αναπτυσσόμενης θερμότητας προς το περιβάλλον. Στις λυχνίες με στρεφόμενη άνοδο η θερμότητα εκπέμπεται υπό μορφή υπέρυθρης (θερμικής) ακτινοβολίας από το σώμα της ανόδου προς τον σωλήνα. Στο εσωτερικό του περιβλήματος υπάρχουν ειδικοί «ασκοί» των

οποίων ο όγκος αυξομειώνεται ανάλογα με τη διαστολή του λαδιού λόγω θερμοκρασίας. Με την υπέρβαση ενός ορισμένου ορίου θερμοκρασίας ενεργοποιείται, μέσω των ασκών, ένας μικροδιακόπτης που διακόπτει τη λειτουργία της λυχνίας. Στην έξοδο της λυχνίας υπάρχει ένα ενδογενές φίλτρο (Αλουμίνιου στη ακτινογραφία, Ρόδιο ή Μολυβδαίνιο ή Αλουμίνιο στη μαστογραφία) για να απορροφήσει τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών. Από την έξοδο της λυχνίας η ακτινοβολία εξέρχεται με τη μορφή φωτονίων-Χ διαφορετικών ενεργειών (φάσμα ακτίνων-Χ). [1]



Εικόνα 1: Διάταξη Λυχνίας[2]

### 1.1.2 Λειτουργία του ανιχνευτή

Ο ανιχνευτής έχει ως σκοπό να ανιχνεύει την ακτινοβολία σε ένα ακτινολογικό μηχάνημα. Πιο συγκεκριμένα, ανιχνεύει την χωρική κατανομή της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επίπεδη επιφάνεια. Τις περισσότερες φορές η επιφάνεια αυτή είναι η πρόσοψη του ανιχνευτή η οποία βρίσκεται στην ανατομική περιοχή του εξεταζόμενου από την οποία εξέρχεται η ακτινοβολία-Χ. Οι ανιχνευτές γενικά μπορεί να διακριθούν σε ανιχνευτές ευαισθησίας θέσης (PSD- Position sensitive detectors) ή και σε ανιχνευτές καταγραφής φάσματος ακτινοβολίας.

Στη σύγχρονη ακτινολογία η απεικόνιση μπορεί να περιλαμβάνει διαφορετικά ενεργειακά παράθυρα των ακτίνων-Χ (απεικόνιση διπλής ενέργειας, φασματική απεικόνιση. Οι

ανιχνευτές εικόνας που χρησιμοποιούνται στα συστήματα της Ακτινοδιαγνωστικής λειτουργούν είτε ως συστήματα ενεργειακής ολοκλήρωσης (energy integrating), ή ως ανιχνευτές απαρίθμησης φωτονίων (photon counting). Στους πρώτους το σήμα στην έξοδο είναι ανάλογο της ενέργειας των φωτονίων που απορροφήθηκε, ενώ στους δεύτερους είναι ανάλογο του αριθμού των φωτονίων που απορρίφθηκε.

Οι κατηγορίες των ανιχνευτών είναι:

1) Σπινθηριστές έμμεσης ανίχνευσης, που αποτελούνται από ένα σπινθηριστή κι ένα ημιαγωγό με φασματική συμβατότητα στην ενέργεια των οπτικών φωτονίων που παράγονται από τον σπινθηριστή.

2) Σπινθηριστές άμεσης ανίχνευσης, όπου η αρχική ανίχνευση της ακτινοβολίας γίνεται απευθείας σε κατάλληλο ημιαγωγό (φωτοαγωγό) και παράγονται ηλεκτρόνια.

Οι σπινθηριστές και οι φώσφοροι βασίζονται στο φαινόμενο της φωταύγειας και του φθορισμού. Στο φαινόμενο αυτό, η ενέργεια των απορροφούμενων φωτονίων  $X$  μετατρέπεται σε ορατό φως και ενίοτε σε υπεριώδη ακτινοβολία. Στη συνέχεια το ορατό φως καταγράφεται από κάποιον οπτικό αισθητήρα ή φωτοανιχνευτή. Ο απλούστερος τύπος φωτοανιχνευτή είναι ένα ακτινογραφικό φιλμ, το οποίο χρησιμοποιείται για την καταγραφή του εκπεμπόμενου φωτός. Οι φωτοανιχνευτές των σύγχρονων ψηφιακών απεικονιστικών συστημάτων είναι ηλεκτρονικού τύπου (πχ φωτοδιόδοι) και μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρονικό σήμα. Οι περισσότεροι φωτοανιχνευτές βασίζονται σε ημιαγωγιμα υλικά (π.χ. πυρίτιο ( $a\text{-Si}$ )). Ο πιο συνηθισμένος τύπος φωτοαγωγού είναι το άμορφο σεληνίο ( $a\text{-Se}$ ). Το  $a\text{-Se}$  απορροφά την ακτινοβολία  $X$  και τα δημιουργούμενα φορτία συλλέγονται από ηλεκτρονικά στοιχεία όπως διόδοι αμόρφου πυριτίου, στοιχεία CMOS κλπ.

Όλες οι κατηγορίες ανιχνευτών βρίσκονται υπό μορφή επίπεδης επίστρωσης. Σε μερικές περιπτώσεις οι ανιχνευτές μπορεί να έχουν τη μορφή γραμμικής διάταξης διαδοχικών κυψελίδων.

Οι σημαντικότεροι τύποι ακτινογραφικών ανιχνευτών εικόνας είναι [1]:

1) Οι ακτινογραφικές κασέτες διπλής επίστρωσης. Αποτελείται από δύο φθορίζουσες οθόνες οι οποίες καλύπτουν και τις δύο πλευρές ενός ακτινογραφικού φιλμ. Επιπλέον, υπάρχουν και ακτινογραφικές κασέτες μονής επίστρωσης.

2) Οι ενισχυτές εικόνας που ενισχύουν τη φωτεινότητα της τελικής εικόνας. Χρησιμοποιούνται στη συμβατική ακτινοσκόπηση αλλά και σε ψηφιακή ακτινοσκόπηση.

3) Οι επίπεδοι ανιχνευτές ενεργού μήτρας μεγάλης επιφάνειας που χρησιμοποιούνται μόνο στην ψηφιακή ακτινογράφιση.

4) Οι φθορίζουσες οθόνες σε σύζευξη με CCD (κάμερα βίντεο) μέσω οπτικών ινών οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ψηφιακή ακτινογραφία.

5) Οι φώσφοροι αποθήκευσης (storage phosphors) για υπολογιστική ακτινογραφία (computed radiography).

6) Τέλος οι ανιχνευτές υπολογιστικής αξονικής τομογραφίας (computed tomography) που αποτελούνται από κυψελίδες σπινθηριστή-φωτοδιόδου που είναι τοποθετημένες σε διάταξη τόξου. Εμπρός από κάθε ακτινογραφικό ή ακτινοσκοπικό ανιχνευτή εικόνας



χρησιμοποιείται ένα ειδικό αντισκεδαστικό ή αντιδιαχυτικό διάφραγμα (antiscatter grid). Το διάφραγμα αυτό περιορίζει την πρόσπτωση στον ανιχνευτή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που προέρχεται από το σώμα του ασθενούς .[2]

### **1.1.3 Φάσμα ακτίνων Χ**

Η έννοια φάσμα βασίζεται στην ταξινόμηση των φωτονίων στον οριζόντιο άξονα ενός διαγράμματος ανάλογα με την ενέργεια τους. Στην ουσία αναπαρίσταται με μια γραφική παράσταση του αριθμού των φωτονίων σε συνάρτηση με την ενέργεια. Ο ορισμός του φάσματος διατυπώνεται με βάση τη φασματική πυκνότητα (spectral density), που είναι η ροή φωτονίων ανά στοιχειώδες ενεργειακό διάστημα. Το φάσμα της ακτινοβολίας πεδήσεως (που παράγεται στο στόχο της ακτινογραφικής λυχνίας) είναι συνεχές. Υπάρχει και γραμμικό φάσμα φωτονίων που παρουσιάζεται μετά από συγκεκριμένες ενεργειακές μεταπτώσεις (ραδιοϊσότοπα χαρακτηριστική ακτινοβολία) [1,3].

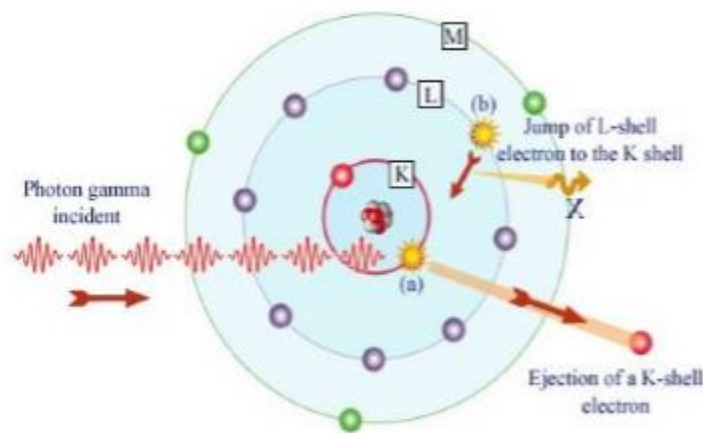
## 2. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΥΛΗ

### 2.1 Εισαγωγή

Βασικό χαρακτηριστικό όλων των μελετών που αναφέρονται στη φυσική και την τεχνολογία της ιατρικής απεικόνισης με ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι οι αλληλεπιδράσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με την ύλη. Η γνώση αυτών των αλληλεπιδράσεων, μπορεί να βοηθήσει στο καλύτερο σχεδιασμό απεικονιστικών διατάξεων στη μείωση της δόσης ακτινοβολίας στον εξεταζόμενο και τους γύρω χώρους καθώς και στην βελτίωση της τελικής εικόνας στον ανιχνευτή. Σε ένα τμήμα Ιατρικής Απεικόνισης τα υλικά που δέχονται ακτινοβολία μπορεί να είναι τα φίλτρα ή τα διαφράγματα που υπάρχουν στην έξοδο μιας πηγής ακτινοβολίας ή στην είσοδο του ανιχνευτή της ακτινοβολίας, το υλικό του ίδιου του ανιχνευτή ακτινοβολίας, το σώμα του ασθενούς, οι θωρακίσεις των χώρων μέσα στους οποίους είναι εγκατεστημένα τα απεικονιστικά συστήματα. Τα φαινόμενα αυτά είναι: το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η ελαστική σκέδαση (σκέδαση Thomson, σκέδαση Rayleigh) και το φαινόμενο Compton. Σε μεγαλύτερες ενέργειες (της τάξης των MeV) παρουσιάζεται ακόμα το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης [1-3].

#### 2.1.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Είναι η αλληλεπίδραση ενός φωτονίου X ή γ με κάποιο ισχυρά συνδεδεμένο ηλεκτρόνιο των εσωτερικών στιβάδων ενός ατόμου. Ένα μέρος της ενέργειας του φωτονίου καταναλώνεται για να υπερνικηθεί η έλξη του πυρήνα και να αποσπασθεί το ηλεκτρόνιο από το άτομο. Το υπόλοιπο μέρος της ενέργειας αποδίδεται στο ηλεκτρόνιο υπό μορφή κινητικής ενέργειας. Το ηλεκτρόνιο αυτό απορροφάται σε μικρή απόσταση από το σημείο αλληλεπίδρασης. Μετά τη αλληλεπίδραση το αρχικό φωτόνιο εξαφανίζεται. Αφού όμως από το άτομο αποσπαστήκε ένα ηλεκτρόνιο, παρουσιάζεται μια κενή θέση σε κάποια από τις ενεργειακές στιβάδες του. Η κενή αυτή θέση, που συνήθως είναι στη στιβάδα K, καλύπτεται από κάποιο άλλο ηλεκτρόνιο υψηλότερης ενεργειακής στάθμης. Η μετακίνηση αυτή του ηλεκτρονίου στη στιβάδα K συνοδεύεται από εκπομπή της περισσευούμενης ενέργειας υπό μορφή φωτονίου. Τα φωτόνια αυτού του είδους ονομάζονται K-χαρακτηριστική ακτινοβολία φθορισμού (K-fluorescence characteristic radiation).



Εικόνα 2: Φωτοηλεκτρικού φαινομένου στο οποίο φαίνεται και η εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας –K (Φθορισμού)[1].

Αντίστοιχα εάν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συμβεί στη στιβάδα L, εκπέμπεται η L-χαρακτηριστική ακτινοβολία φθορισμού. Τα φωτόνια αυτά (K, L κλπ.) διανύουν κάποια απόσταση μέσα στο υλικό και μετά είτε απορροφώνται είτε διαφεύγουν. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συχνά αναφέρεται και ως φωτοηλεκτρική απορρόφηση επειδή τελικά απορροφάται ολόκληρη η ενέργεια του αρχικού φωτονίου.

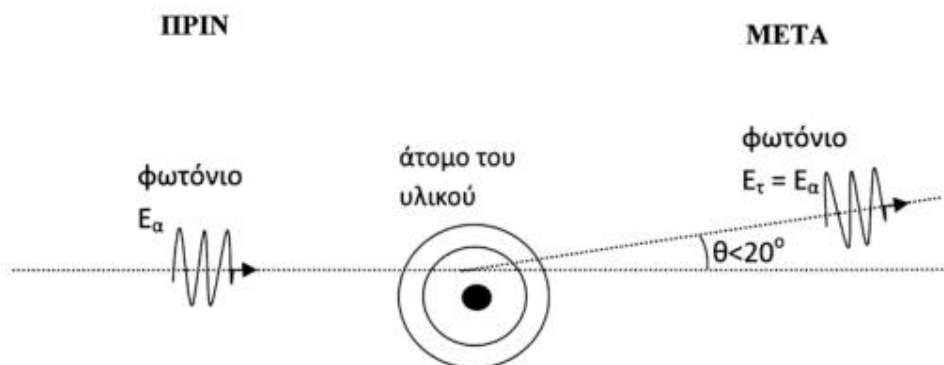
Συμπερασματικά, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι πολύ σημαντικό στη Διαγνωστική Ακτινολογία διότι:

1) Η απορρόφηση της ακτινοβολίας (μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου) πρέπει να συμβαίνει ανομοιόμορφα στο εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος (π.χ. περισσότερο στα οστά και λιγότερο στους μαλακούς ιστούς). Αυτό συμβάλει στο σχηματισμό της εικόνας. Πιο συγκεκριμένα, στην Ακτινοδιαγνωστική το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο καθορίζει την αντίθεση της ακτινογραφικής και ακτινοσκοπικής εικόνας.

2) Η απορρόφηση της ακτινοβολίας (μέσω και φωτοηλεκτρικού φαινομένου) πρέπει να είναι όσο το δυνατό εντονότερη στον ανιχνευτή του απεικονιστικού συστήματος. Αυτό συμβάλει στη συλλογή μεγάλου αριθμού φωτονίων (φορέων πληροφορίας) και κατά συνέπεια στη μεγαλύτερη αξιοπιστία της εικόνας και στην ελάττωση της επιβάρυνσης του ασθενούς σε ακτινοβολία (λιγότερη ακτινοβολία στον ασθενή για ίδια απορρόφηση στον ανιχνευτή). [2]

### 2.1.2 Ελαστική σκέδαση

Στο φαινόμενο αυτό τα φωτόνια αλληλοεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια των ατόμων, με αποτέλεσμα να υπάρξει μικρή αλλαγή της διεύθυνσης της διάδοσης τους χωρίς όμως αλλαγή της ενέργειάς τους. Δεν παρουσιάζονται φαινόμενα ιονισμού των ατόμων. Η ελαστική σκέδαση συμβαίνει όταν το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι περίπου ίσο με τις διαστάσεις των ατόμων. Αυτά τα μήκη κύματος αντιστοιχούν σε ενέργειες 10-12 keV. Δηλαδή σε ενέργειες που μπορεί να υπάρχουν σε μια δέσμη ακτινοβολίας στην Ακτινοδιαγνωστική. Επίσης το φαινόμενο αυτό καθίσταται σημαντικό όταν τα άτομα έχουν μεγάλο ατομικό αριθμό Z. Η ελαστική σκέδαση π.χ. κυριαρχεί στο Μόλυβδο (Pb) ακόμα και σε σχετικά υψηλές ενέργειες φωτονίων. Στις ενέργειες που χρησιμοποιούνται στην ακτινολογία, στην ακτινοθεραπεία η πιθανότητα τα φωτόνια να αλληλοεπιδράσουν με την ύλη κατά τον τρόπο αυτό είναι πολύ μικρή.[3]



Εικόνα 3: Το φωτόνιο σκεδαζείται από το άτομο του υλικού αλλάζοντας τη διεύθυνση του ενώ η τελική του ενέργεια  $E_t$  διατηρείται ίση με την αρχική  $E_a$ . [3]

### 2.1.3 Φαινόμενο Compton (ανελαστική σκέδαση)

Το φαινόμενο Compton βασίζεται στη σκέδαση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από φορτισμένα σωματίδια (συνήθως ελαφρώς δέσμια ηλεκτρόνια). Κατά την αλληλεπίδραση αυτή ένα μέρος της αρχικής ενέργειας του φωτονίου παρέχεται στο ηλεκτρόνιο υπό μορφή κινητικής ενέργειας (η ενέργεια του φωτονίου είναι σχετικά υψηλή, μεγαλύτερη των 50 keV για νερό ή μαλακό ιστό). Η υπόλοιπη ποσότητα ενέργειας παραμένει στο φωτόνιο το οποίο μετά την αλληλεπίδραση αλλάζει διεύθυνση διάδοσης (σκέδαση). Η γωνία της νέας διεύθυνσης (σε σχέση με την αρχική) ονομάζεται γωνία σκέδασης.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι η σκέδαση είναι ανεπιθύμητη στην διαδικασία σχηματισμού εικόνων, διότι αλλάζει η αρχική διεύθυνση των φωτονίων, τα οποία προβάλλονται σε διαφορετικό σημείο στο επίπεδο του ανιχνευτή. Σκέδαση μπορεί να συμβαίνει σε κάθε υλικό αντικείμενο που παρεμβάλλεται στην πορεία ενός φωτονίου (δέρμα, ομοιώματα ελέγχου, εξεταστικό κρεβάτι κλπ).

Ισχύει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία σκέδασης τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενέργεια που αποδίδεται στο ηλεκτρόνιο. Κατά συνέπεια τόσο μικρότερη θα είναι και η ενέργεια που συγκρατείται από το σκεδαζόμενο φωτόνιο.

Το μήκος κύματος  $\lambda_s$  του σκεδαζόμενου φωτονίου παρέχεται από την εξίσωση:

$$\lambda_s - \lambda_p = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta)$$

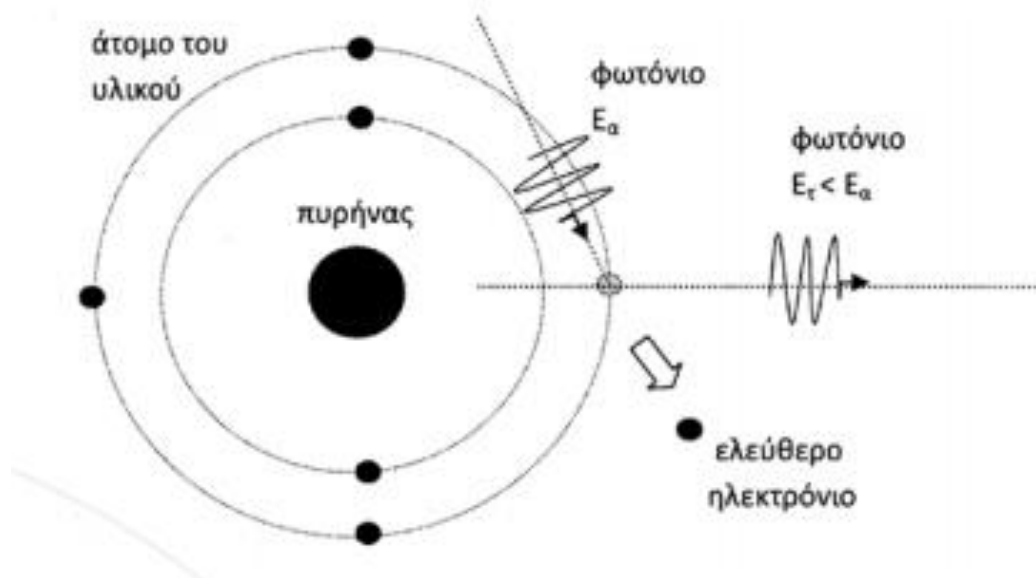
Από την εξίσωση γίνεται φανερό ότι όσο μικρότερη είναι η γωνία  $\theta$  (αύξηση του  $\cos\theta$ ) τόσο η τιμή του  $\lambda_s$  προσεγγίζει τη τιμή του  $\lambda_p$ . Αυτό σημαίνει ότι τα φωτόνια που σκεδάζονται προς διευθύνσεις ελαφρά αποκλίνουσες από την αρχική, διατηρούν ένα μεγάλο ποσοστό της αρχικής ενέργειας.

Η ποσότητα  $h/m_0 c$  ( $=0.024$ ) ονομάζεται μήκος κύματος Compton. Η αντίστοιχη σχέση για τις ενέργειες είναι:

$$h\nu_s = \frac{h\nu_p}{1 + (1 - \cos\theta)h\nu_p/m_0 c^2}$$

Γενικά στις ενέργειες της Ακτινοδιαγνωστικής (π.χ. 40 - 60 keV), το ποσοστό της ενέργειας που αποδίδεται στο ηλεκτρόνιο είναι αρκετά χαμηλό (κάτω του 20%, ακόμα και στις μεγάλες γωνίες σκέδασης). Το γεγονός ότι στις εφαρμογές της Ακτινοδιαγνωστικής τα σκεδαζόμενα φωτόνια κατακρατούν υψηλό ποσοστό της αρχικής ενέργειας, δημιουργεί προβλήματα ακτινοπροστασίας. Φωτόνια που σκεδάζονται προς την πλευρά των χειριστών των ακτινολογικών μηχανημάτων έχουν σημαντική ενέργεια.

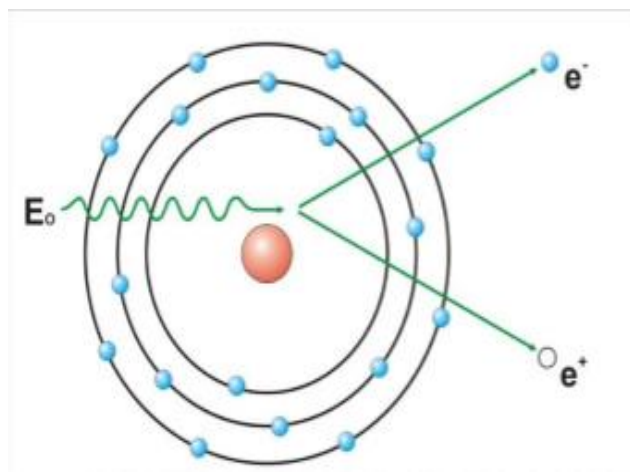
Η συνολική ελάττωση της έντασης μιας δέσμης φωτονίων εξαιτίας του φαινομένου Compton εκφράζεται από το γραμμικό συντελεστή εξασθένησης Compton  $\sigma$ . Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την απορρόφηση ενέργειας από το ηλεκτρόνιο και τη τελική ενέργεια που κατακρατείται από το σκεδαζόμενο φωτόνιο. [2]



**Εικόνα 4:** Το φωτόνιο έχοντας αρχική ενέργεια  $E_a$  αλληλοεπιδρά με ηλεκτρόνιο της τελευταίας στοιβάδας δίνοντας του μέρος της ενέργειας του. Το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο και ελευθερώνεται. [3]

### 2.1.4 Φαινόμενα παραγωγής ζεύγους και εξαύλωσης

Κατά το φαινόμενο αυτό ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας αλληλοεπιδρά με τον πυρήνα ενός ατόμου, με αποτέλεσμα την εξαφάνιση του φωτονίου και την εμφάνιση ενός ηλεκτρονίου  $e^-$  και ενός ποζιτρονίου  $e^+$ . Επειδή η μάζα του ηλεκτρονίου (ή του ποζιτρονίου) αντιστοιχεί σε ενέργεια 0.511 MeV, για το σχηματισμό τους απαιτείται η ενέργεια του φωτονίου να είναι τουλάχιστον 1.022 MeV.



**Εικόνα 5 :** Αλληλεπίδραση φωτονίου με τον πυρήνα και η εμφάνιση των σωματιδίων.[2]

Κατά το αντίστροφο φαινόμενο, την εξαύλωση, ένα ποζιτρόνιο και ένα ηλεκτρόνιο αλληλοεπιδρούν έτσι ώστε η συνολική μάζα τους να μετασχηματισθεί σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση δύο φωτονίων τα οποία κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Η κίνηση αυτή επιβάλλεται από το νόμο διατήρησης της ορμής. [2]

### 2.1.5 Αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων με υλικά

Η λεγόμενη ανασχετική ισχύς ή αλλιώς μαζική ανασχετική ισχύς χρησιμοποιείται για την μετάδοση φορτισμένων σωματιδίων μέσα σε ένα υλικό.

$$\text{Ισχύει ότι : } \frac{S}{\rho} = \frac{dE}{P dx}$$

Η ποσότητα  $(dE/dx)$  εκφράζει τις ενεργειακές απώλειες ενός ηλεκτρονίου, ή άλλου φορτισμένου σωματίου, σε διαδρομή μήκους  $dx$  μέσα σε ένα υλικό. Οι ενεργειακές απώλειες οφείλονται σε συγκρούσεις των κινούμενων ηλεκτρονίων με δέσμια ηλεκτρόνια ατόμων του υλικού (που μπορεί να προκαλέσει τελικά δευτερεύοντες ιονισμούς) και σε αλληλεπιδράσεις των κινούμενων ηλεκτρονίων με τους πυρήνες ατόμων του υλικού. [2]

### 3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ MONTE KARLO

#### 3.1 Εισαγωγικές έννοιες Μόντε Κάρλο

Βασικό προ απαιτούμενο για κάθε προσομοίωση είναι η παραγωγή μιας ακολουθίας από φαινομενικά τυχαίους αριθμούς. Ίσως ένας τρόπος για να παράγουμε τυχαίους αριθμούς είναι να χρησιμοποιήσουμε διαδικασίες όπως για παράδειγμα, το ρίξιμο ενός ζαριού ή οι αριθμοί της κλήρωσης του Τζόκερ. Πλέον έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που δημιουργούν ψευδοτυχαίους αριθμούς μέσω υπολογιστή.

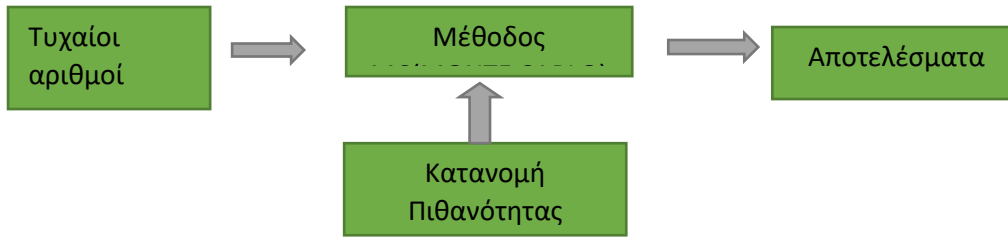
Η χρήση της μεθόδου Monte Carlo στη μοντελοποίηση φυσικών προβλημάτων μας επιτρέπει να εξετάσουμε πολύπλοκα συστήματα που αλλιώς θα ήταν δύσκολο [4-12]. Με τον όρο Monte Carlo χαρακτηρίζεται κάθε αλγόριθμος προσομοίωσης που χρησιμοποιεί γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Σήμερα η μέθοδος Μόντε Κάρλο χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ επιστημονικό πεδίο που αφορά από τη ρύθμιση της οδικής κυκλοφορίας μέχρι τη θεραπεία καρκίνου, τη γενετική και την οικονομία. Η μέθοδος αυτή μπορεί να βοηθήσει σημαντικά , καθώς είτε προσφέρει διόρθωση (μικρής κλίμακας) μιας θεωρίας είτε μπορεί να την επιβεβαιώσει ή ακόμα και να την απορρίψει.[13]

Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή υπολογίζει παραμέτρους ενός συστήματος, μέσω προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων. Η λύση καθορίζεται μέσω τυχαίας δειγματοληψίας των συσχετισμών των αλληλεπιδράσεων, έως ότου προκύψει αποτέλεσμα. Συνεπώς η διαδικασία επίλυσης είναι μια συνεχής επανάληψη δειγματοληψίας και υπολογισμών. Πολλές αλληλεπιδράσεις μπορούν να μοντελοποιηθούν μαθηματικά, γι'αυτό είναι βέλτιστο η επαναλήψιμη αυτή διαδικασία, να πραγματοποιείται με υπολογιστή με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων.

Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται με τη χρήση τυχαίων αριθμών και μιας κατανομής πιθανότητας η οποία είναι προς εξέταση. Τα αρχικά μέρη μιας κατανομής περιλαμβάνουν τα εξής:

- 1) Η συνάρτηση κατανομής της πιθανότητας(probability distribution function-pdf). Το πρόβλημα το οποίο τίθεται προς επίλυση πρέπει να μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο pdf .
- 2) Δημιουργία τυχαίων αριθμών: δηλαδή τυχαίοι αριθμοί οι οποίοι θα κατανέμονται ομοιόμορφα στο διάστημα της μονάδας.
- 3 )Κανόνας δειγματοληψίας: Η διαδικασία για τη δειγματοληψία από τη συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας λαμβάνοντας υπ' όψιν τη διαθεσιμότητα τυχαίων αριθμών.
- 4) Τα αποτελέσματα θα πρέπει να αθροιστούν σε καταμετρητές (tallies) των ποσοτήτων που επιθυμούμε να εκτιμήσουμε.
- 5) Ύστερα πραγματοποιείται μια εκτίμηση του στατιστικού σφάλματος ως συνάρτηση των δοκιμών.
- 6)Στην συνέχεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές μείωσης σφαλμάτων στο τελικό αποτέλεσμα της μεθόδου, οι οποίες έχουν ως σκοπό την μείωση του υπολογιστικού χρόνου .[5, 6]

Ένα διάγραμμα ροής της μεθόδου MC θα μπορούσε να παρουσιαστεί ως εξής:



### 3.1.1 Εφαρμογή της τεχνικής Monte Carlo

Η Monte Carlo μέθοδος απαιτεί ένα μεγάλο σύνολο τυχαίων αριθμών. Ένας τυχαίος αριθμός είναι μια μεταβλητή η οποία μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα πρόβλεψης αυτής. Η ποιότητα μιας αλληλουχίας τυχαίων αριθμών μπορεί να θεωρηθεί καλή, μόνο μετά από προσεκτική εξέταση, που θα επιβεβαιώνει τη μη ύπαρξη κάποιας εξαναγκασμένης επαναληψιμότητας των αριθμών. Συχνότερη όμως είναι η ντετερμινιστική παραγωγή ψευδοτυχαίων αριθμών με τη βοήθεια μαθηματικών αλγορίθμων.

Η γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών (RNG=Random Number Generator) είναι ο πυρήνας μιας Monte Carlo τεχνικής. Ουσιαστικά παράγεται η τυχειότητα, ώστε η προσομοίωση να μιμηθεί την τυχειότητα της φύσης του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί. Μια γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών έχει την δυνατότητα να παράγει ίδιους αριθμούς περιοδικά. Στην περίπτωση όπου η περίοδος είναι πολύ μεγάλη τότε η επαναληψιμότητα αυτή δεν αποτελεί κάποιο πρόβλημα.

Επιπλέον υπάρχουν και άλλες μέθοδοι για γεννήτριες τυχαίων αριθμών, χρησιμοποιούνται και οι μέθοδοι γνωστές ως variance reduction δηλαδή τεχνικές ελάττωσης της διασποράς. Οι τεχνικές αυτές λειτουργούν ως εξής: Συγκρίνοντας δύο διαφορετικές Monte Carlo διαδικασίες, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ίδιας ποσότητας, τότε θεωρούμε ίδια ακρίβεια στα αποτελέσματα και για τις δύο. Η ακρίβεια αυτή, αυξάνεται καθώς ο υπολογιστικός χρόνος για κάθε δοκιμή αυξάνεται, ενώ επίσης θα έπρεπε να αυξάνεται, όσο η διασπορά που σχετίζεται με τους υπολογισμούς μειώνεται. Άρα αν  $\epsilon$  είναι η ακρίβεια μιας Monte Carlo μεθόδου, τότε έχουμε:

$$\epsilon \approx 1/t\sigma^2$$

όπου  $t$  είναι η ποσότητα του χρόνου που απαιτείται για μια Monte Carlo δοκιμή και  $\sigma^2$  είναι η διασπορά της δειγματοληψίας που σχετίζεται με τον υπολογισμό της ποσότητας που μας ενδιαφέρει. Επειδή ο χρόνος  $t$  καθορίζεται πάντα από την υπολογιστική δύναμη του υπολογιστή που χρησιμοποιούμε, είναι δύσκολο να βοηθήσει στη αύξηση του  $\epsilon$ . Γι' αυτό το λόγο, αναζητούνται διάφοροι τρόποι αυξάνοντας το  $\epsilon$ , μειώνοντας το  $\sigma^2$ . Οι περισσότερες variance reduction τεχνικές απαιτούν της χρήση ανώτερης στατιστικής.[5]

### 3.1.2 Ιδιότητες τυχαίων αριθμών

Μια βασική ιδιότητα της μεθόδου Monte Carlo είναι η παραγωγή τυχαίων αριθμών. Παρακάτω ακολουθούν οι ιδιότητες που πρέπει να έχουν οι "γεννήτριες" τυχαίων αριθμών:

1) Ασυσχετίστες ακολουθίες: Οι παραγόμενοι αριθμοί πρέπει να φαίνονται ομοιόμορφα κατανομημένοι στο διάστημα  $[0,1]$  και οι ακολουθίες τυχαίων αριθμών θα πρέπει να είναι σειριακά ασυσχετίστες.



2) Μεγάλη περίοδο: Η γεννήτρια θα πρέπει να έχει μεγάλη περίοδο (ιδανικά η γεννήτρια θα πρέπει να μην επαναλαμβάνεται, δηλαδή να έχει άπειρη περίοδο. Η επαναληψιμότητα πρακτικά εμφανίζεται ύστερα από παραγωγή πολύ μεγάλου αριθμού τυχαίων αριθμών.

3) Ομοιομορφία: Η ακολουθία των τυχαίων αριθμών θα πρέπει να είναι ομοιόμορφη και μη εξαναγκασμένη. Αυτό σημαίνει ότι ίσα κλάσματα τυχαίων αριθμών αντιστοιχούν σε ίσα διαστήματα περιοχών στο χώρο. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται ευκολότερη η επιβεβαίωση και η διόρθωση λαθών. Επίσης γίνεται ευκολότερη η σύγκριση της προσομοίωσης διαφορετικών συστημάτων.

4) Αποδοτική: Η γεννήτρια θα πρέπει να είναι αποτελεσματική. Οι γεννήτριες τυχαίων αριθμών μπορούν να εκτελεστούν εύκολα σε γλώσσες προγραμματισμού, όπως είναι η C ή η FORTRAN. [5]

## 4. PENELOPE

### 4.1 Περιγραφή του Penelope

Ο κώδικας Penelope προσομοιώνει την διάδοση ηλεκτρονίων , φωτονίων και ποζιτρονίων σε διάφορα υλικά τα οποία αποτελούνται από έναν αριθμό ομογενών περιοχών, διαχωρισμένα από λεπτές και διαπερατές επιφάνειες. Η ονομασία Penelope προέρχεται από τον όρο "PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons" καθώς στο αρχικό στάδιο δεν γινόταν προσομοίωση στα φωτόνια . Ο κώδικας αυτός βασίζεται στο μοντέλο του διασκορπισμού (scattering model), με διάφορες αριθμητικές βάσεις δεδομένων. Ο κώδικας αξιοποιεί τα δεδομένα από μια γλώσσα προγραμματισμού ,την Fortran [14-18].

Για τον πλήρη έλεγχο της προσομοίωσης και για την πλήρη πρόσβαση σε όλες τις πληροφορίες αλλά και τις βάσεις των δεδομένων, ο κάθε χρήστης οφείλει να γράψει το δικό του κυρίως πρόγραμμα. Το κυρίως πρόγραμμα θα καταχωρεί τις ποσότητες που ενδιαφέρουν τον χρήστη.

### 4.2 Περιγραφή FORTRAN

Η Fortran είναι μια επιστημονική γλώσσα προγραμματισμού και το όνομα της προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων FORmula TRANslation .Υπήρξαν διάφορες εκδόσεις της γλώσσας μέχρι που έφθασε στην FORTRAN 90. Οι λέξεις του λεξιλογίου της Fortran είναι λέξεις της αγγλικής γλώσσας. Η γλώσσα αυτή αποτελεί την πρώτη γλώσσα προγραμματισμού , η οποία επιτρέπει κωδικοποίηση μαθηματικών εκφράσεων με τέτοιο τρόπο που μοιάζει με αυτόν που γράφουμε στα μαθηματικά.

Οι λόγοι που επιλέγεται η FORTRAN σε αντίθεση με άλλες γλώσσες προγραμματισμού είναι επειδή μπορεί να χειριστεί με ευκολία πίνακες , ορίζει με ακρίβεια τις μεταβλητές και παραμένει το πιο ισχυρό εργαλείο για τις αριθμητικές και επιστημονικές εφαρμογές , αφού είναι περισσότερο αποτελεσματική στις πράξεις .Ταυτόχρονα υπάρχουν έτοιμα υπολογιστικά πακέτα για την λύση πολλών προβλημάτων. [14, 19]

### 4.3 Περιγραφή του περιβάλλοντος εισαγωγής δεδομένων PENELOPE

Το πακέτο του κώδικα PENELOPE περιέχει τρεις καταλόγους ,όπου κάθε κατάλογος περιέχει μια σειρά από αρχεία ή και άλλους υποκαταλόγους.

Ο πρώτος φάκελος /FortranCode/ περιέχει αρχεία της γλώσσας προγραμματισμού τα οποία αποτελούν το κυρίως μέρος του κώδικα PENELOPE. Μερικά από τα αρχεία αυτά είναι : penaux.F, penEasy.F, penvox.F,timing.F κ.α.

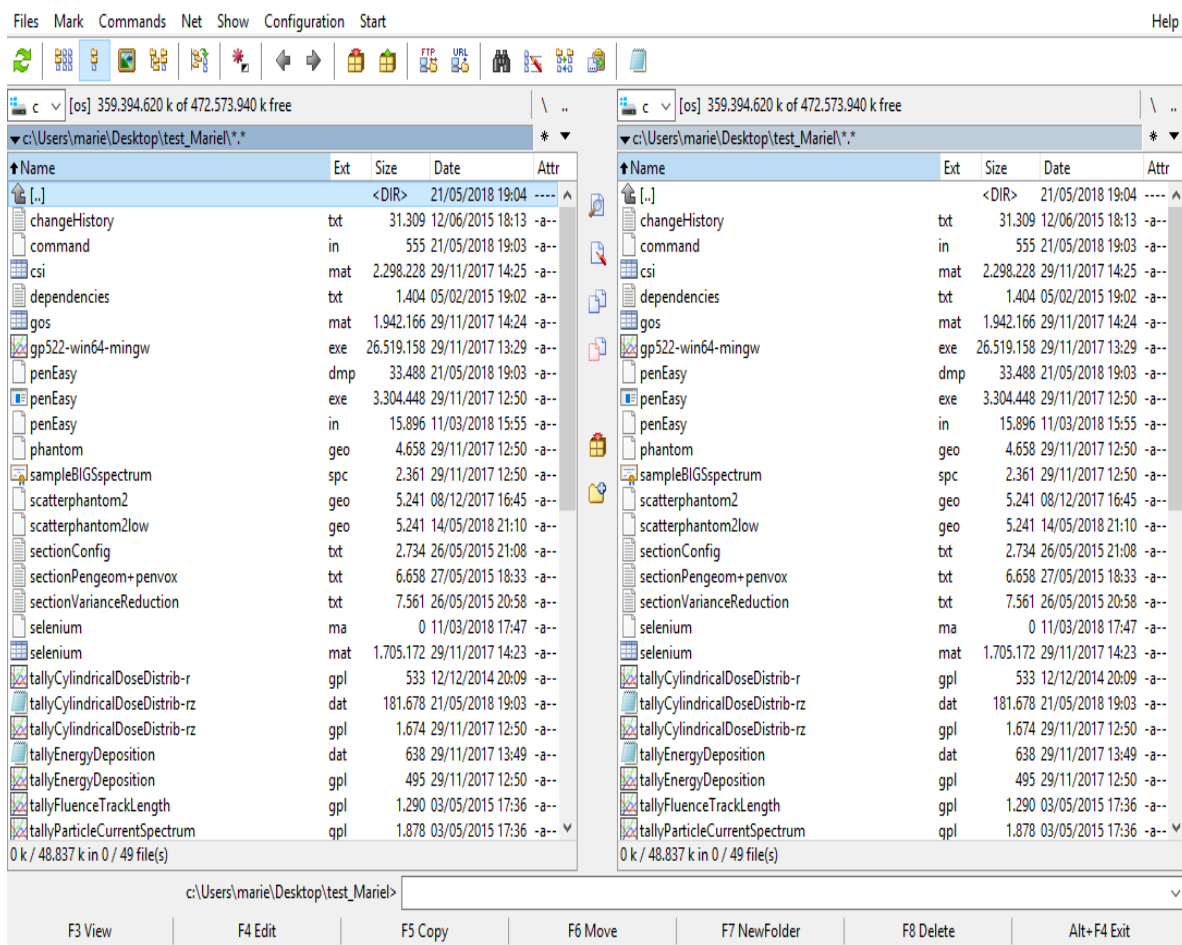
Στην συνέχεια υπάρχει ο φάκελος /gnuplotScripts/ ο οποίος περιέχει αρχεία της μορφής .dat. Τα αρχεία αυτά είναι έτοιμα αρχεία εισόδου του προγράμματος γραφικής απεικόνισης Gnuplot , με τα οποία εμφανίζονται γραφικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν για κάθε ένα φυσικό πρόβλημα. Παρακάτω αναλύονται τα χαρακτηριστικά των αρχείων αυτών:

- tallyEnergyDeposition:Το αρχείο tallyEnergyDeposition.dat περιγράφει την κατανομή της ενέργειας.
- tallyCylindricalDoseDistrib-rz:Το αρχείο tallyCylindricalDoseDistrib-rz.dat περιγράφει την κατανομή της κυλινδρικής κατανομής της δόσης.

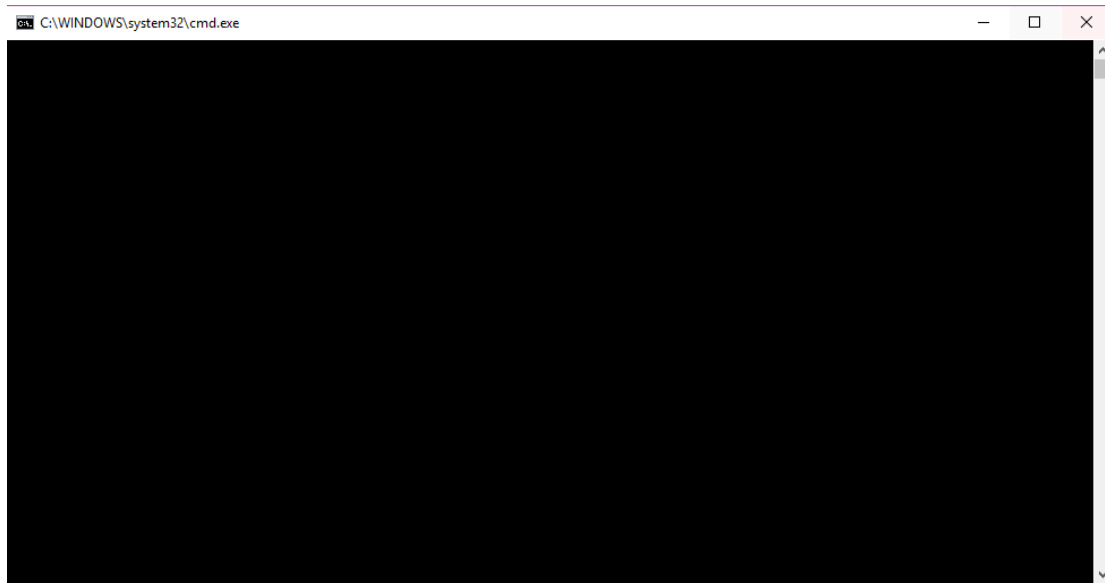
- tallyPulseHeightSpectrum: Το αρχείο tallyPulseHeightSpectrum.dat περιγράφει το ύψος του παλμικού φάσματος.
- tallySpatialDoseDistrib-3D: Το αρχείο tallySpatialDoseDistrib-3D.dat περιγράφει την χωρική κατανομή της δόσης σε τρισδιάστατη μορφή.
- tallySpatialDoseDistrib-1D: Το αρχείο tallySpatialDoseDistrib-1D.dat περιγράφει την χωρική κατανομή της δόσης σε μονοδιάστατη μορφή.

Ύστερα υπάρχει ο φάκελος /run/ όπου αποτελείται από τεσσέρις υποκαταλόγους (PenEasy.in , Phatom.geo(Penmain), PenEasy ,command.in)Στον συγκεκριμένο φάκελο, περιλαμβάνεται και τα υλικά που χρησιμοποιούμε για τις προσομοιώσεις.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται μέσω ενός βοηθητικού προγράμματος(TOTALCMD64 ),το οποίο τρέχει τα δεδομένα που έχει θέσει ο χρήστης με την γραμμή εντολών cmd όπως φαίνεται παρακάτω :



**Εικόνα 6:Βοηθητικό πρόγραμμα TOTALCMD64**



Εικόνα 7:Γραμμή εντολών cmd.exe

#### 4.3.1 Ο κώδικας χρήστη Peneasy

Ο κώδικας Peneasy είναι γενικής χρήσης ,αφού προσομοιώνει την διάδοση των ηλεκτρονίων μέσα από σύνθετες κατασκευές. Η γεωμετρία περιγράφεται σε κατάλληλο αρχείο εισόδου (αρχείου τύπου .geo), το οποίο το διαβάζει ένα αρχείο εισόδου (peneasy.in) όπου ο χρήστης εισάγει στον κώδικα διάφορες παραμέτρους με σκοπό την επιθυμητή προσομοίωση.

Ο κώδικας επιτρέπει στον χρήστη να σταματήσει τη διαδικασία της προσομοίωσης οποιαδήποτε στιγμή. Επιπλέον, ο κώδικας παρέχει τη δυνατότητα να καταγραφεί τα αποτελέσματα σε ένα αρχείο εξόδου (peneasy.out) σε καθορισμένες χρονικές περιόδους.

Πιο αναλυτικά, το αρχείο εισόδου δεδομένων τύπου \*.in περιγράφει χαρακτηριστικά προσομοίωσης όπως το πλήθος ιστοριών που προσομοιώνονται, το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης ,την ενέργεια κ.ο κ. Παρακάτω επισυνάπτεται ένα παράδειγμα ενός αρχείου peneasy.in, κάνοντας περιγραφή των δεδομένων εισόδου.





```

[SECTION TALLY SPATIAL DOSE DISTRIB v.2009-06-15]
ON STATUS (ON or OFF)
0.0 0.0 0.0 XMIN,XMAX(cm),NXBIN (0 FOR DX=infty)
0.0 0.0 0.0 YMIN,YMAX(cm),NYBIN (0 FOR DY=infty)
1.990 2.003 26 ZMIN,ZMAX(cm),NZBIN (0 FOR DZ=infty)
1 PRINT COORDINATES IN REPORT (1=YES,0=NO,-1=NO&BINARYFORMAT)
1.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF SDD SECTION]

[SECTION TALLY CYLINDRICAL DOSE DISTRIB v.2009-06-15]
ON STATUS (ON or OFF)
0.0 5.0 50 RMIN,RMAX(cm),NRBIN (>0)
1.990 2.003 26 ZMIN,ZMAX(cm),NZBIN (0 FOR DZ=infty)
1 PRINT COORDINATES IN REPORT (1=YES,0=NO)
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF CDD SECTION]

[SECTION TALLY SPHERICAL DOSE DISTRIB v.2009-06-15]
OFF STATUS (ON or OFF)
0.0 1.0 50 RMIN,RMAX(cm),NRBIN (>0)
1 PRINT COORDINATES IN REPORT (1=YES,0=NO)
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF SPD SECTION]

[SECTION TALLY ENERGY DEPOSITION v.2012-06-01]
OFF STATUS (ON or OFF)
2 DETECTION MATERIAL
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF EDP SECTION]

[SECTION TALLY PULSE HEIGHT SPECTRUM v.2012-06-01]
OFF STATUS (ON or OFF)
1 DETECTION MATERIAL
0.0 10.0e6 100 EMIN,EMAX(eV), No. OF E BINS
0.0 0.0 A(eV^2),B(eV) FOR GAUSSIAN CONVOLUTION FWHM[eV]=sqrt(A+B*E[eV])
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
    
```

**Εικόνα 12: Στο τέλος του κώδικα ο χρήστης θέτει την κατανομή της χωρικής κατανομής της δόσης και την διατομή της κυλινδρικής κατανομής της δόσης.**

Με τη χρήση του κώδικα αυτού παρέχονται πληροφορίες που αφορούν τη διάδοση των σωματιδίων μέσα από διάφορα υλικά. Ταυτόχρονα ,ο κώδικας δίνει στον χρήστη πληροφορίες όπως την κατανομή της ενέργειας και την γωνία των σωματιδίων, την κατανομή της δόσης του φορτίου και την κατανομή της ενέργειας από αρχεία εξόδου του προγράμματος. Αυτό πραγματοποιείται μέσω εικονικών ανιχνευτών οι οποίοι αποτελούνται από μια ομάδα υλικών , τα οποία τα ορίζει ο χρήστης στο αρχείο της γεωμετρίας. Ο κάθε ανιχνευτής εμφανίζει με το πέρας της προσομοίωσης ένα φάσμα, το οποίο αναφέρεται στην συνολική κατανομή της ενέργειας των σωματιδίων που εισήλθαν στον ανιχνευτή. Επιπλέον ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίσει έναν "ανιχνευτή δόσης" , ο οποίος καταγράφει την κατανομή της δόσης σε κάθε θέση . Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσδιορισθεί η δοσιμετρική κατανομή μίας ακτινοβολίας μέσα σε ένα σώμα ή σε μία περιοχή (όπου έχουν προ καθοριστεί) . Ο κώδικας Peneasy μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές, αφού ουσιαστικά δεν υπάρχει περιορισμός στη γεωμετρία της κατασκευής.

Παρακάτω δίνεται η περιγραφή των αρχείων δεδομένων , τα οποία είναι απαραίτητα για την εκτέλεση του κώδικα :

1)Το αρχείο εισόδου γεωμετρίας τύπου \*.geo το οποίο περιγράφει τη γεωμετρία του προβλήματος που επιλύεται με την προσομοίωση .Είναι δυνατόν μία προσομοίωση να γίνει και χωρίς το αρχείο αυτό, αν και η χρήση του διευκολύνει ιδιαίτερα την ορθή προσομοίωση. Στο σημείο αυτό , πρέπει να τονιστεί ότι το peneasy επιτρέπει την προσομοίωση διαφορετικών γεωμετριών με το ίδιο βασικό πρόγραμμα και το ίδιο αρχείο εισόδου τύπου \*.in αρκεί μόνο η αλλαγή του ονόματος αρχείου μέσα στο αρχείο \*.in . Το αρχείο εισόδου γεωμετρίας \*.geo αποτελείται από παραγράφους, οι οποίες αναφέρονται στα διάφορα στοιχεία της κατασκευής που είναι οι επιφάνειες, τα σώματα και τα υλικά.

2) Το αρχείο εισόδου υλικού τύπου \*.mat περιέχει φυσικές σταθερές και παραμέτρους των υλικών, τα οποία εμπλέκονται στο πρόβλημα. Το αρχείο είναι απαραίτητο για μία προσομοίωση.



## 5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

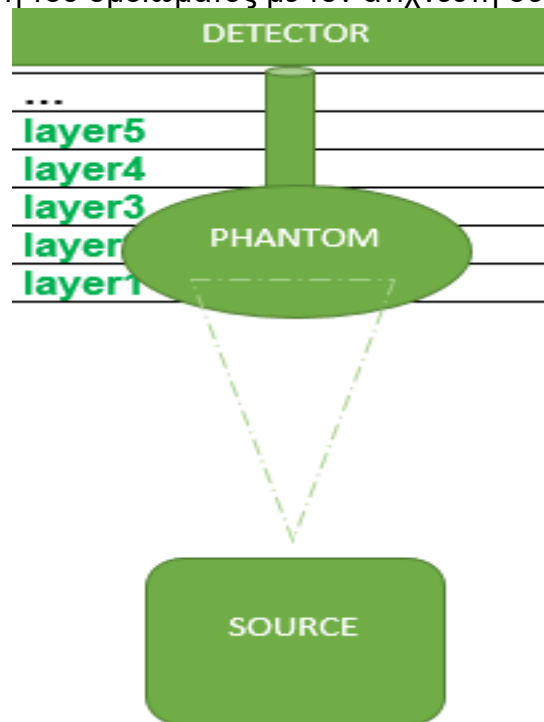
### 5.1 Σκοπός της μελέτης

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί η σκεδαζόμενη ακτινοβολία σε απεικονιστικά συστήματα τα οποία αποτελούνται από ανιχνευτικές διατάξεις ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

Γνωρίζοντας ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία προκαλεί ασάφεια στην ιατρική απεικόνιση, χρησιμοποιείται το αντιδιαχυτικό διάφραγμα, το οποίο απορροφά ένα μέρος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, με ταυτόχρονη αύξηση της δόσης του εξεταζόμενου

Η γνώση της κατανομής της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μετέπειτα διόρθωση της ασάφειας στην εικόνα με μεθόδους επεξεργασίας εικόνας.

Για να μελετήσουμε τα παραπάνω ακολουθήσαμε μια σειρά εξομοιώσεων, με διάφορες ενέργειες των τάξεων keV και MeV, διαφοροποιώντας σε κάθε εξομοίωση τις θέσεις – βήματα, με σκοπό την εύρεση κατανομής της ενέργειας. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια αναπαράσταση της πηγής, του ομοιώματος και του ανιχνευτή, χωρίζοντας την απόσταση του ομοιώματος με τον ανιχνευτή σε στρώματα.



Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση της πηγής, του ομοιώματος και του ανιχνευτή.

Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά υλικά ως ανιχνευτές: το άμορφο σελήνιο (a-Se), το οξυσουλφίδιο του γαδολινίου ( $Gd_2O_2S$  ή GOS) και το ιωδιούχο καίσιο (CsI). Οι προσομοιώσεις και στα τρία υλικά έγιναν με ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους, με βλέψη τις διαφοροποιήσεις της κατανομής της ενέργειας.

Εν συνεχεία, επισυνάπτεται ο πίνακας των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή του κώδικα PENELOPE.

Πίνακας 1 : Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη

20 keV

Steps	Layer	Layers Phantom	Layers Detector
26	5μm	20	6

40 keV

Steps	Layer	Layers Phantom	Layers Detector
26	5μm	20	6

60 keV

Steps	Layer	Layers Phantom	Layers Detector
60	5μm	20	40

80 keV

Steps	Layer	Layers Phantom	Layers Detector
60	5μm	20	40

100 keV

Steps	Layer	Layers Phantom	Layers Detector
60	5μm	20	40

140 keV

Steps	Layer	Layers Phantom	Layers Detector
60	5μm	20	40
80	5μm	20	60

500 keV

Steps	Layer	Layers Phantom	Layers Detector
31	1cm	30	1
41	1cm	40	1

1MeV

Steps	Layer	Layers Phantom	Layers Detector
31	1cm	30	1
41	1cm	40	1

2 MeV

Steps	Layer	Layers Phantom	Layers Detector
31	1cm	30	1
41	1cm	40	1

6 MeV

Steps	Layer	Layers Phantom	Layers Detector
32	1cm	30	2
42	1cm	40	2

Προσομοιώνοντας τις παραπάνω παραμέτρους, μελετήθηκαν τα αποτελέσματα τους, τα οποία θα αναλυθούν στον επόμενο κεφάλαιο. Παρακάτω θα γίνει μια παρουσίαση μερικών αρχείων \*.geo , \*.in και \*.out.

Το υλικό ιωδιούχο καίσιο (Csl) στην ενέργεια των 60KV με πάχος ομοιώματος 10cm και πάχος ανιχνευτή 0,02 cm, θα μελετηθεί ως προς την κατανομή της ενέργειας ανά 60 βήματα (steps). Παρόλο που η προσομοίωση συμπεριέλαβε όλο το ομοίωμα στη μελέτη περιοριστήκαμε στα 20 τελευταία στρώματα (layers) του ομοιώματος και τα υπόλοιπα 40 στρώματα (layers) του ανιχνευτή. Το πάχος του κάθε στρώματος είναι 5μm. Στην συνέχεια, θα γίνει εισαγωγή του αντίστοιχου αρχείου \*.geo :

Προσομοιώνοντας τις παραπάνω παραμέτρους, μελετήθηκαν τα αποτελέσματα τους, τα οποία θα αναλυθούν στον επόμενο κεφάλαιο. Παρακάτω θα γίνει μια παρουσίαση μερικών αρχείων \*.geo , \*.in και \*.out.

Το υλικό ιωδιούχο καίσιο (Csl) στην ενέργεια των 60KV με πάχος ομοιώματος 10cm και πάχος ανιχνευτή 0,02 cm, θα μελετηθεί ως προς την κατανομή της ενέργειας ανά 60 βήματα (steps). Παρόλο που η προσομοίωση συμπεριέλαβε όλο το ομοίωμα στη μελέτη περιοριστήκαμε στα 20 τελευταία στρώματα (layers) του ομοιώματος και τα υπόλοιπα 40 στρώματα (layers) του ανιχνευτή. Το πάχος του κάθε στρώματος είναι 5μm. Στην συνέχεια, θα γίνει εισαγωγή του αντίστοιχου αρχείου \*.geo :









```

File Edit Options Template Execute Macro Window Help
# INSTRUCTIONS FOR SECTION PENELOPE
#
# * Write one line of data per defined material. Each line starts with
# the material index (MAT#), which should be an integer starting from 1.
# Set MAT# to zero in the last line to denote the end of the list.
#
# * Use 20 characters at most to introduce the material data file name.
# Blanks or special characters are not allowed in file names. Thus,
# instead of "stainless steel.mat" use "stainlessSteel.mat".
#
# * If, for a certain material, the transport parameters after the file
# name are left empty, then they are set automatically as follows:
# - Eabs for charged particles are set to 1% of the
#   initial source energy (E), with the limiting values of 50 eV
#   (min) and 1 MeV (max).
# - Eabs for photons is set to 0.1% E with the limiting values of 50
#   eV and 1 MeV.
# - C1 and C2 are both set to 0.1.
# - WCC is set to min(Eabs(e-),1% E)
# - WCR is set to min(Eabs(phot),0.1% E).
# - DSMAX is set to infinity.
#
# * Do not remove the line containing the table header "MAT# FILE...".
[SECTION PENELOPE v.2009-10-01]
MAT# FILE____(max 20 char) EABS(e-) EABS(ph) EABS(e+) C1 C2 WCC WCR DSMAX COMMENTS
1 water.mat 0.6e3 0.06e3 0.6e3 0.1 0.1 0.6e3 0.06e3 1.0e30 scatterer
2 csi.mat 0.6e3 0.06e3 0.6e3 0.1 0.1 0.6e3 0.06e3 1.0e30 detector
0 (SET MAT=0 TO END LIST)
[END OF PEN SECTION]

```

Εικόνα 21: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV.

```

File Edit Options Template Execute Macro Window Help
# INSTRUCTIONS FOR THE TALLY SECTIONS
#
# * Details on the features and configuration of each tally are provided
# with their documentation (see ~/documentation/*.txt).
#
# * The required RELATIVE UNCERTAINTY that is specified for each tally
# (except for those that do not have an associated uncertainty, e.g. a
# phase-space file) is used as a condition to stop the simulation. Only
# when the requested relative uncertainties of *all* the tallies have
# been attained the uncertainty condition is considered fulfilled.
# Recall that the simulation can also be halted because the allotted
# time or the number of histories requested have been reached. Setting
# the RELATIVE UNCERTAINTY of all tallies to zero will prevent the
# execution from stopping for this cause.
#
# * Note for advanced users: when a certain tally scores nothing (i.e.
# zero) the corresponding REPORT routine reports 0% uncertainty but, at
# the same time, it reports that the requested uncertainty has not been
# reached, irrespective of the value introduced in the config file.
# This is to prevent the simulation from being stopped by a deceptive
# impression of accuracy in highly inefficient simulations, where the
# score and its standard deviation after a short period of time can be
# null.
[SECTION TALLY VOXEL DOSE v.2014-12-27]
OFF STATUS (ON or OFF)
0 0 ROI MIN,MAX X-INDEX (0 0 FOR ALL VOXELS)
0 0 ROI MIN,MAX Y-INDEX (0 0 FOR ALL VOXELS)
0 0 ROI MIN,MAX Z-INDEX (0 0 FOR ALL VOXELS)
0 PRINT VOXELS MASS IN REPORT (1=YES,0=NO)
1 PRINT COORDINATES IN REPORT (1=YES,0=NO,-1=NO&BINARYFORMAT)
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF UDD SECTION]

```

Εικόνα 22: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV.



```

File Edit Options Template Execute Macro Window Help
[SECTION TALLY SPATIAL DOSE DISTRIB v.2009-06-15]
ON STATUS (ON or OFF)
0.0 0.0 0.0 XMIN,XMAX(cm),NXBIN (0 FOR DX=infty)
0.0 0.0 0.0 YMIN,YMAX(cm),NYBIN (0 FOR DY=infty)
9.99 10.02 60 ZMIN,ZMAX(cm),NZBIN (0 FOR DZ=infty)
1 PRINT COORDINATES IN REPORT (1=YES,0=NO,-1=NO&BINARYFORMAT)
1.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF SDD SECTION]

[SECTION TALLY CYLINDRICAL DOSE DISTRIB v.2009-06-15]
ON STATUS (ON or OFF)
0.0 5.0 50 RMIN,RMAX(cm),NRBIN (>0)
9.99 10.02 60 ZMIN,ZMAX(cm),NZBIN (0 FOR DZ=infty)
1 PRINT COORDINATES IN REPORT (1=YES,0=NO)
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF CDD SECTION]

[SECTION TALLY SPHERICAL DOSE DISTRIB v.2009-06-15]
OFF STATUS (ON or OFF)
0.0 1.0 50 RMIN,RMAX(cm),NRBIN (>0)
1 PRINT COORDINATES IN REPORT (1=YES,0=NO)
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF SPD SECTION]

[SECTION TALLY ENERGY DEPOSITION v.2012-06-01]
OFF STATUS (ON or OFF)
2 DETECTION MATERIAL
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF EDP SECTION]

[SECTION TALLY PULSE HEIGHT SPECTRUM v.2012-06-01]
OFF STATUS (ON or OFF)
1 DETECTION MATERIAL
0.0 10.0e6 100 EMIN,EMAX(eV), No. OF E BINS
0.0 0.0 A(eV^2),B(eV) FOR GAUSSIAN CONVOLUTION FWHM[eV]=sqrt(A+B*E[eV])
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF PHS SECTION]

```

Εικόνα 23: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV.

```

File Edit Options Template Execute Macro Window Help
[SECTION TALLY PIXELATED IMAGING DETECTOR v.2015-02-06]
OFF STATUS (ON or OFF)
1 DETECTION MATERIAL
0 FILTER PHOTON INTERACTION (0=NOFILTER, -1=UNSCATTERED, 1=RAYLEIGH, 2=COMPTON, 3=SECONDARIES, 9=MULTISCATTERED)
0 100 X-PIXEL SIZE(cm), No. X-PIXELS (ENTER 0 IN EITHER FIELD FOR AUTO)
0 100 Y-PIXEL SIZE(cm), No. Y-PIXELS (ENTER 0 IN EITHER FIELD FOR AUTO)
1 DETECTION MODE (1=ENERGY INTEGRATING, 2=PHOTON COUNTING, 3=PHOTON ENERGY DISCRIMINATING aka SPECTRUM)
1.0e3 ENERGY DEPOSITION THRESHOLD (eV) FOR MODE=2 (IGNORED FOR OTHER MODES)
0.0 1.0e9 100 EMIN,EMAX(eV), No. OF E BINS FOR MODE=3 (IGNORED FOR OTHER MODES)
0.0 0.0 A(eV^2),B(eV) FOR A GAUSSIAN WITH FWHM[eV]=sqrt(A+B*E[eV])
1 REPORT FORMAT (1=COLUMNAR, 2=MATRIX, 3=BINARY)
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF PID SECTION]

[SECTION TALLY FLUENCE TRACK LENGTH v.2012-06-01]
OFF STATUS (ON or OFF)
1 DETECTION MATERIAL
1.0e2 1.0e9 70 LOG EMIN,EMAX(eV), No. OF E BINS, APPEND 'LOG' FOR A LOG SCALE
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF FTL SECTION]

[SECTION TALLY PHASE SPACE FILE v.2009-06-15]
OFF STATUS (ON or OFF)
0 PSF FORMAT (0=STANDARD penEasy ASCII, 1=IAEA BINARY)
1 DETECTION MATERIAL (MUST BE A PERFECT ABSORBENT, EABS=infty)
output.psf PSF FILENAME, REMOVE EXTENSION IF FORMAT=1
[END OF PSF SECTION]

[SECTION TALLY PARTICLE CURRENT SPECTRUM v.2009-06-15]
OFF STATUS (ON or OFF)
1 DETECTION MATERIAL
0.0 1.0e9 100 EMIN,EMAX(eV), No. OF E BINS
0.0 RELATIVE UNCERTAINTY (%) REQUESTED
[END OF PCS SECTION]

[SECTION TALLY PARTICLE TRACK STRUCTURE v.2009-06-15]
OFF STATUS (ON or OFF)
100 NUMBER OF HISTORIES TO DISPLAY (*100 RECOMMENDED)
[END OF PTS SECTION]

```

Εικόνα 24: Δομή αρχείου Peneasy.in για την προσομοίωση της ενέργειας 60KV.







```
File Edit Options Template Execute Macro Window Help
begins at the first line of zeroes.)
#####
SURFACE ( 1) REDUCED FORM
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
#####
SURFACE ( 2) REDUCED FORM
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 1.00000000000000E+01, 0)
#####
SURFACE ( 3) REDUCED FORM
INDICES=( 0, 0, 0, 1, 0)
Z-SHIFT=( 1.00200000000000E+01, 0)
#####
BODY ( 1) SCATTERER
MATERIAL( 1)
SURFACE ( 1), SIDE POINTER=( 1)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=(-1)
#####
BODY ( 2) DETECTOR
MATERIAL( 2)
SURFACE ( 2), SIDE POINTER=( 1)
SURFACE ( 3), SIDE POINTER=(-1)
#####
END #####

*****
**** PENGEOM (version 2014) ****
**** Constructive Quadric Geometry ****
*****
```

Εικόνα 29 : Δομή αρχείου Peneasy.out.

```

***** Genealogical tree.

*** BODY = 1, KMOTH = 3, MAT = 1
KSURF = 1 2 4
KFLAG = 2 1 1

*** BODY = 2, KMOTH = 3, MAT = 2
KSURF = 2 3 4
KFLAG = 2 1 1

*** MODULE = 3, KMOTH = 0, MAT = 0
KDGHT = 1 2 3
KSURF = 4 1 2 3
KFLAG = 1 4 4 4

***** Adequacy of the geometry definition.

The largest number of bodies in a module or
bodies limiting a single body is ..... 3

The largest number of limiting surfaces for
a single body or module is ..... 4

The simulation of this geometry will be relatively fast,
no further optimization seems to be required.

***** The end.

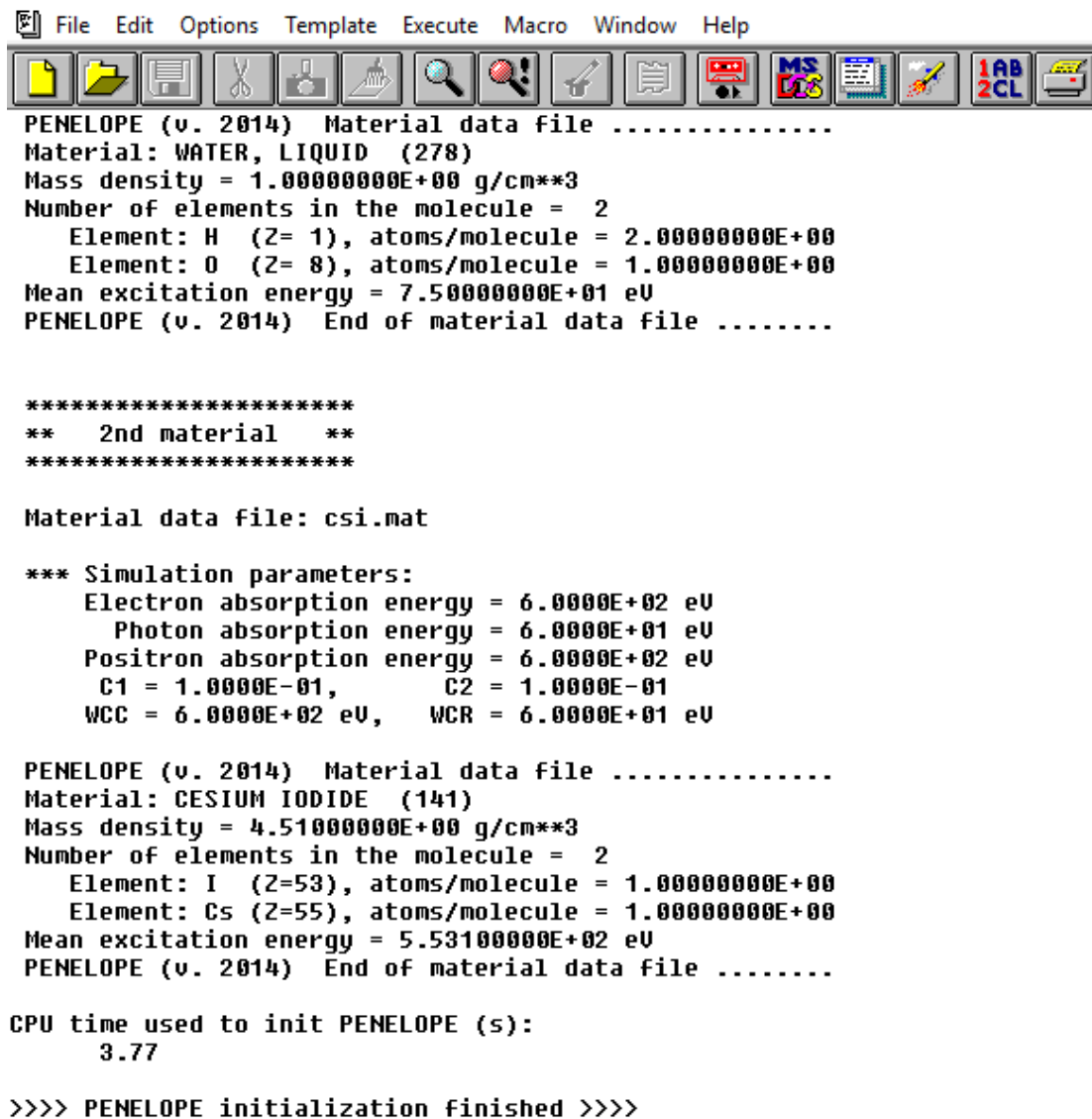
>>>> Quadric geometry initialization finished >>>>

No voxels geometry file defined.

No. of materials referenced in the geometry:
2
    
```

Εικόνα 30: Δομή αρχείου Peneasy.out.





```
PENELOPE (v. 2014) Material data file .....
Material: WATER, LIQUID (278)
Mass density = 1.00000000E+00 g/cm**3
Number of elements in the molecule = 2
  Element: H (Z= 1), atoms/molecule = 2.00000000E+00
  Element: O (Z= 8), atoms/molecule = 1.00000000E+00
Mean excitation energy = 7.50000000E+01 eV
PENELOPE (v. 2014) End of material data file .....

*****
** 2nd material **
*****

Material data file: csi.mat

*** Simulation parameters:
  Electron absorption energy = 6.0000E+02 eV
  Photon absorption energy = 6.0000E+01 eV
  Positron absorption energy = 6.0000E+02 eV
  C1 = 1.0000E-01,      C2 = 1.0000E-01
  WCC = 6.0000E+02 eV,  WCR = 6.0000E+01 eV

PENELOPE (v. 2014) Material data file .....
Material: CESIUM IODIDE (141)
Mass density = 4.51000000E+00 g/cm**3
Number of elements in the molecule = 2
  Element: I (Z=53), atoms/molecule = 1.00000000E+00
  Element: Cs (Z=55), atoms/molecule = 1.00000000E+00
Mean excitation energy = 5.53100000E+02 eV
PENELOPE (v. 2014) End of material data file .....

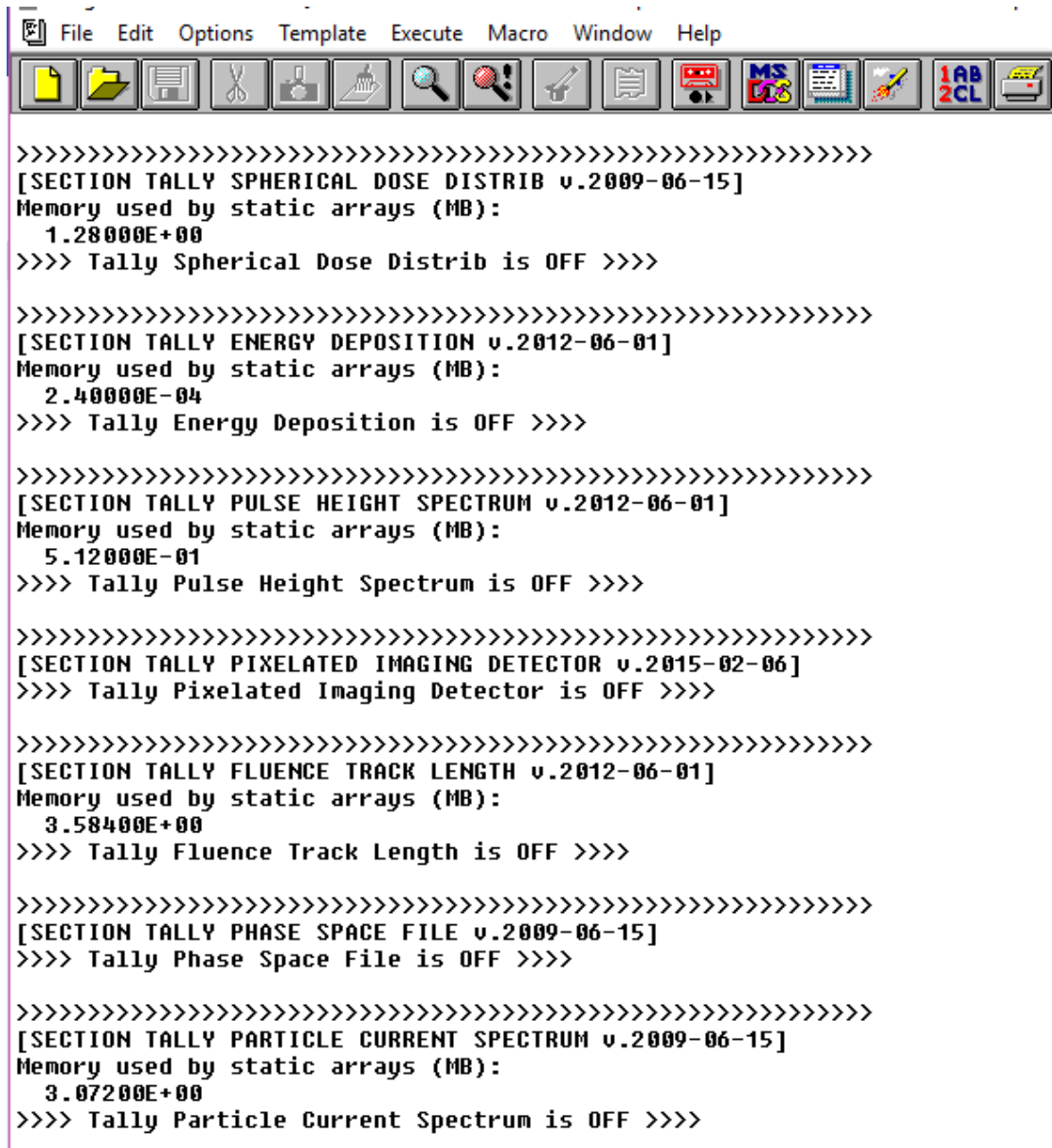
CPU time used to init PENELOPE (s):
  3.77

>>>> PENELOPE initialization finished >>>>
```

Εικόνα 32 : Δομή αρχείου Peneasy.out.







Εικόνα 34: Δομή αρχείου Peneasy.out.

```

File Edit Options Template Execute Macro Window Help
[SECTION TALLY PARTICLE TRACK STRUCTURE v.2009-06-15]
>>> Tally Particle Track Structure is OFF >>>

[SECTION INTERACTION FORCING v.2009-06-15]
>>> Interaction Forcing is OFF >>>

[SECTION SPLITTING v.2015-05-30]
>>> Particle splitting is OFF >>>

[SECTION RUSSIAN ROULETTE v.2009-06-15]
>>> Russian roulette is OFF >>>

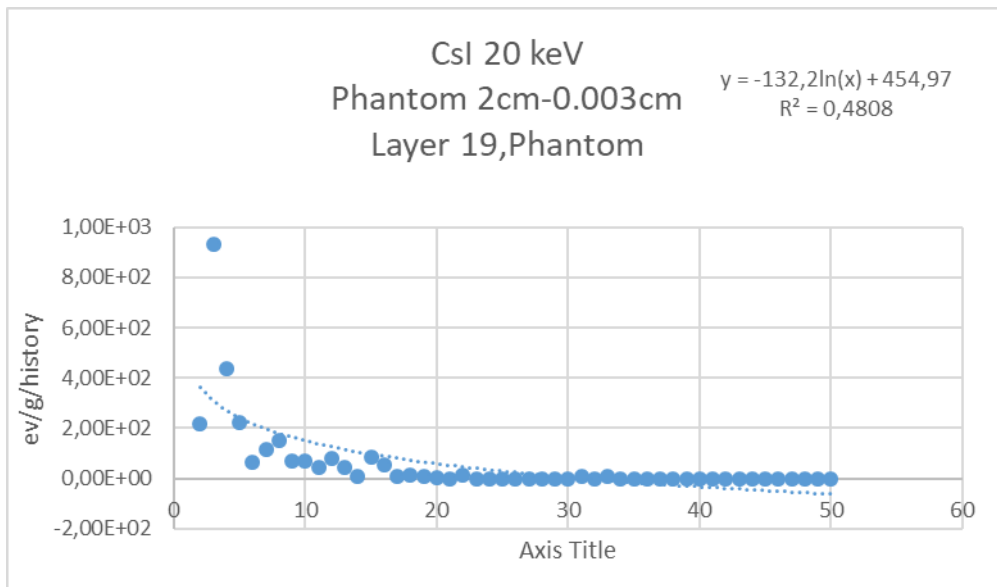
init: INITIALIZATION ENDED
Elapsed real time: 3.81 s
Elapsed CPU time : 3.80 s
Memory used by penEasy arrays: 1.5E+01 MB

report: SIMULATION ENDED
Results have been written to the corresponding DAT files.
The requested uncertainty has NOT been reached.

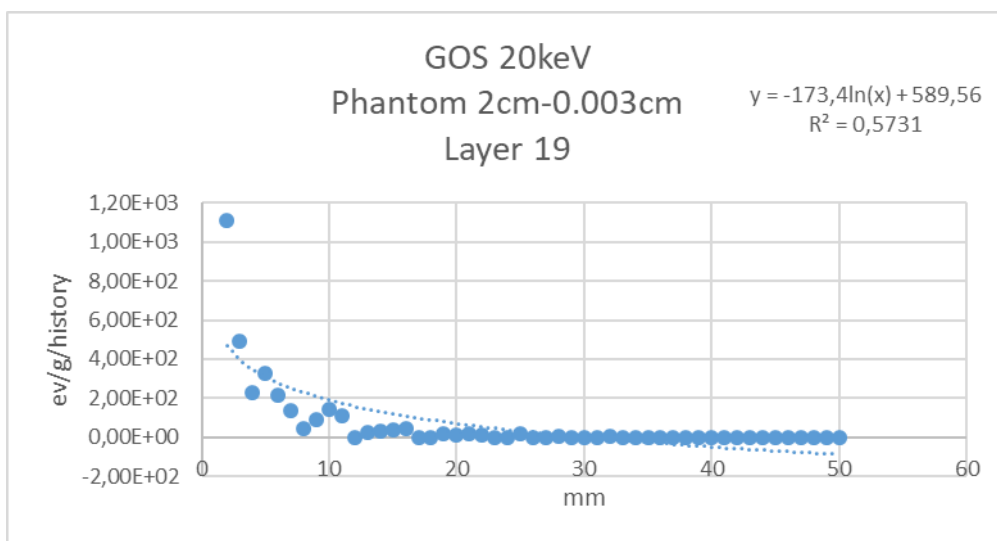
```

Εικόνα 35 : Δομή αρχείου Peneasy.out.

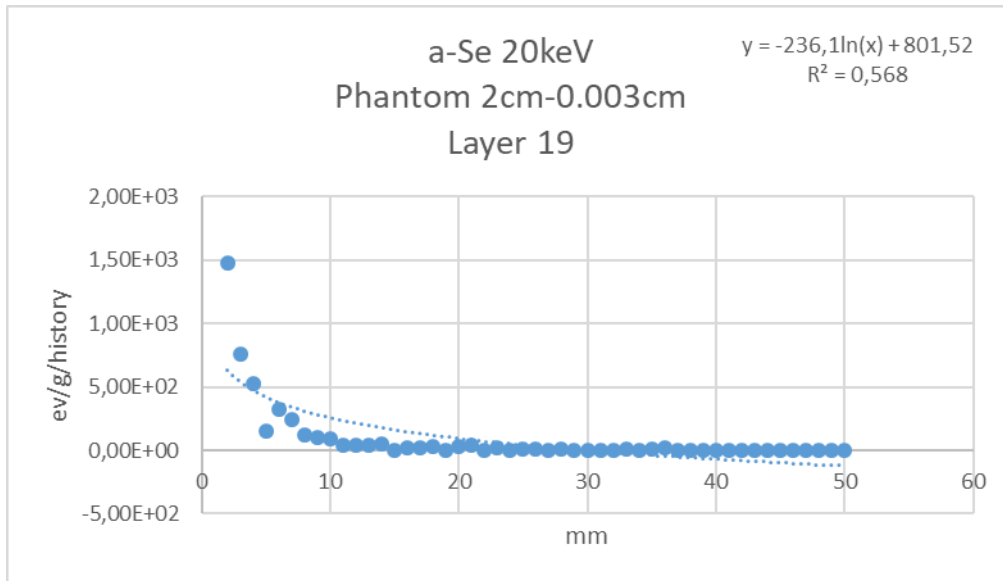




Εικόνα 37: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

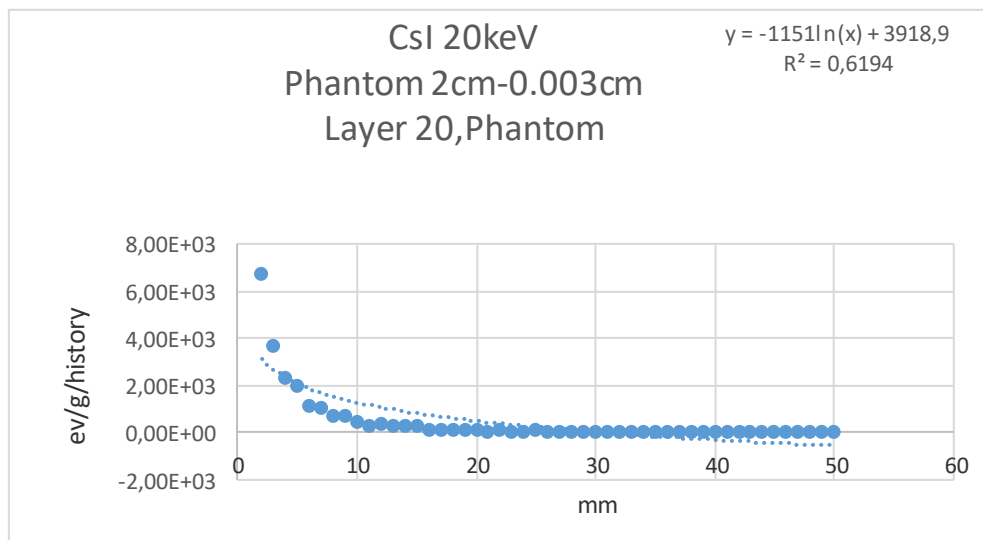


Εικόνα 38: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS .

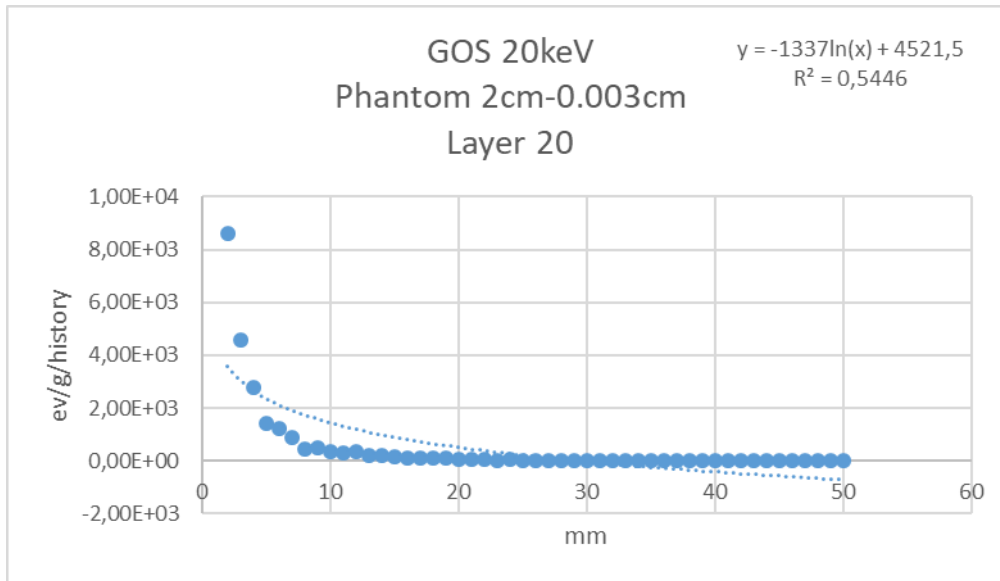


**Εικόνα 39: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό άμορφο σελήνιο (a-Se)**

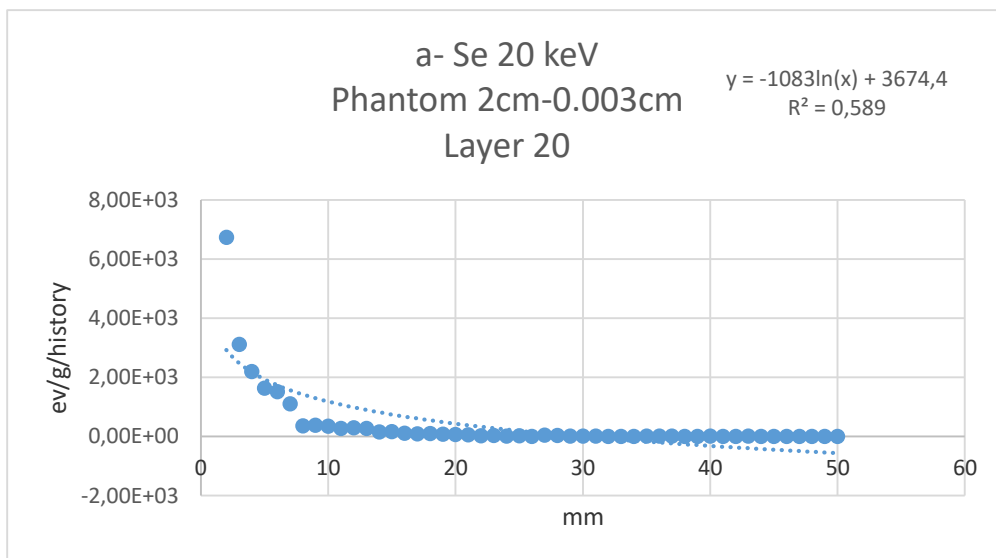
Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για το ομοίωμα με a-Se (προσδιορίζοντας το με βάση τη τιμή κοντά στο 0). Η σκεδαζόμενη πρακτικά μειώνεται σημαντικά μετά τα 10mm, δηλαδή την απόσταση από το σημείο πρόσπτωσης της δέσμης. Και στις τρεις περιπτώσεις, το  $R^2$  απέχει αρκετά από την μονάδα.



**Εικόνα 40: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.**

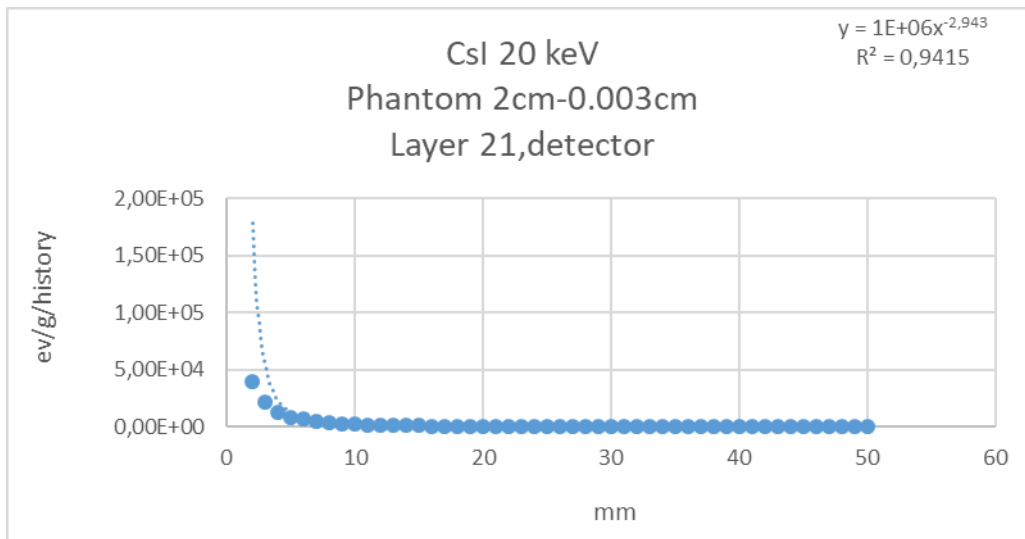


Εικόνα 41: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

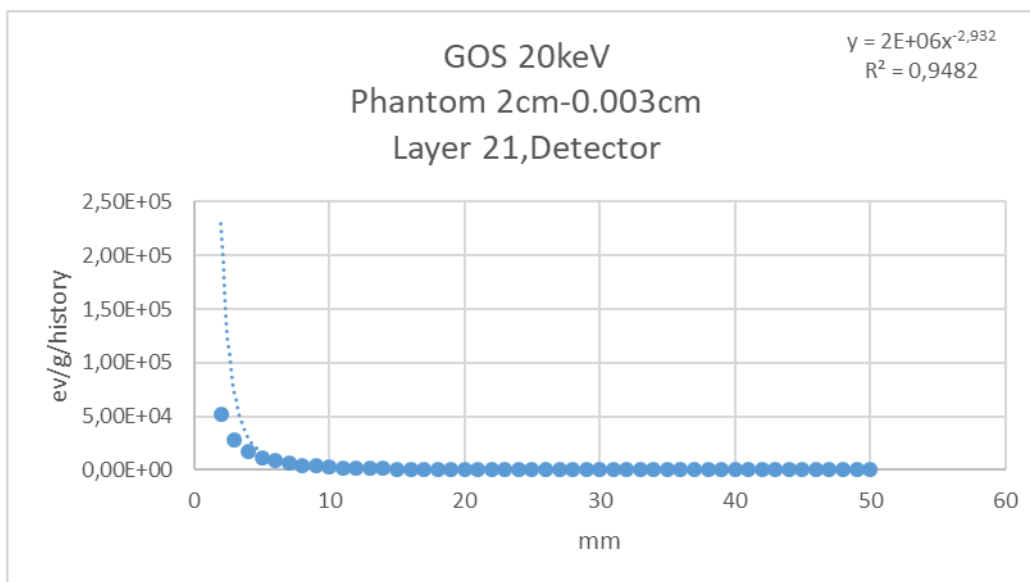


Εικόνα 42: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε ότι η κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο “μεταβατικό στάδιο” του ομοιώματος προς τον ανιχνευτή, έχει μεγαλύτερες τιμές για τον ομοίωμα με τον ανιχνευτή GOS. Επίσης μειώνεται αισθητά σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 10mm. Οι τιμές του  $R^2$  σε κάθε περίπτωση είναι μεταξύ 0.54 και 0.62.

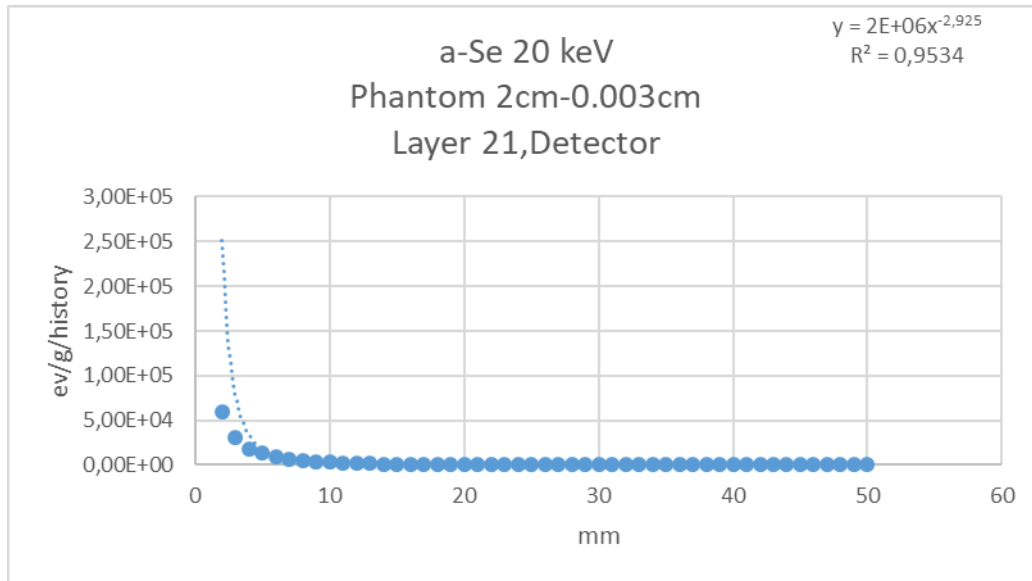


Εικόνα 43: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI .



Εικόνα 44: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS .

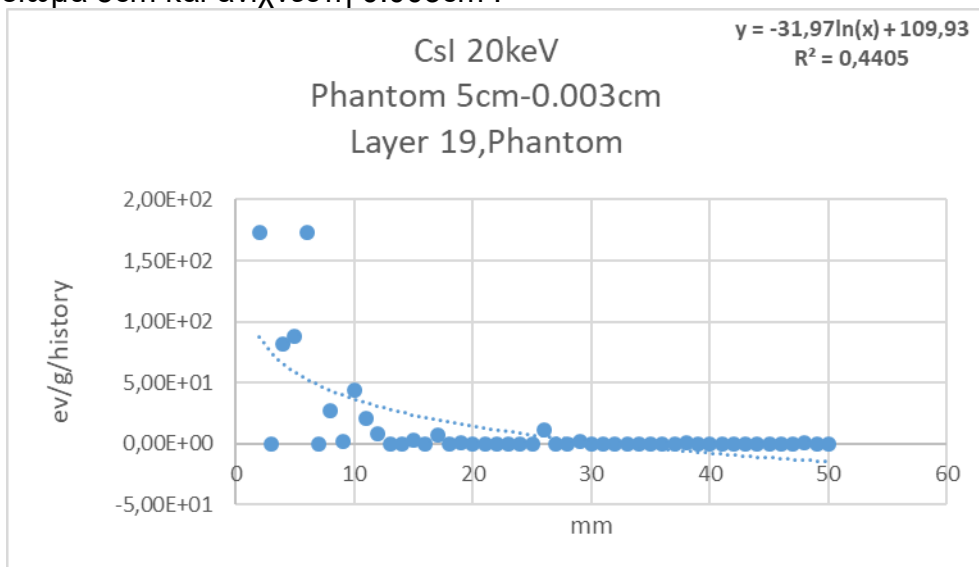




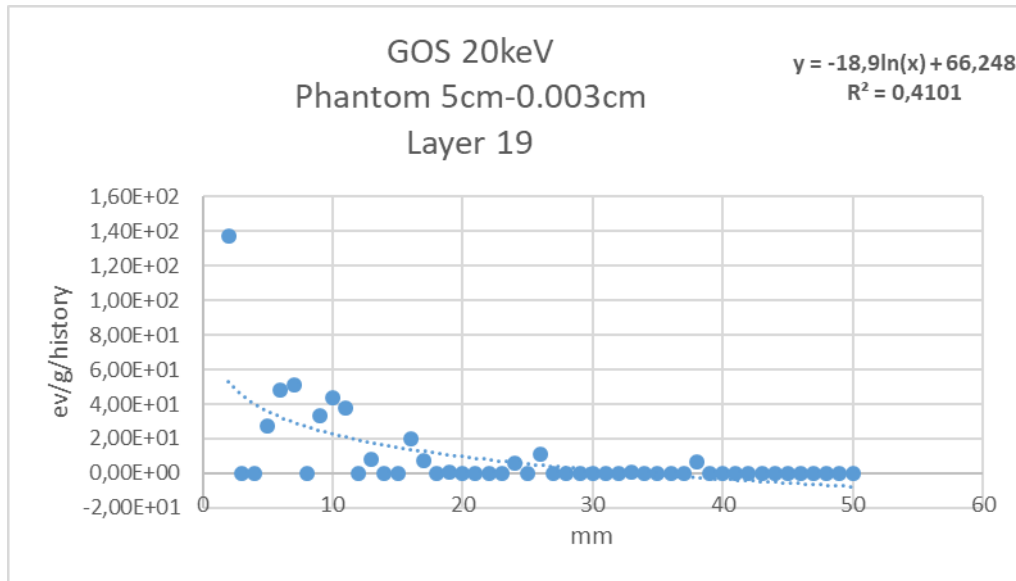
**Εικόνα 45: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό Selenium .**

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή είναι συγκρίσιμη και για τους τρεις ανιχνευτές. Μια ενδεικτική τιμή κοντά στη θέση 0 είναι  $5 \times 10^4$  eV/g/history. Αυτό είναι πιθανόν λόγω του αυξημένης απορρόφησης της ακτινοβολίας στα 20 keV, όπου επικρατεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Για τις συγκεκριμένες συνθήκες η κατανομή της σκεδαζόμενης μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά ( $R^2 > 0.94$  για κάθε περίπτωση).

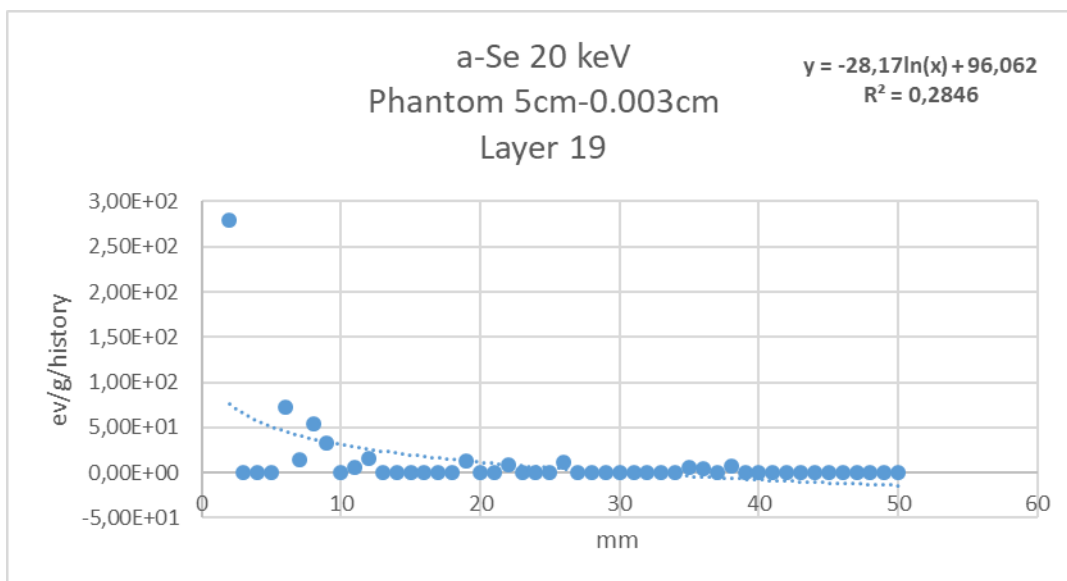
- Ομοίωμα 5cm και ανιχνευτή 0.003cm :



**Εικόνα 46: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.**

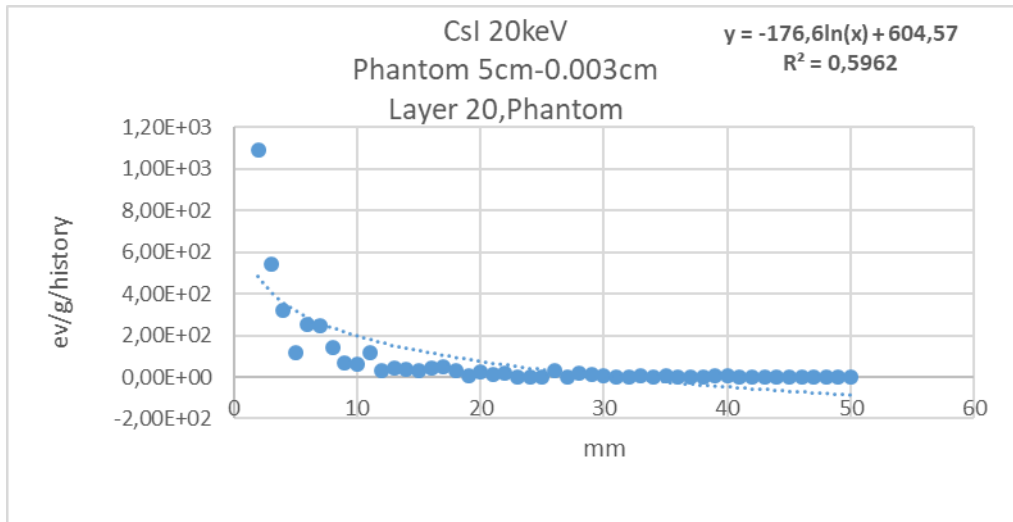


Εικόνα 47: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

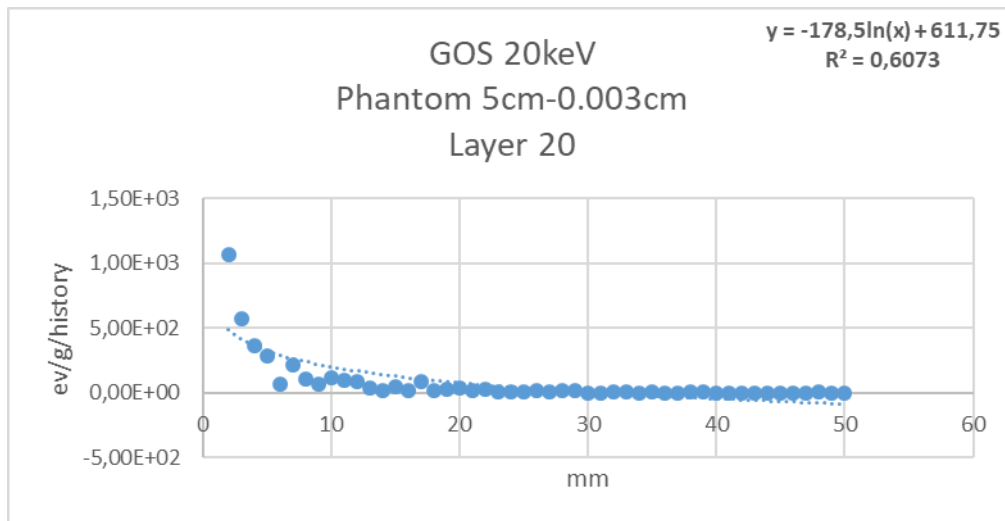


Εικόνα 48: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

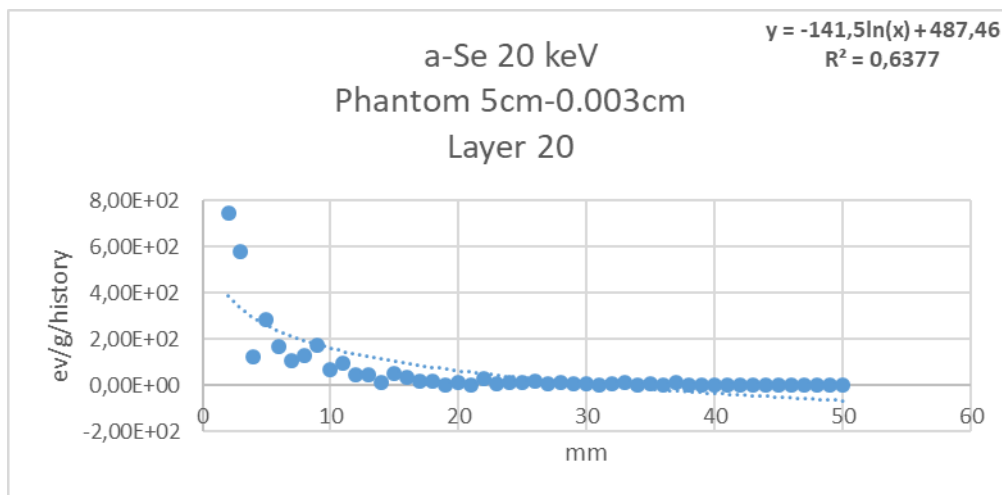
Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για το ομοίωμα με CsI (προσδιορίζοντας το με βάση τη τιμή η οποία είναι πιο κοντά στο 0). Η σκεδαζόμενη αρχίζει να μειώνεται σημαντικά μετά τα 10mm. Και στις τρεις περιπτώσεις ,το  $R^2$  απέχει αρκετά από την μονάδα.



Εικόνα 49: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

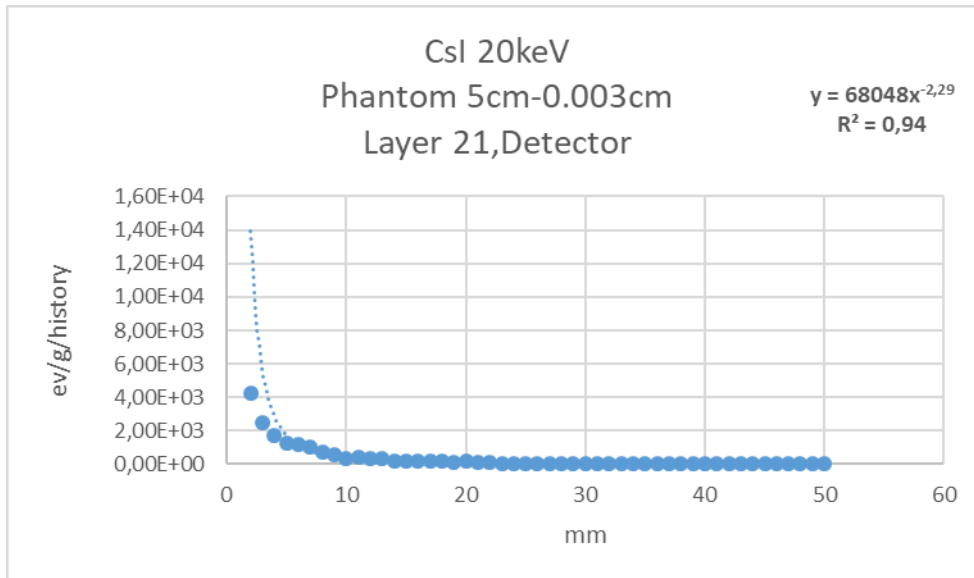


Εικόνα 50: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

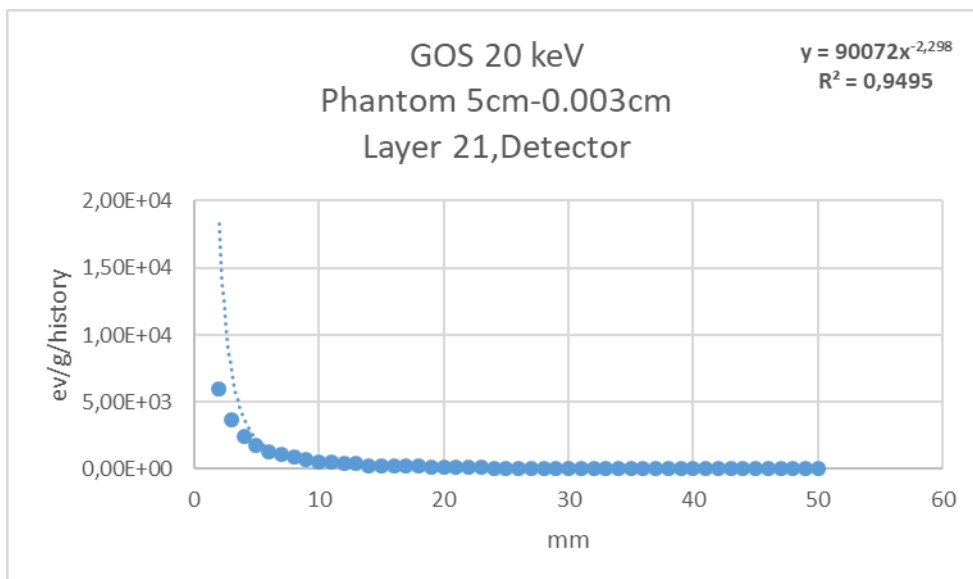


Εικόνα 51: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

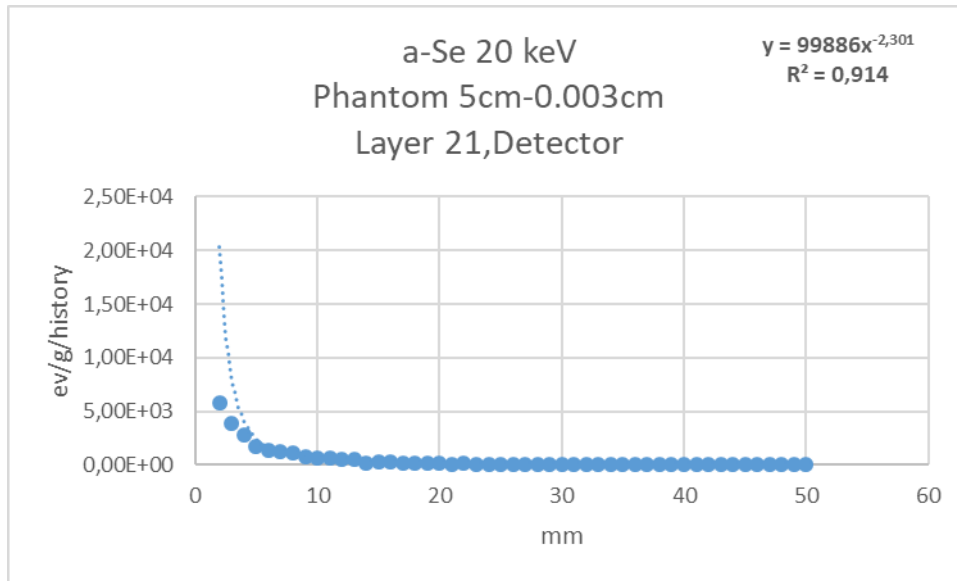
Στις παραπάνω προσομοιώσεις παρατηρούμε ότι η προσομοίωση με το υλικό GOS έχει μεγαλύτερες τιμές. Το στάδιο αυτό όπως έχουμε προ αναφέρει είναι το "μεταβατικό στάδιο" του ομοιώματος προς τον ανιχνευτή. Οι τιμές του  $R^2$  απέχουν αρκετά από την μονάδα.



Εικόνα 52: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CSI.



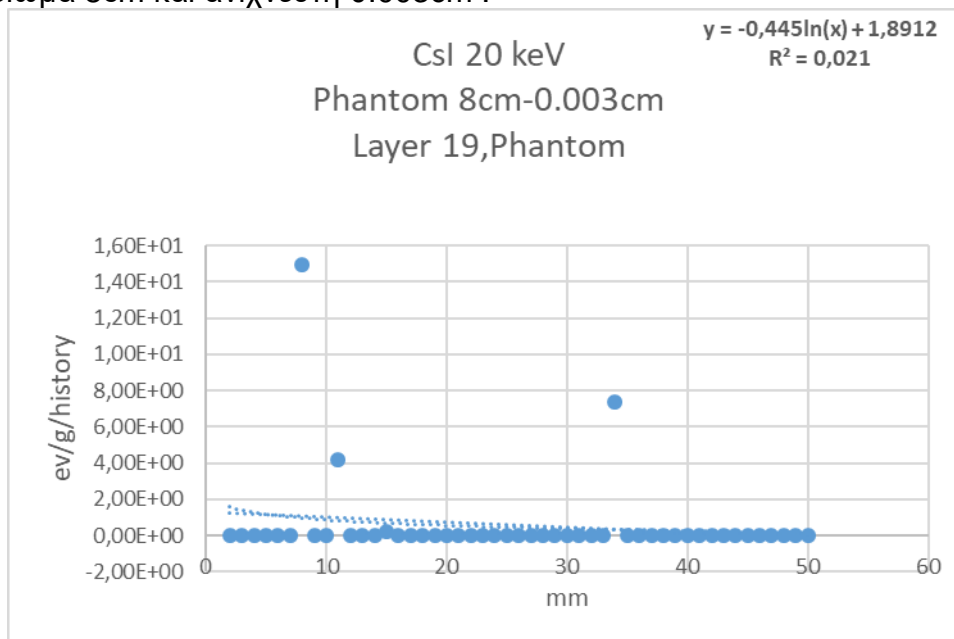
Εικόνα 53: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



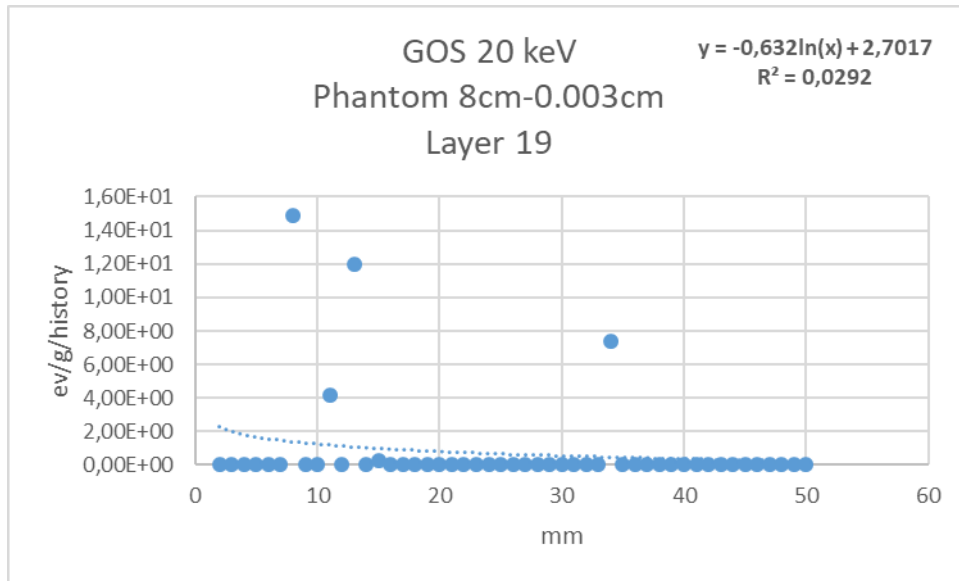
**Εικόνα 54:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Συμπεραίνοντας από τα παραπάνω γραφήματα, η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή είναι συγκρίσιμη για όλους τους ανιχνευτές. Οι τιμές κοντά στην θέση 0 κυμαίνονται  $10 \times 10^3$ . Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι το  $R^2$  προσομοιώνεται ικανοποιητικά ( $R^2 > 0,91$ ) σε όλες τις περιπτώσεις.

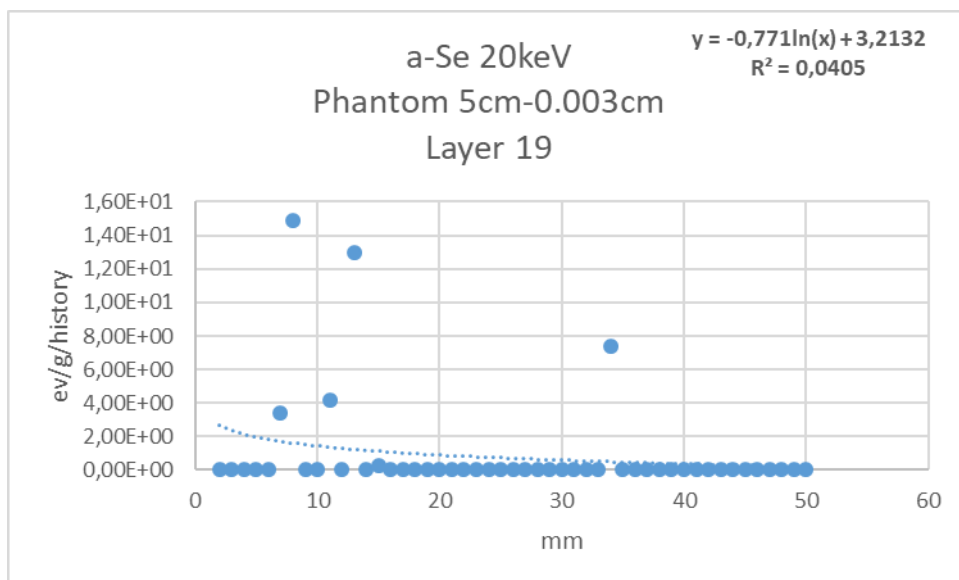
- Ομοίωμα 8cm και ανιχνευτή 0.003cm :



**Εικόνα 55:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

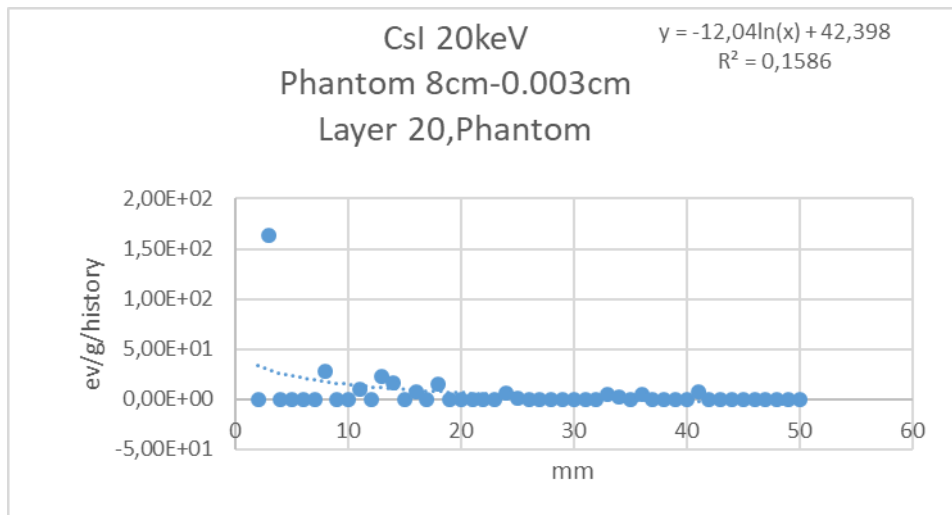


Εικόνα 56: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

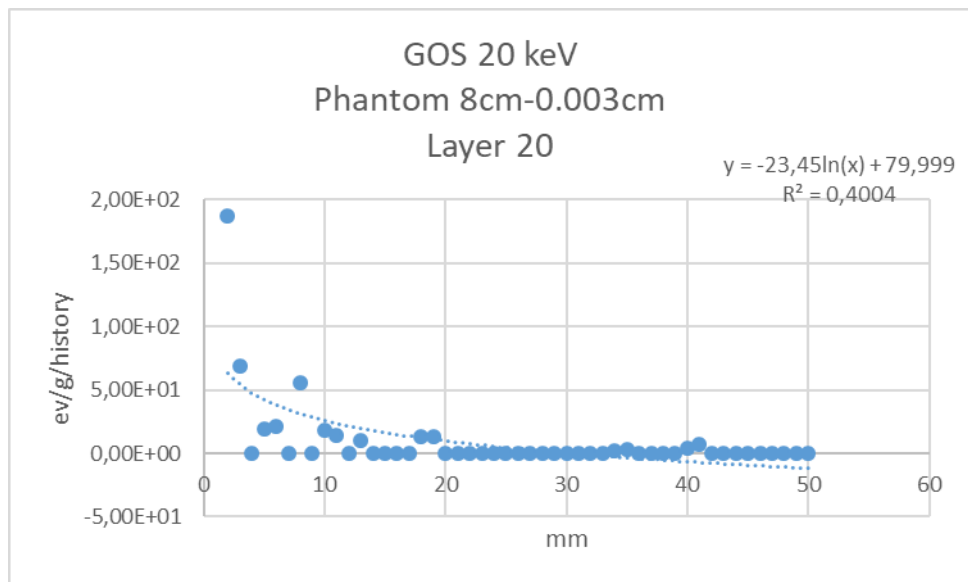


Εικόνα 57: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

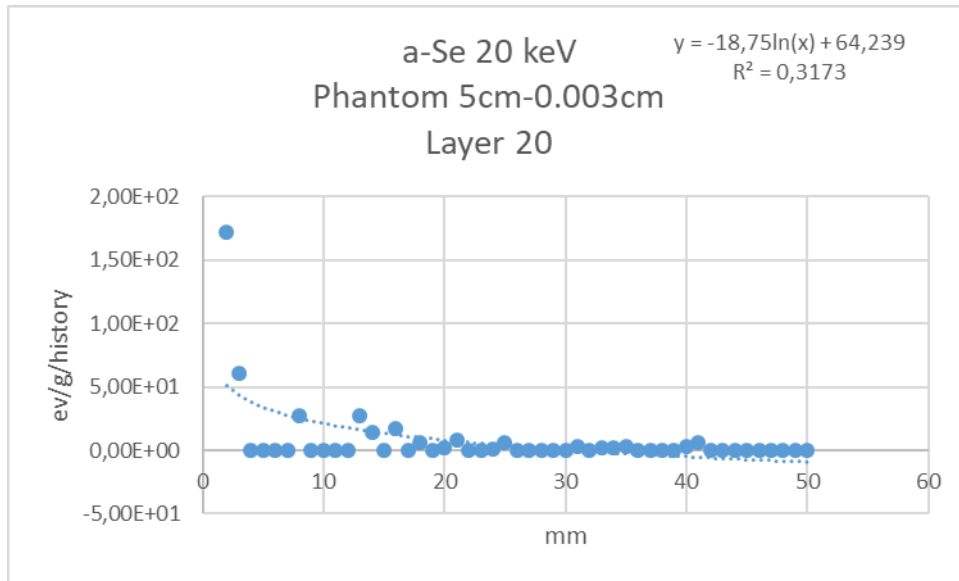
Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα βλέπουμε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία στο υλικό a-Se παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία αρχίζει να μειώνεται λίγο πριν τα 10 mm. Το  $R^2$  απέχει και στις τρεις περιπτώσεις αρκετά από την μονάδα.



Εικόνα 58: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

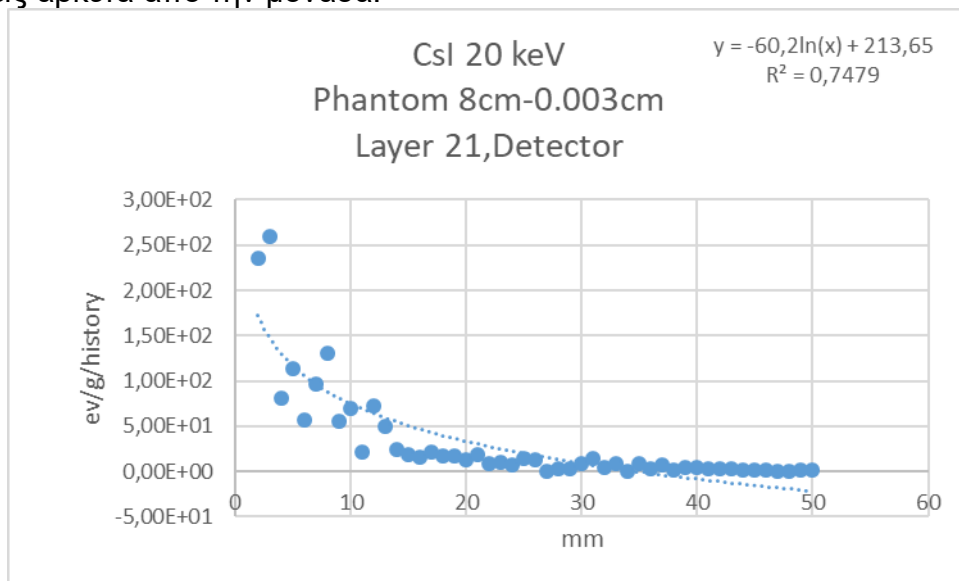


Εικόνα 59: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



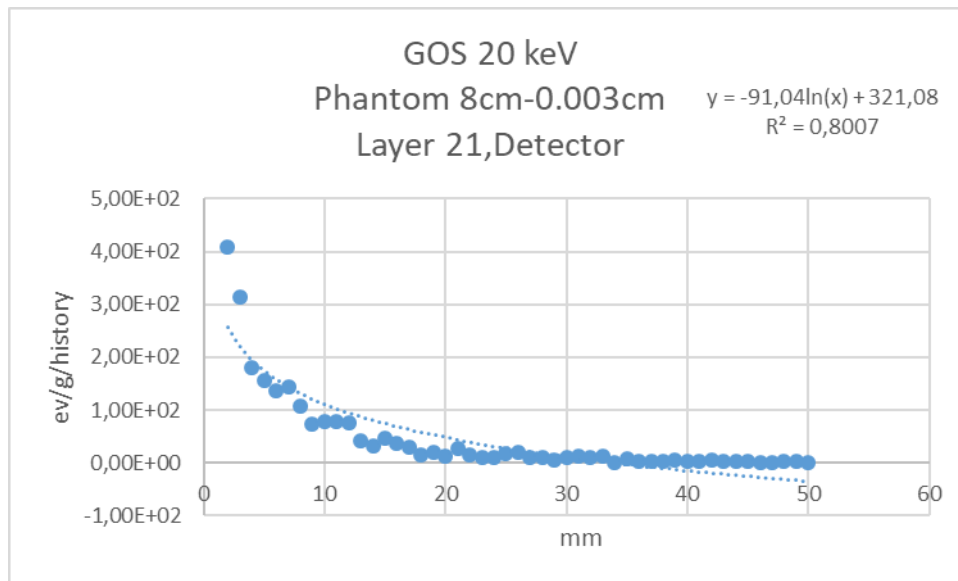
Εικόνα 60: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Στο στάδιο αυτό παρατηρείται ότι η κατανομή της ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας έχει μεγαλύτερες τιμές στο υλικό GOS. Το  $R^2$  απέχει και στις τρεις περιπτώσεις αρκετά από την μονάδα.

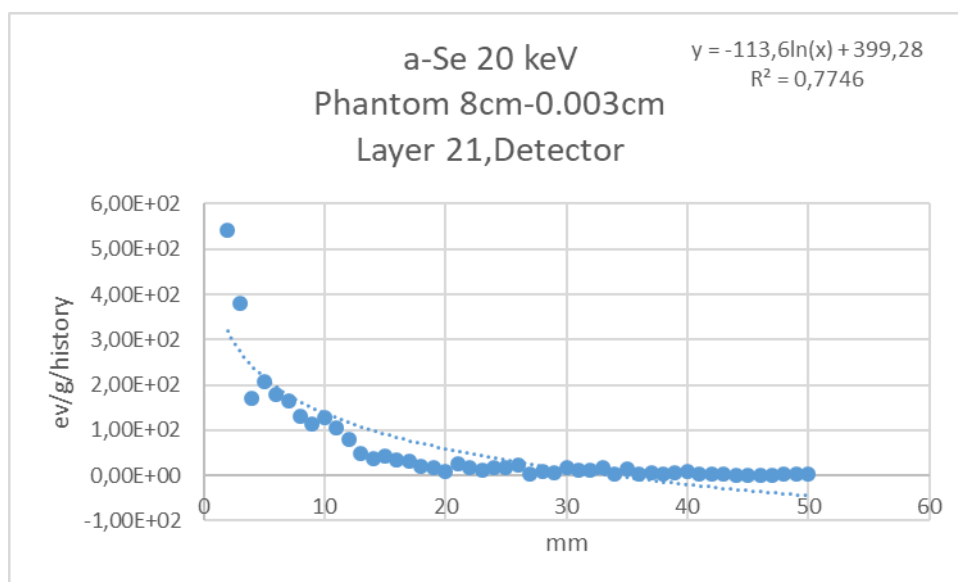


Εικόνα 61: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.





**Εικόνα 62:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

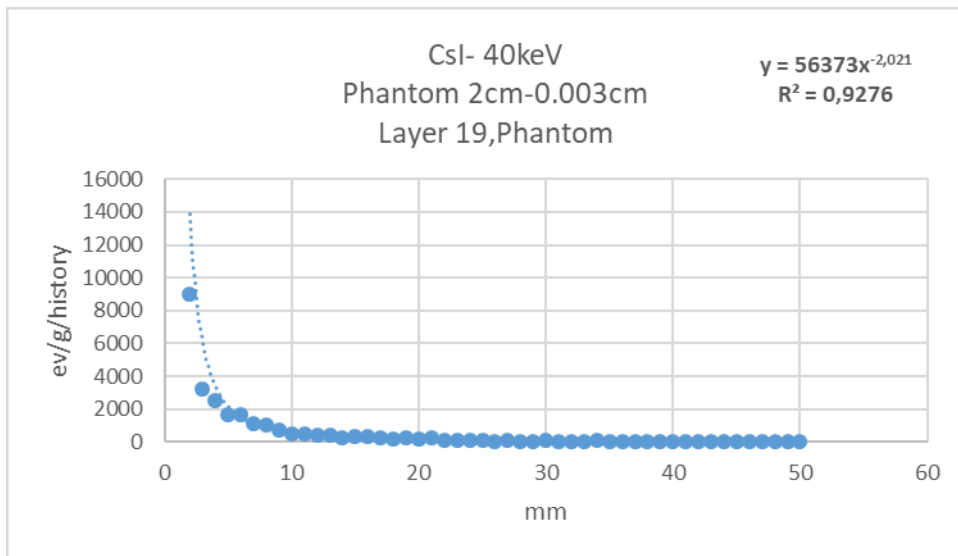


**Εικόνα 63:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

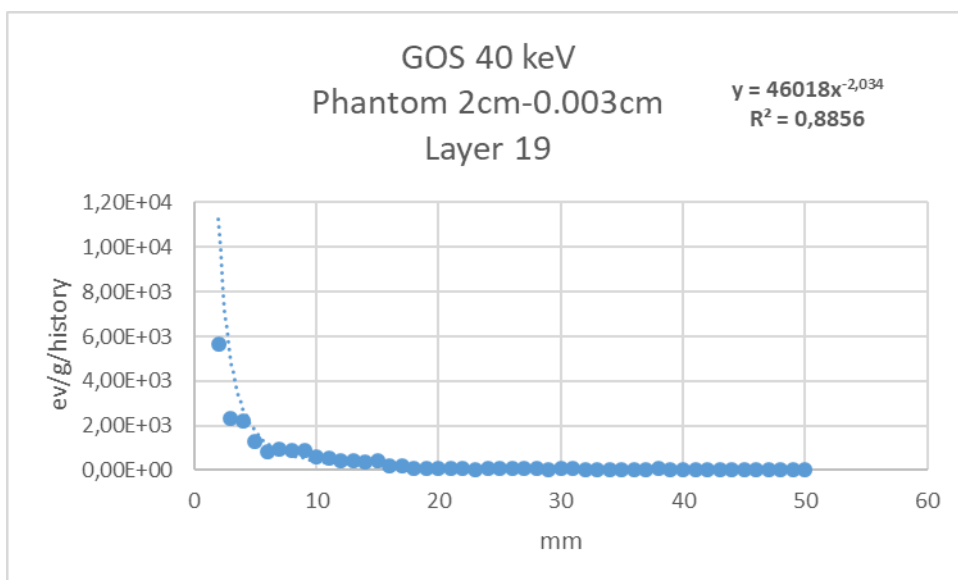
Μελετώντας τα τελευταία τρία γραφήματα παρατηρούμε η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στον ανιχνευτή, έχει μεγαλύτερες τιμές το υλικό a-Se . Το  $R^2$  και στις τρεις περιπτώσεις κυμαίνεται μεταξύ 0,74 έως 0,80.

Ολοκληρώνοντας τις προσομοιώσεις για την ενέργεια 40 keV τα αποτελέσματα και για τρία υλικά είναι :

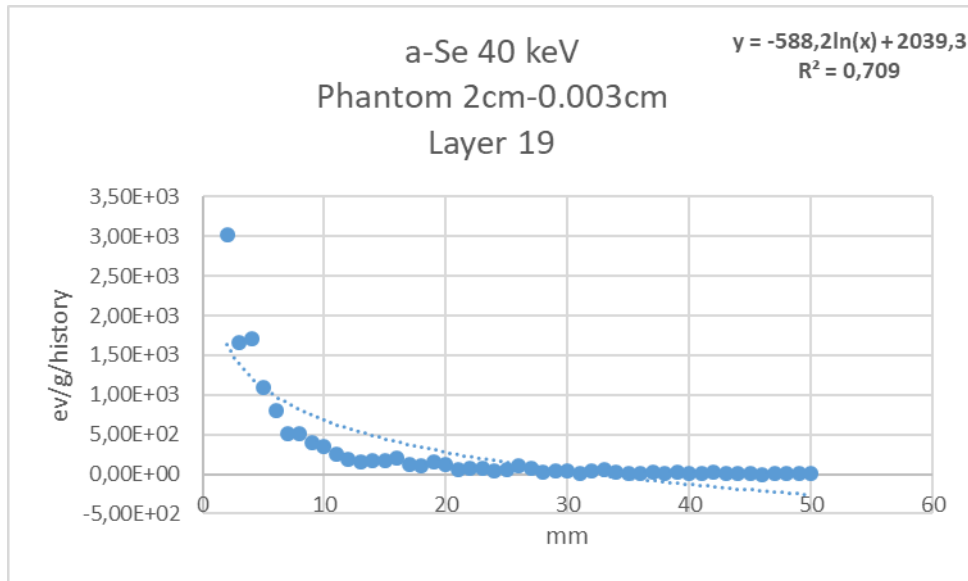
- Ομοίωμα 2cm και ανιχνευτή 0.003cm :



Εικόνα 64: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

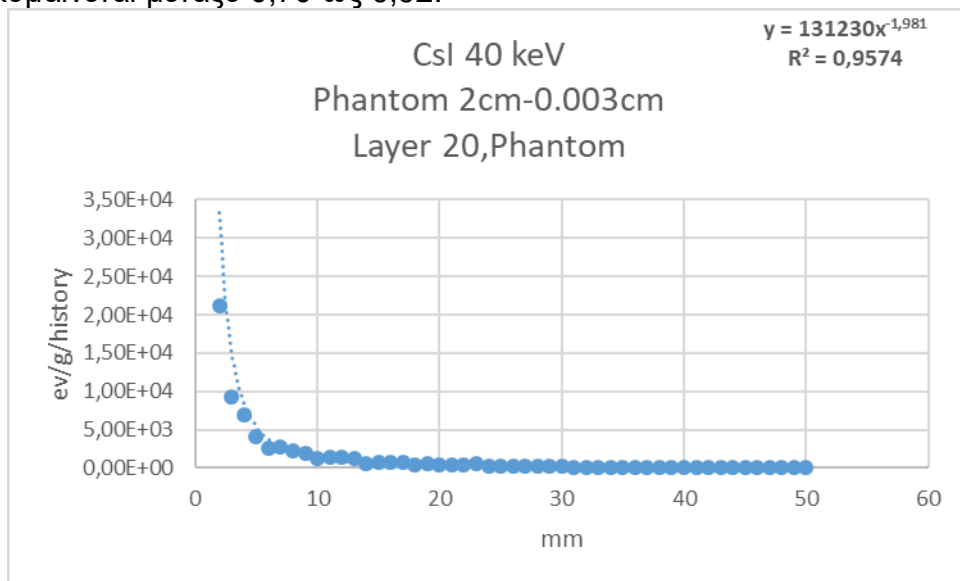


Εικόνα 65: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

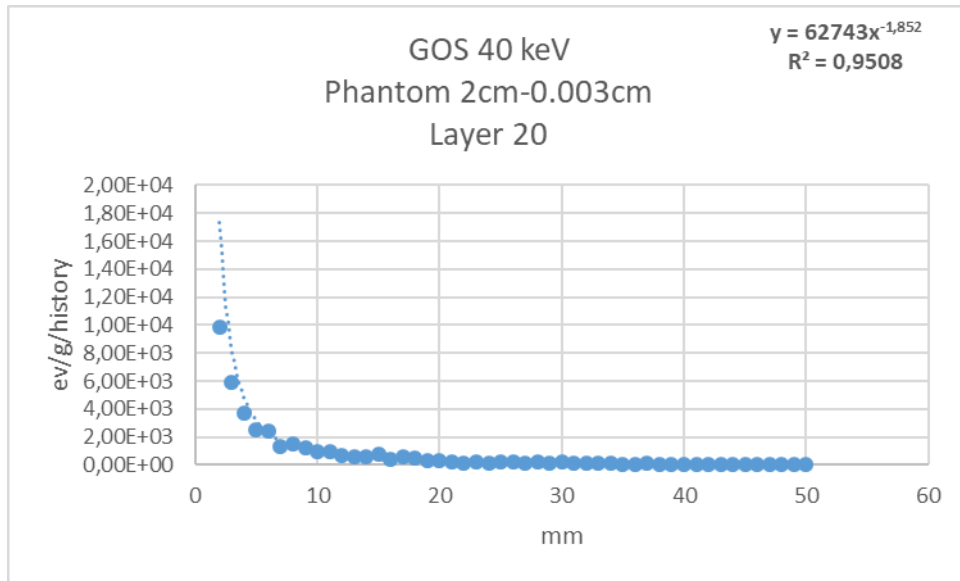


Εικόνα 66: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

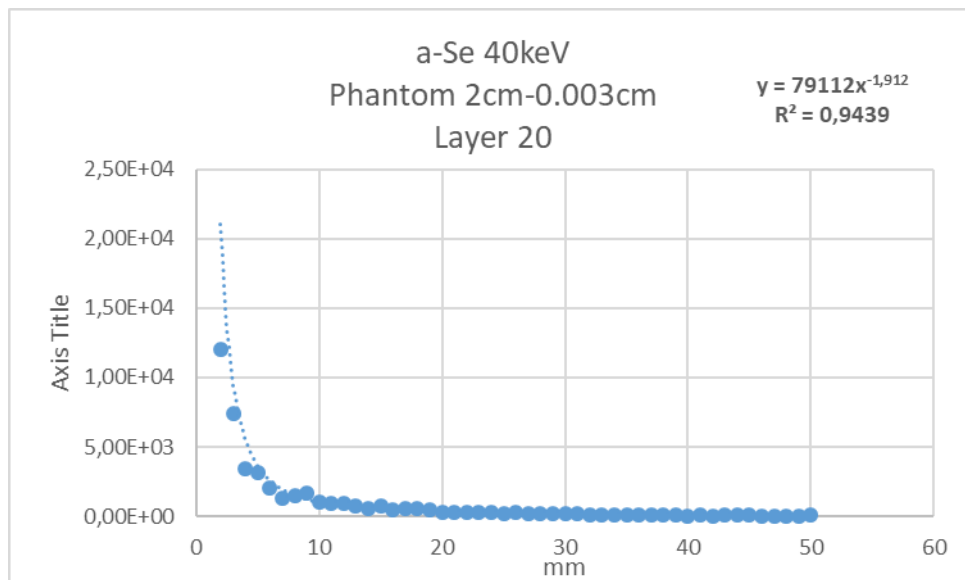
Από τις παραπάνω προσομοιώσεις καταλαβαίνουμε ότι το υλικό GOS παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές όσο αναφορά την σκεδαζόμενη ακτινοβολία. Το  $R^2$  και στις τρεις περιπτώσεις κυμαίνεται μεταξύ 0,70 ως 0,92.



Εικόνα 67: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

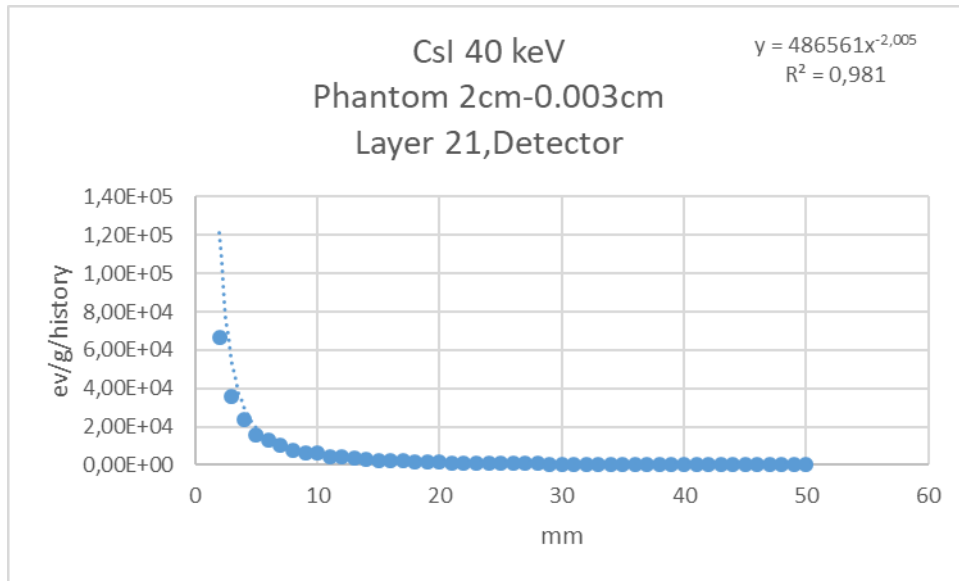


Εικόνα 68: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

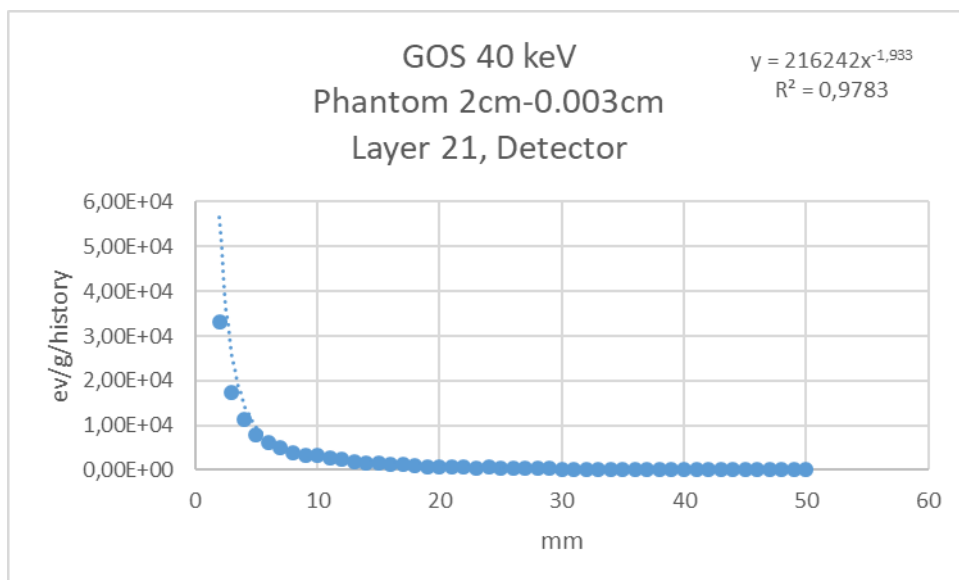


Εικόνα 69: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

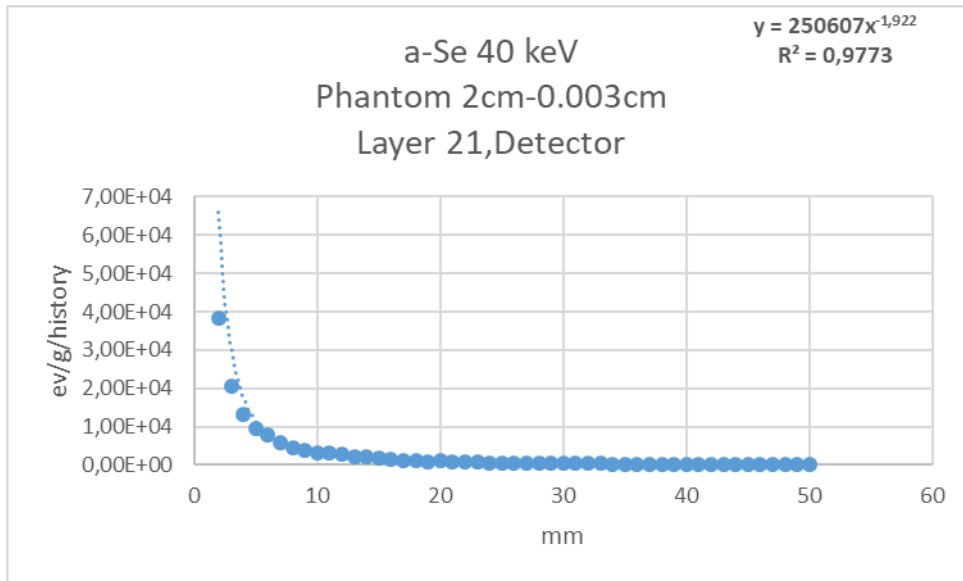
Στο “μεταβατικό στάδιο” του ομοιώματος προς τον ανιχνευτή καταλαβαίνουμε ότι και για τις τρεις περιπτώσεις οι τιμές για την κατανομή της ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι συγκρίσιμες. Το  $R^2$  σε κάθε περίπτωση πλησιάζει την μονάδα.



Εικόνα 70: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



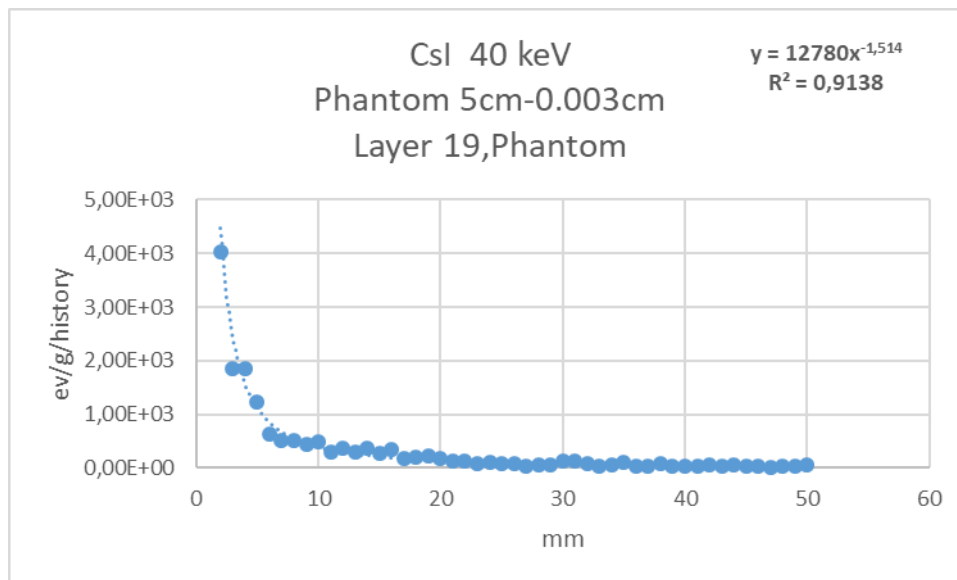
Εικόνα 71: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



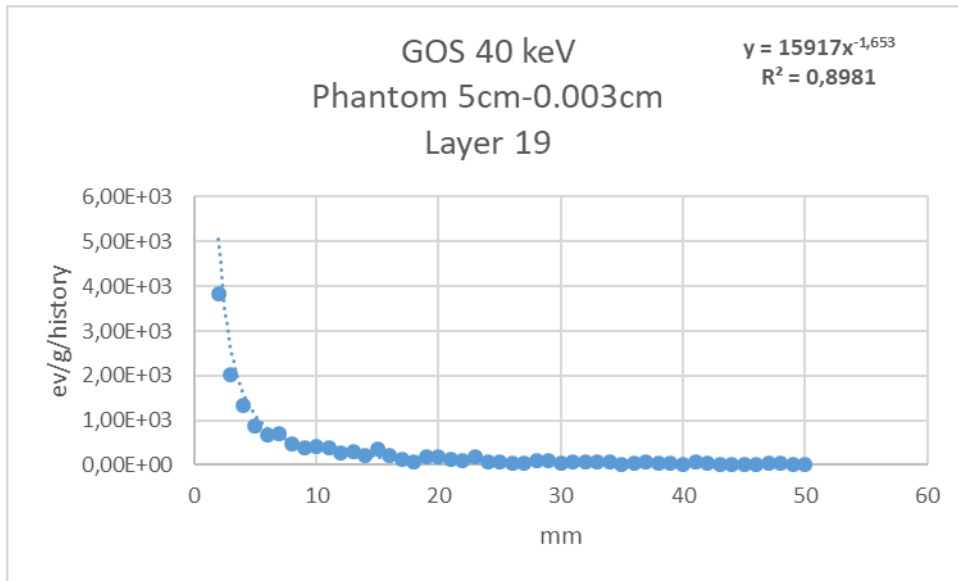
**Εικόνα 72:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Στα παραπάνω γραφήματα παρατηρείται ότι οι τιμές κοντά στην θέση 0 κυμαίνονται  $10 \times 10^4$  eV/g/history. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι το  $R^2$  προσομοιώνεται ικανοποιητικά ( $R^2 > 0,97$ ) σε όλες τις περιπτώσεις.

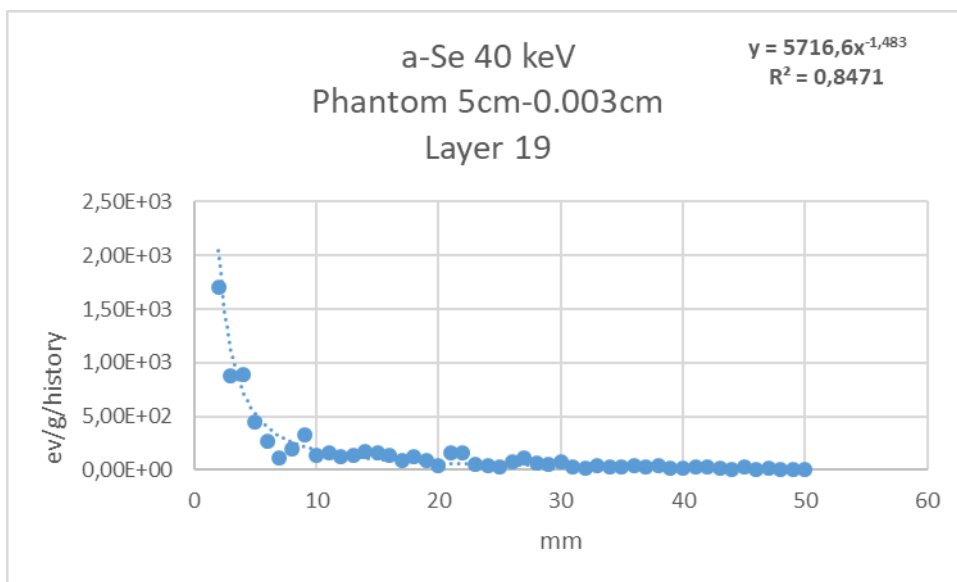
- Ομοίωμα 5cm και ανιχνευτή 0.003cm :



**Εικόνα 73:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

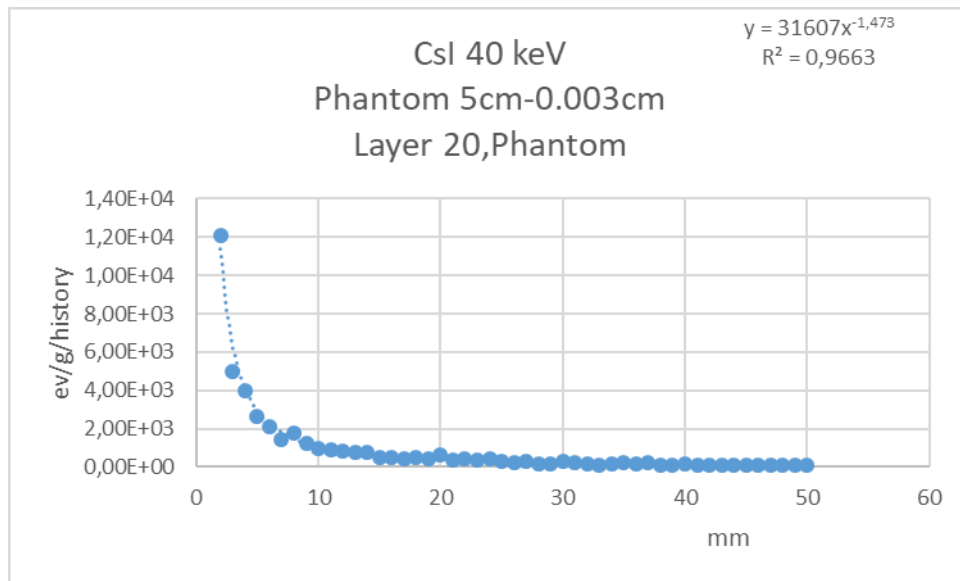


Εικόνα 74: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

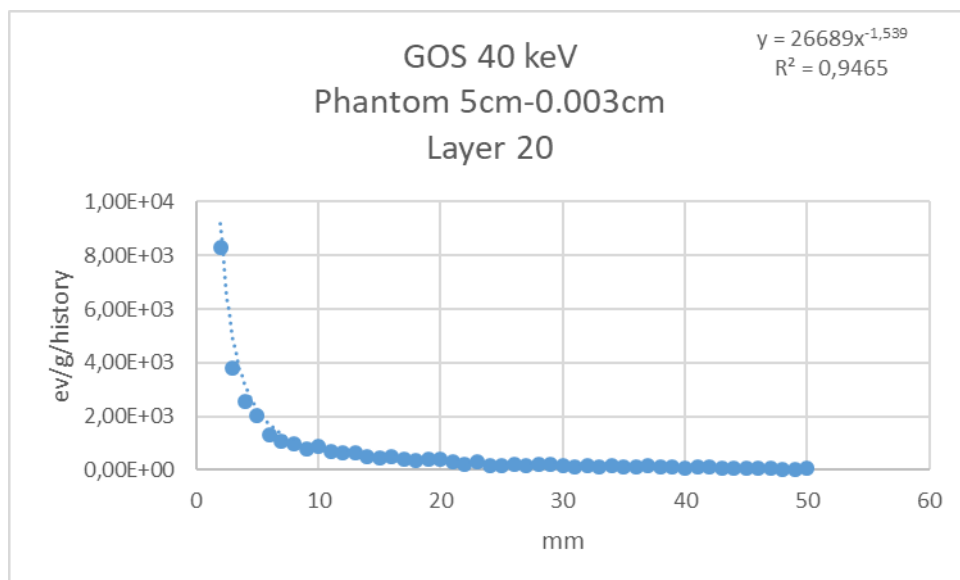


Εικόνα 75: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι σχεδόν συγκρίσιμη και για τα τρία γραφήματα. Μια ενδεικτική τιμή κοντά στη θέση 0 είναι  $2 \times 10^3$  έως  $4 \times 10^3$  eV/g/history. Το  $R^2$  κυμαίνεται μεταξύ 0,84 ως 0,91.

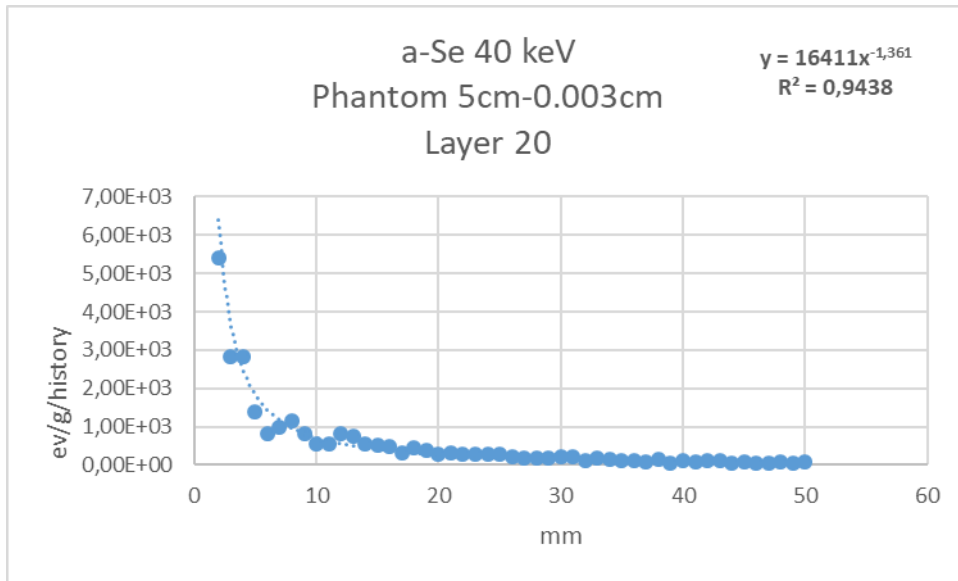


Εικόνα 76: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



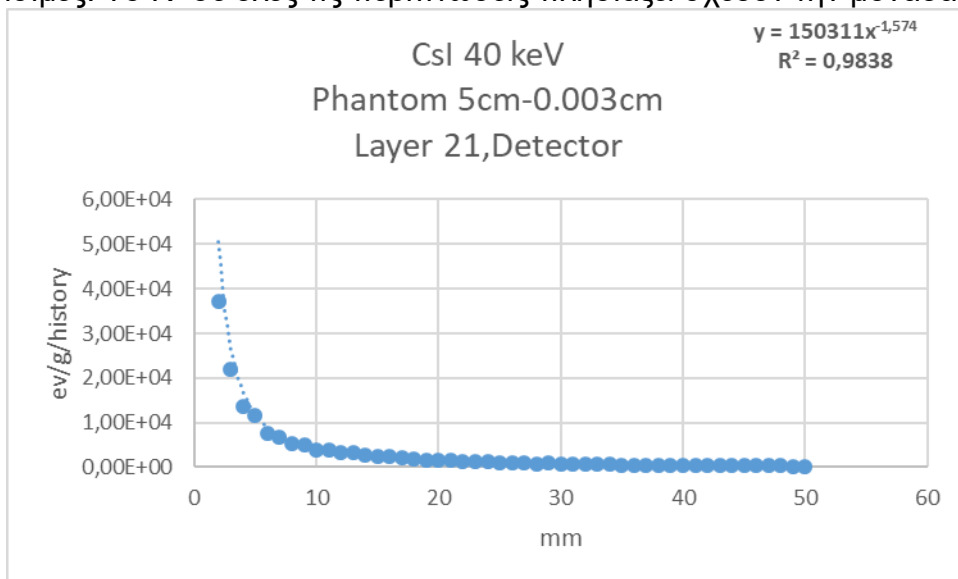
Εικόνα 77: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



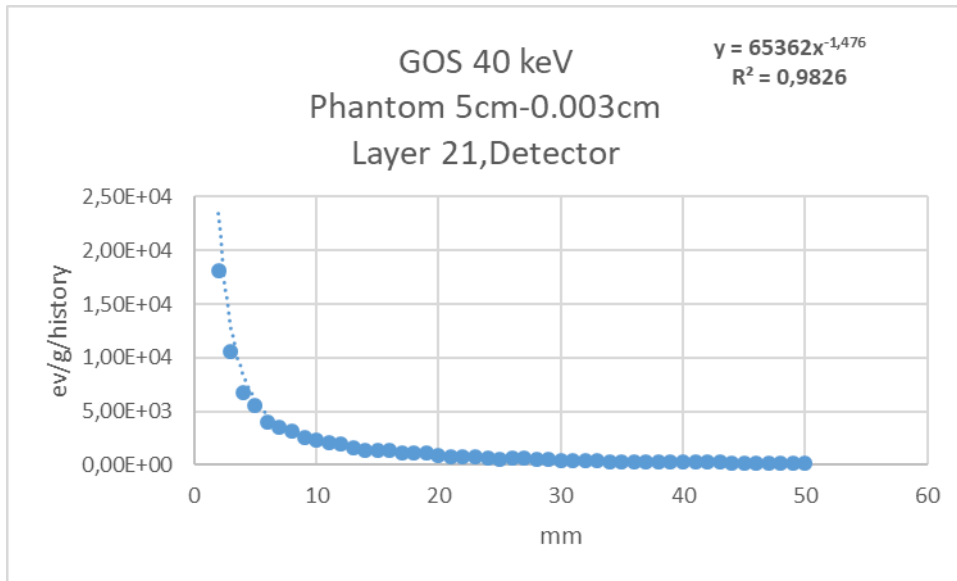


Εικόνα 78: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

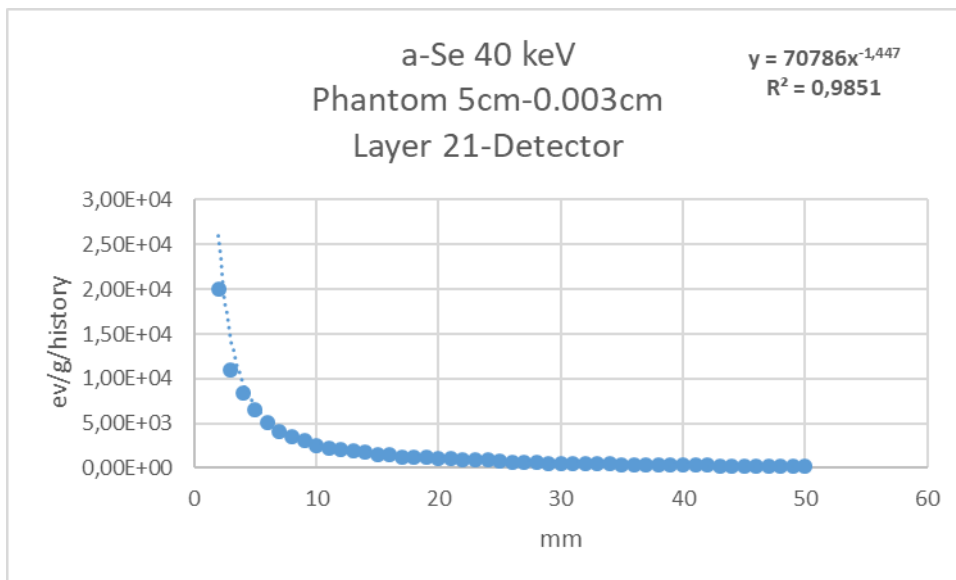
Παρατηρώντας τις παραπάνω προσομοιώσεις, οι τιμές για την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι συγκρίσιμες. Το  $R^2$  σε όλες τις περιπτώσεις πλησιάζει σχεδόν την μονάδα.



Εικόνα 79: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

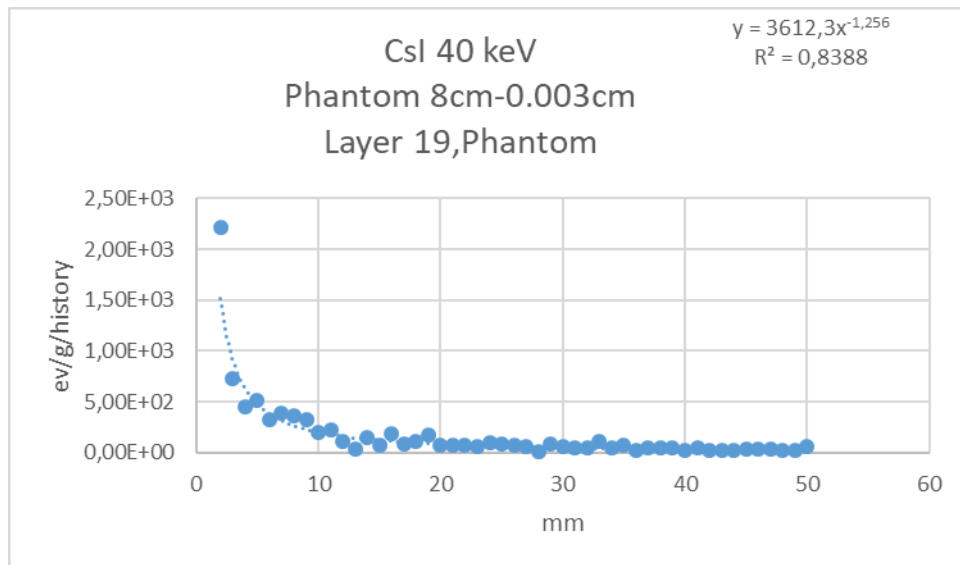


Εικόνα 80: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

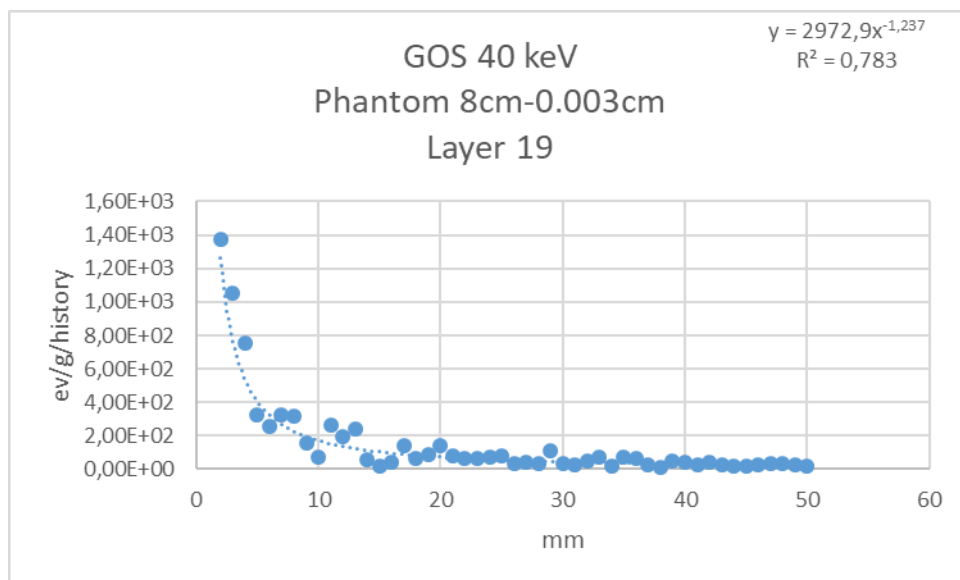


Εικόνα 81: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

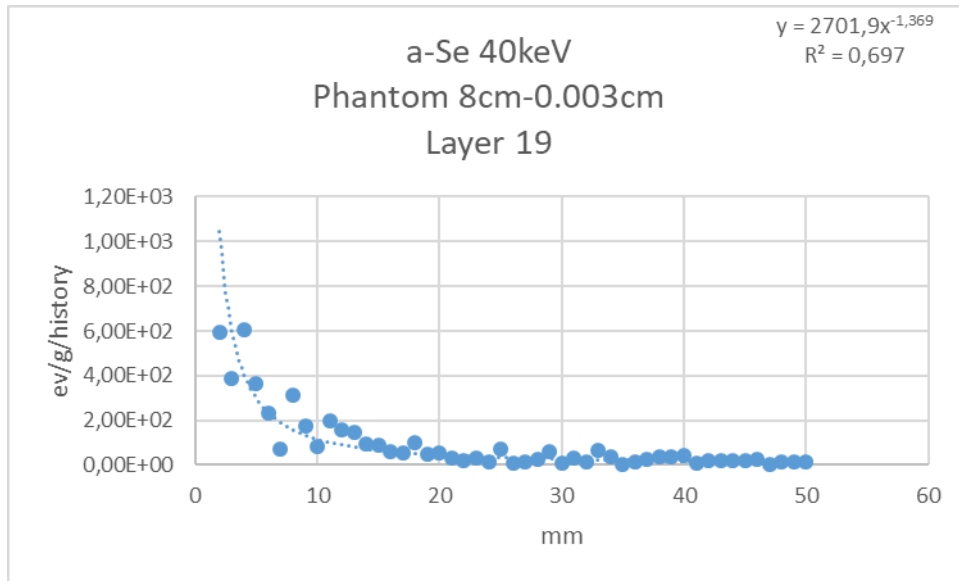
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι σχεδόν συγκρίσιμη και για τα τρία γραφήματα. Μια ενδεικτική τιμή κοντά στη θέση 0 είναι  $2 \times 10^4$  έως  $4 \times 10^4$  eV/g/history. Το  $R^2$  σε όλες τις προσομοιώσεις πλησιάζει την μονάδα (0, 98). Ομοίωμα 8cm και ανιχνευτή 0.003cm :



Εικόνα 82: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

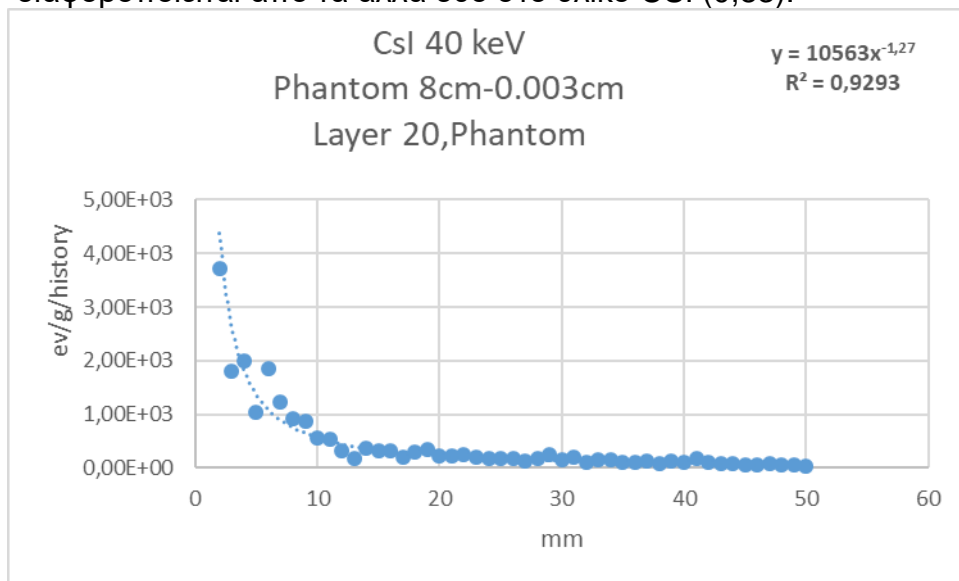


Εικόνα 83: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

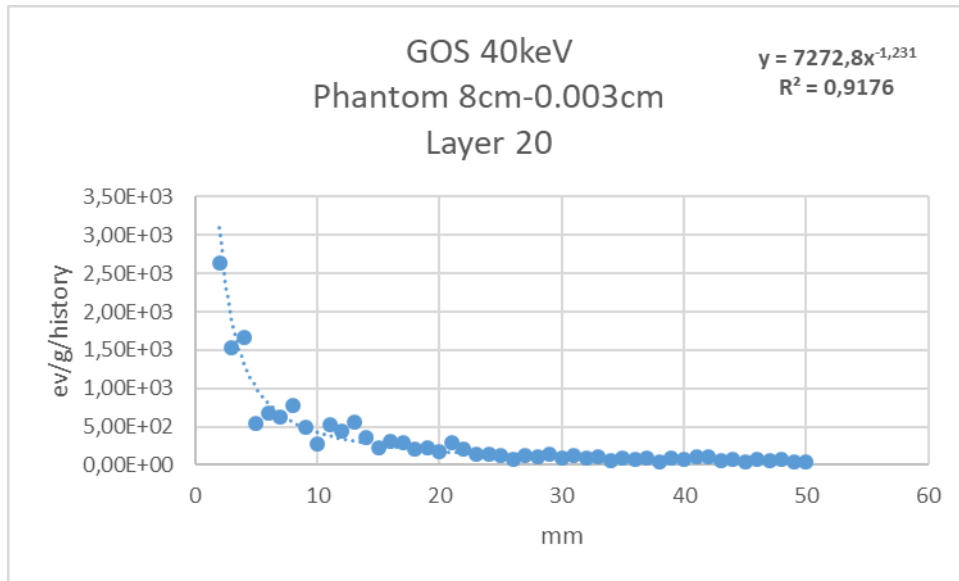


Εικόνα 84: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

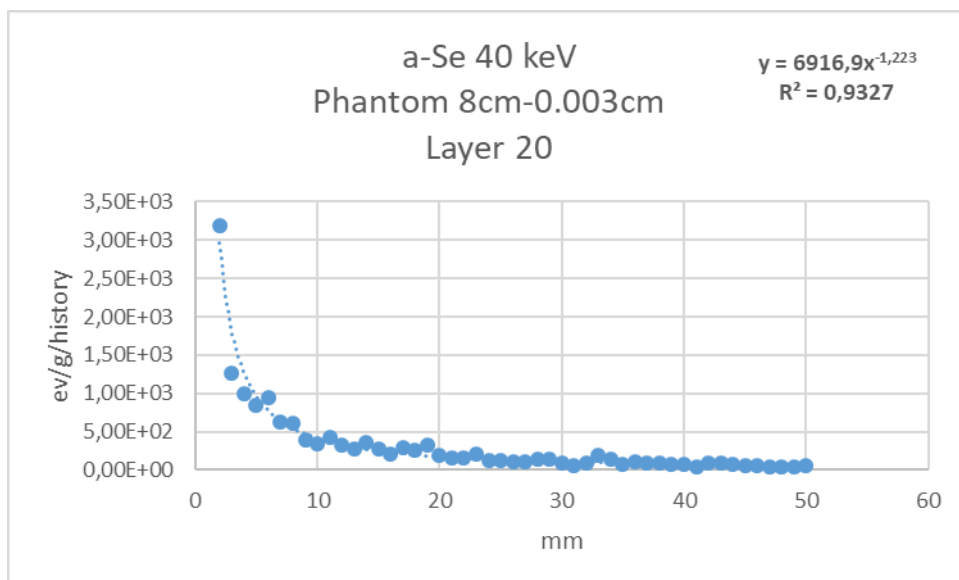
Στις παραπάνω προσομοιώσεις οι τιμές για την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι συγκρίσιμες για όλες τις περιπτώσεις. Οι τιμές αρχίζουν να μειώνονται αισθητά μετά τα 10 mm. Το  $R^2$  διαφοροποιείται από τα άλλα δύο στο υλικό CSI (0,83).



Εικόνα 85: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό Csl.

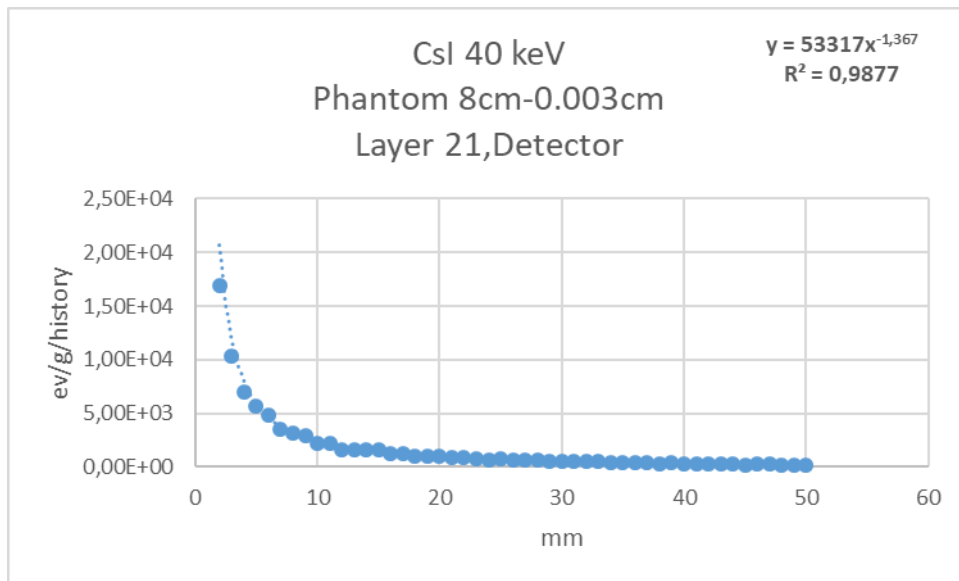


Εικόνα 86: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

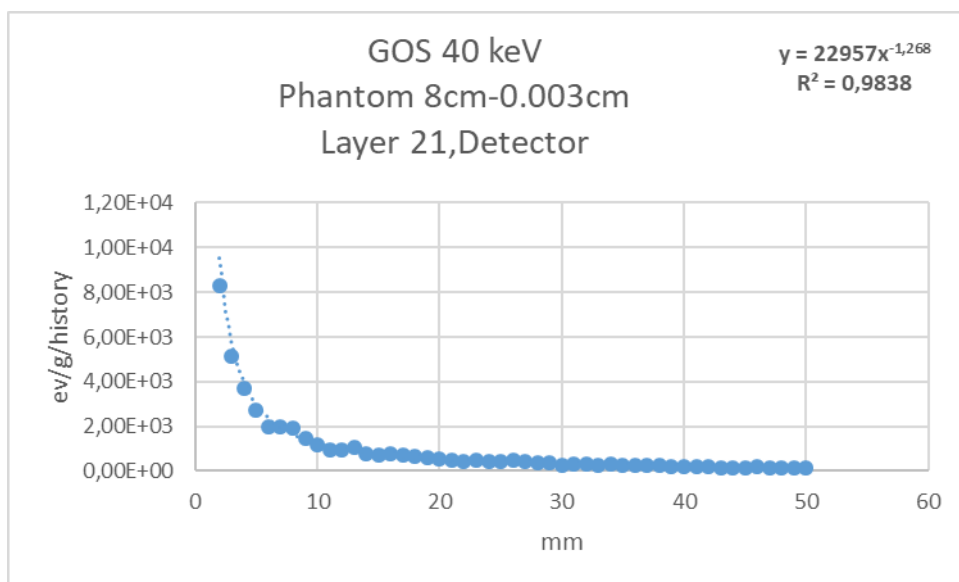


Εικόνα 87: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

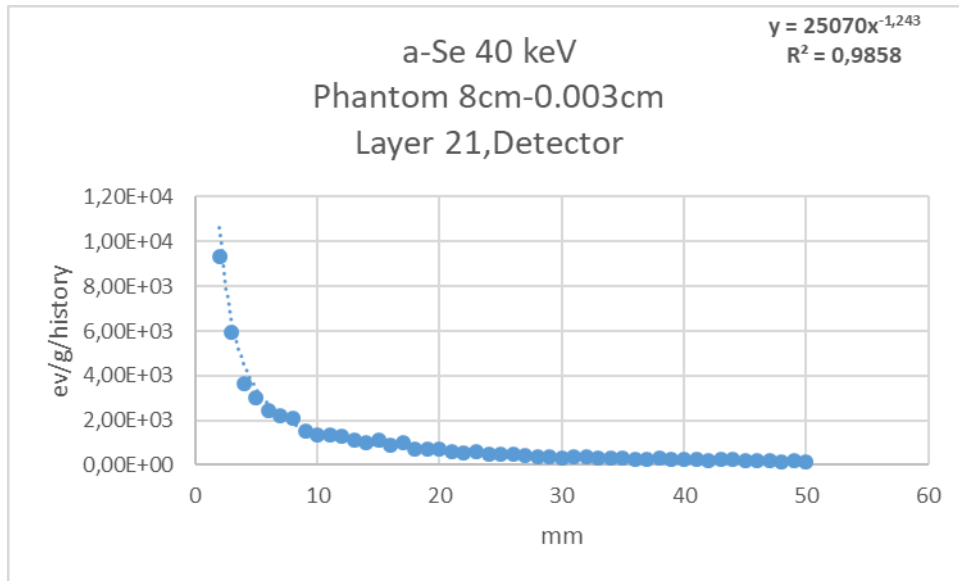
Στο “μεταβατικό στάδιο” παρατηρούμε ότι κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι συγκρίσιμη και για τα τρία υλικά. Μια ενδεικτική τιμή κοντά στη θέση 0 είναι  $3 \times 10^3$  eV/g/history. Το  $R^2$  σε όλες τις περιπτώσεις πλησιάζει την μονάδα, πιο συγκεκριμένα κυμαίνεται μεταξύ 0,91 έως 0,93) .



Εικόνα 88: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



Εικόνα 89: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

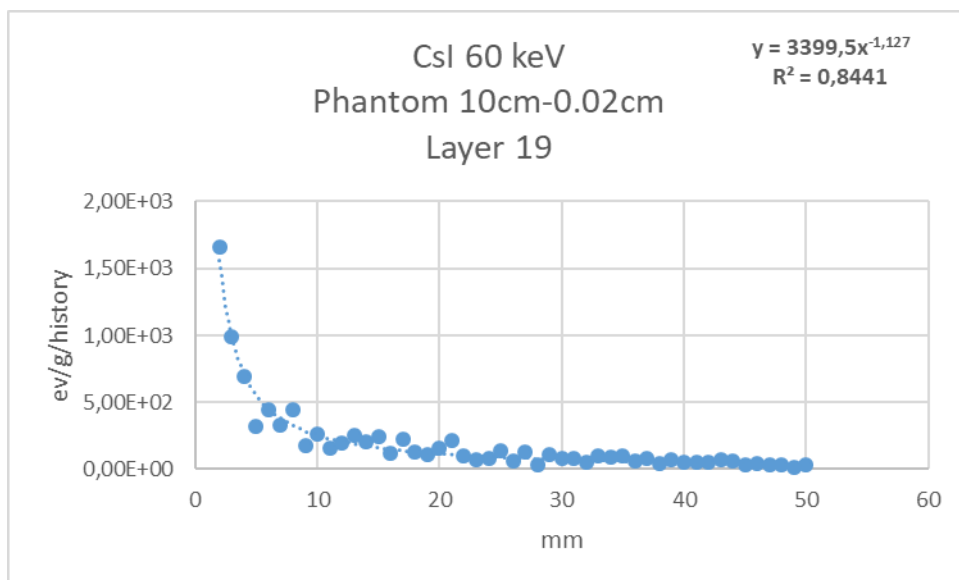


**Εικόνα 90:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

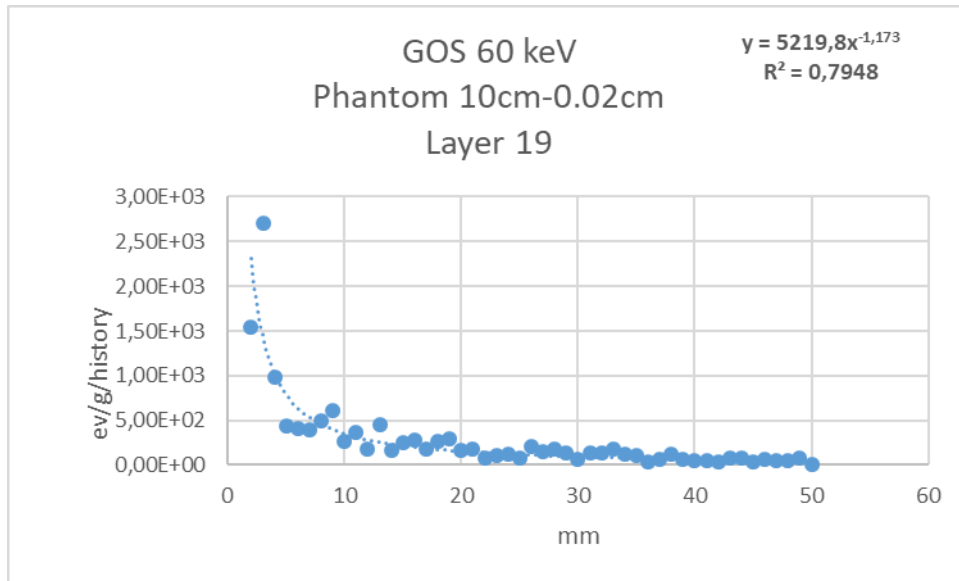
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή είναι συγκρίσιμη και για τους τρεις ανιχνευτές. Μια ενδεικτική τιμή κοντά στη θέση 0 είναι  $1 \times 10^4$  eV/g/history. Για τις συγκεκριμένες συνθήκες η κατανομή της σκεδαζόμενης μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά ( $R^2 > 0.98$  για κάθε περίπτωση).

Προσομοιώνοντας την ενέργεια 60 KV τα αποτελέσματα που ελήφθησαν είναι:

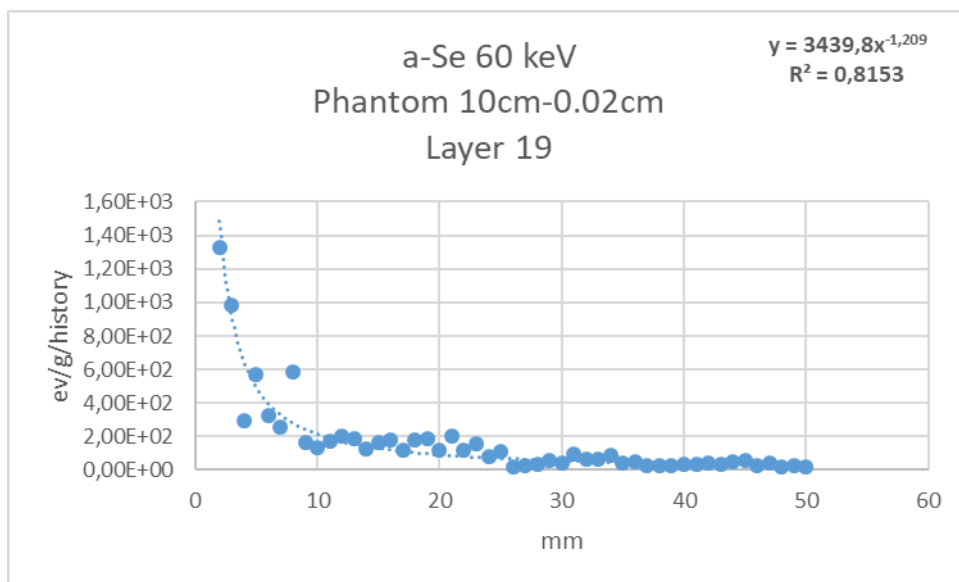
- Ομοίωμα 10cm και ανιχνευτή 0.02cm :



**Εικόνα 91:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



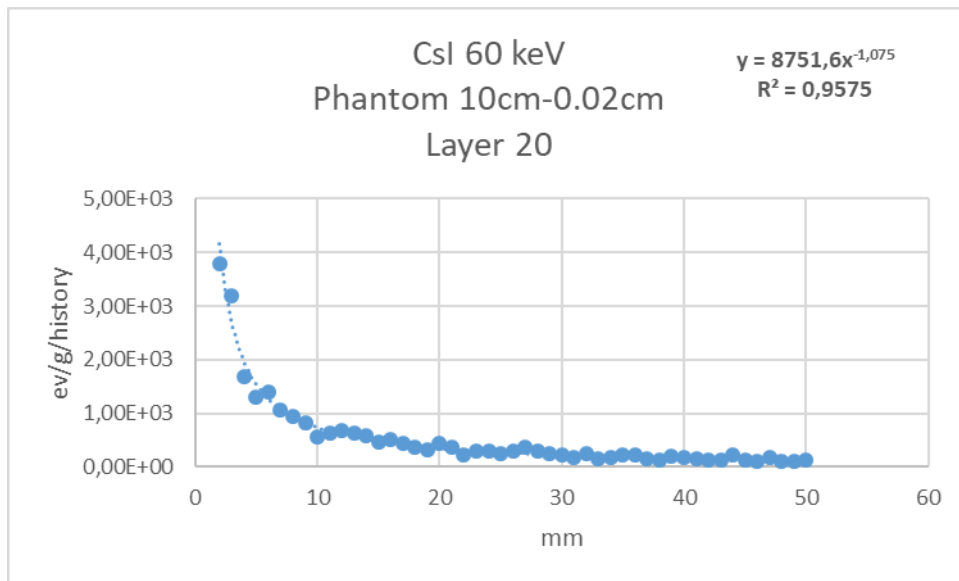
Εικόνα 92: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



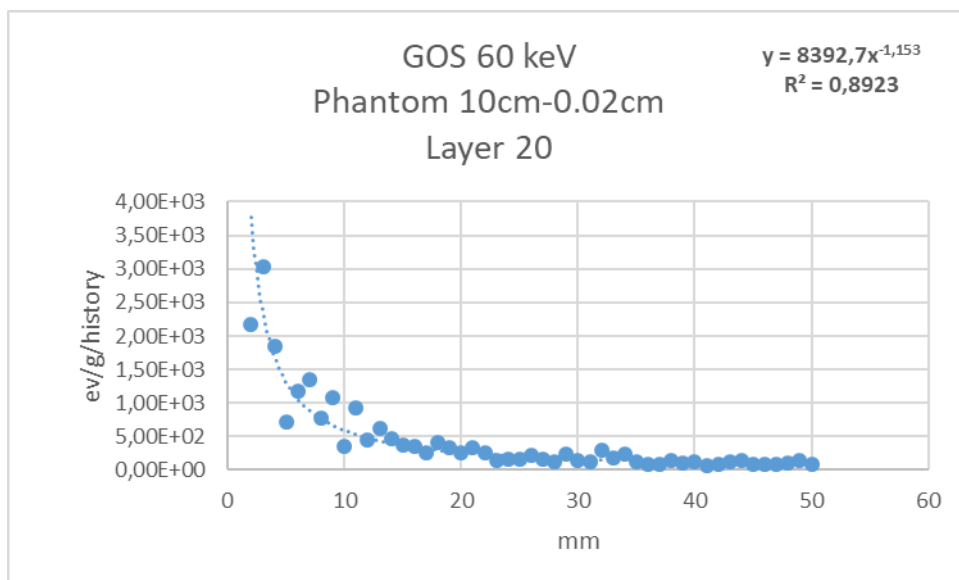
Εικόνα 93: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει συγκρίσιμες τιμές σε όλα τα υλικά. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές κοντά στην θέση 0 κυμαίνονται περίπου στο  $1,50 \times 10^3$  eV/g/history. Το  $R^2$  σε όλες τις περιπτώσεις είναι μεγαλύτερο  $>0,79$ .

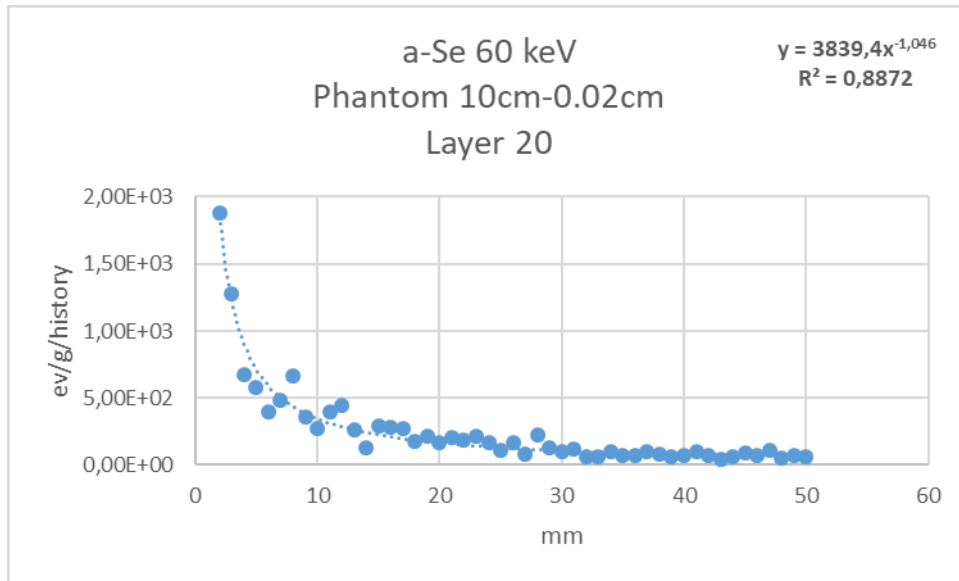




Εικόνα 94: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

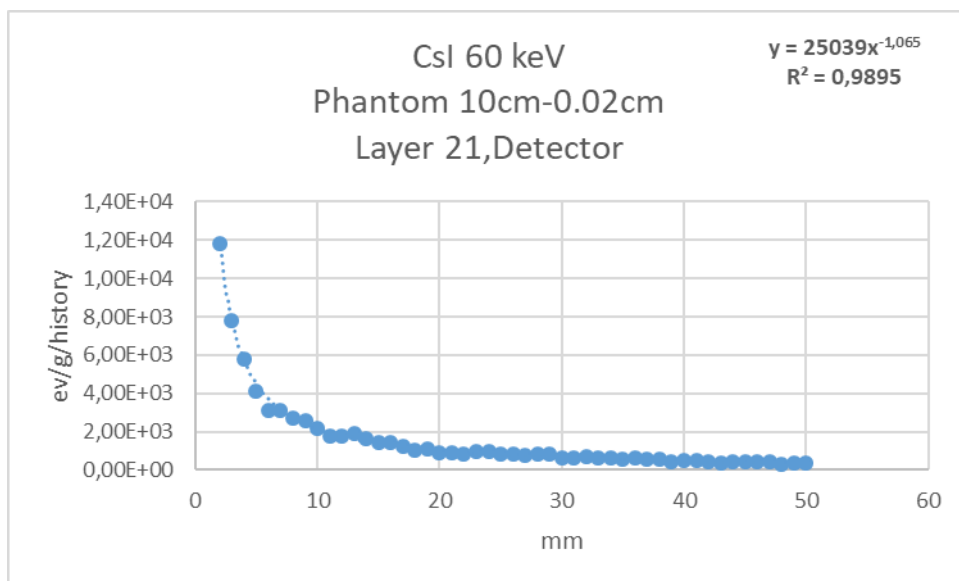


Εικόνα 95: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

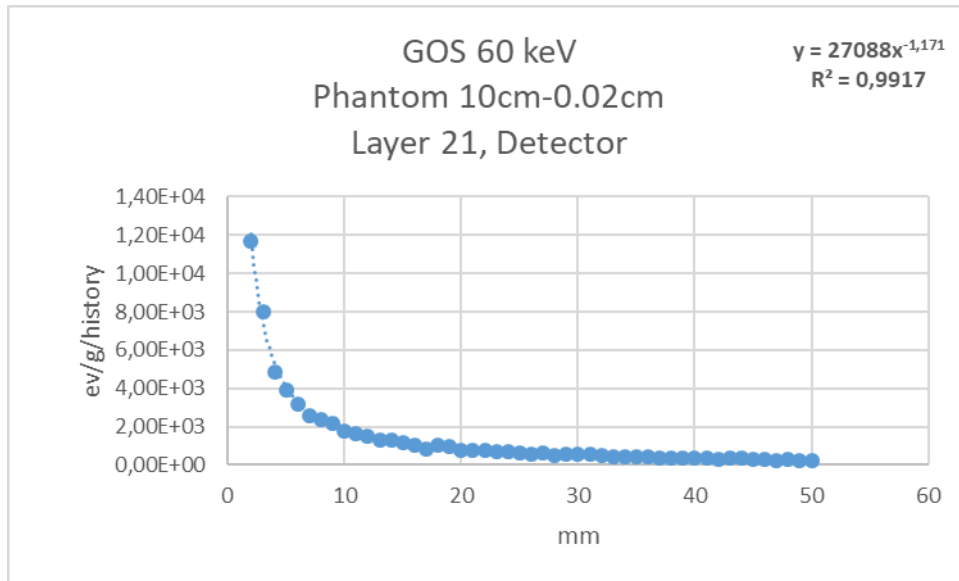


**Εικόνα 96:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

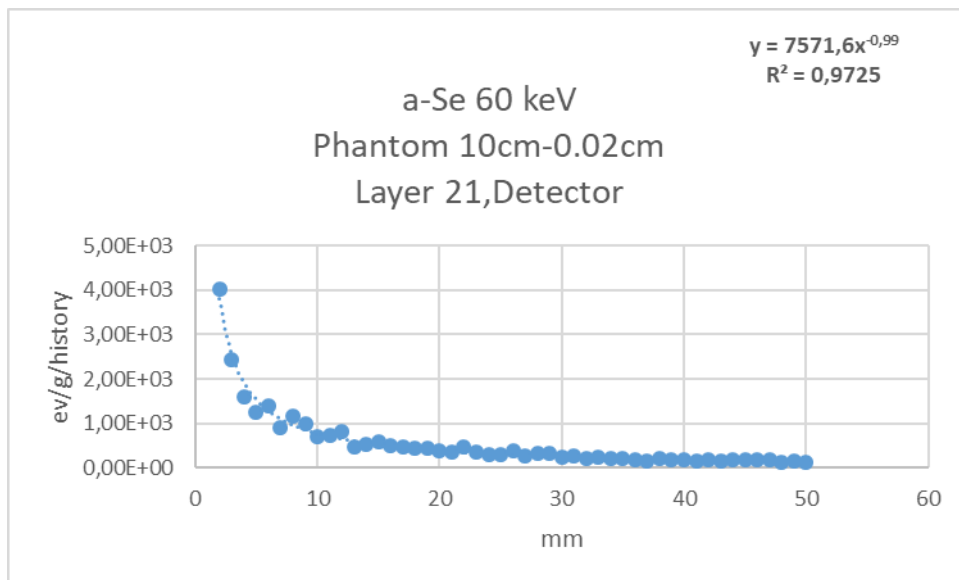
Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι η κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο “μεταβατικό στάδιο” του ομοιώματος προς τον ανιχνευτή, έχει μεγαλύτερες τιμές για τον ομοίωμα με τον ανιχνευτή CSI, όπου μειώνεται αισθητά σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 10mm. Το  $R^2$  σε όλες τις περιπτώσεις είναι μεγαλύτερο  $>0,88$ .



**Εικόνα 97:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



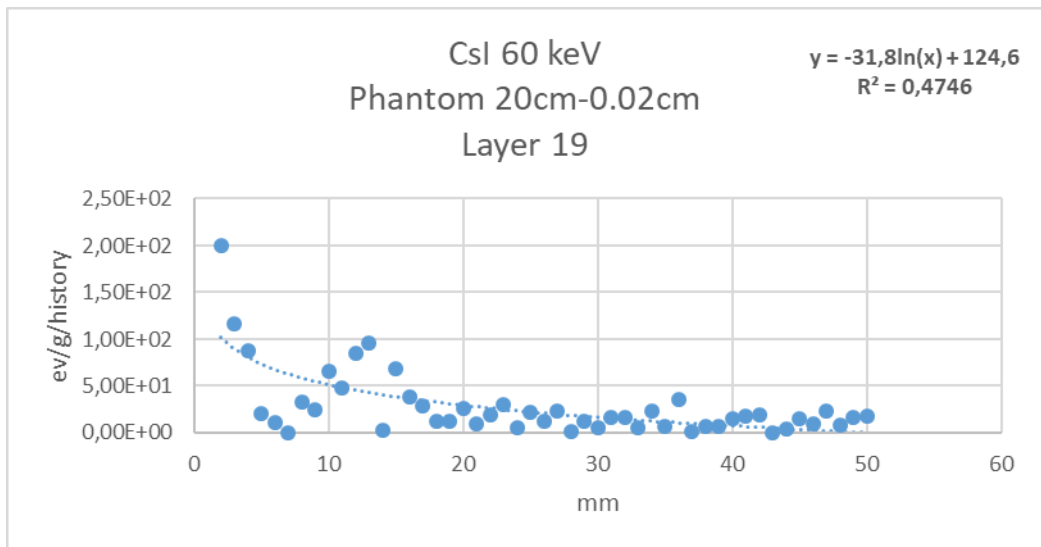
Εικόνα 98: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



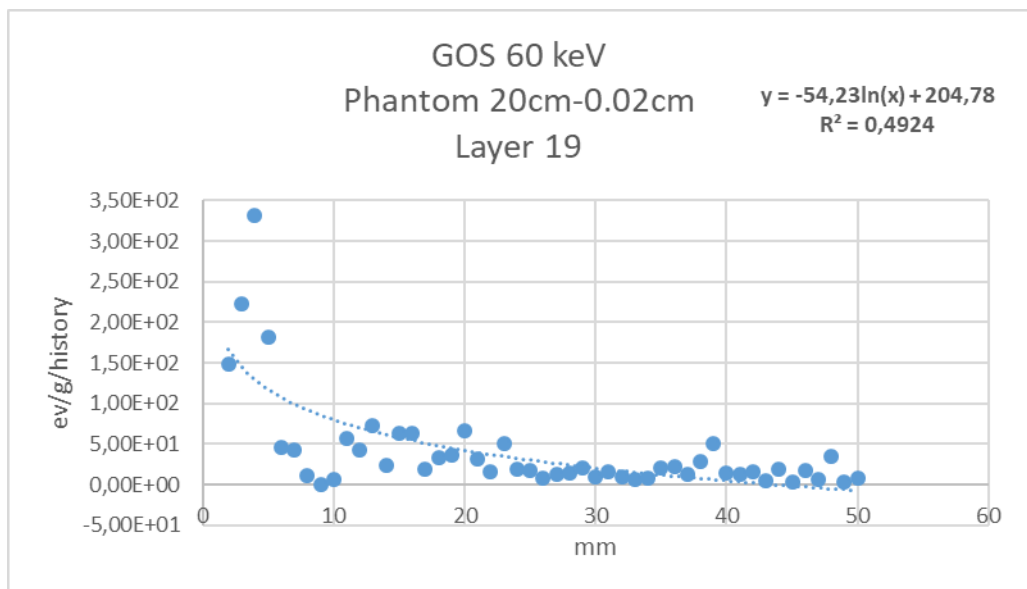
Εικόνα 99: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Στα τρία παραπάνω γραφήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή είναι συγκρίσιμη σε όλες τις περιπτώσεις. Το  $R^2$  πλησιάζει την μονάδα και για τους τρεις ανιχνευτές.

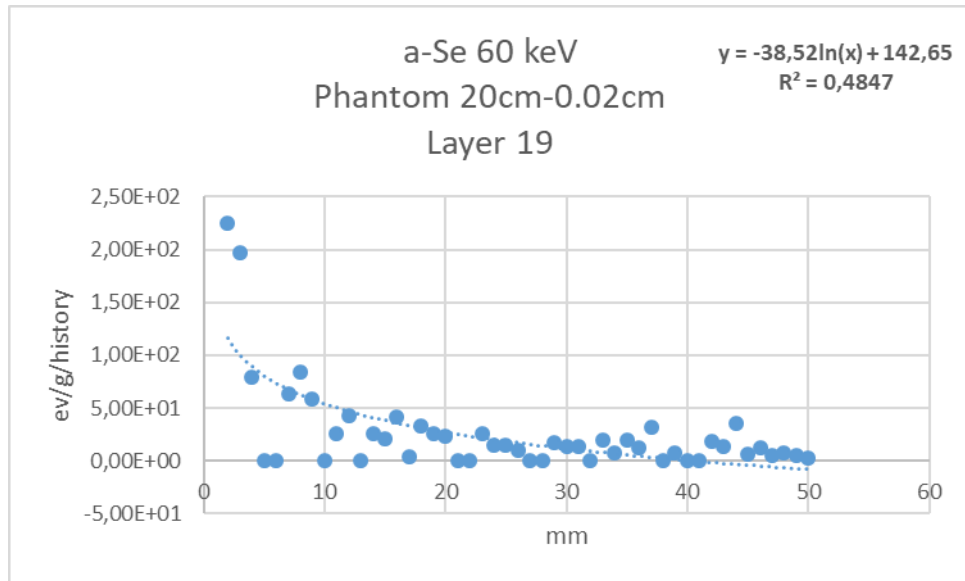
- Ομοίωμα 20cm και ανιχνευτή 0.02cm :



Εικόνα 100: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

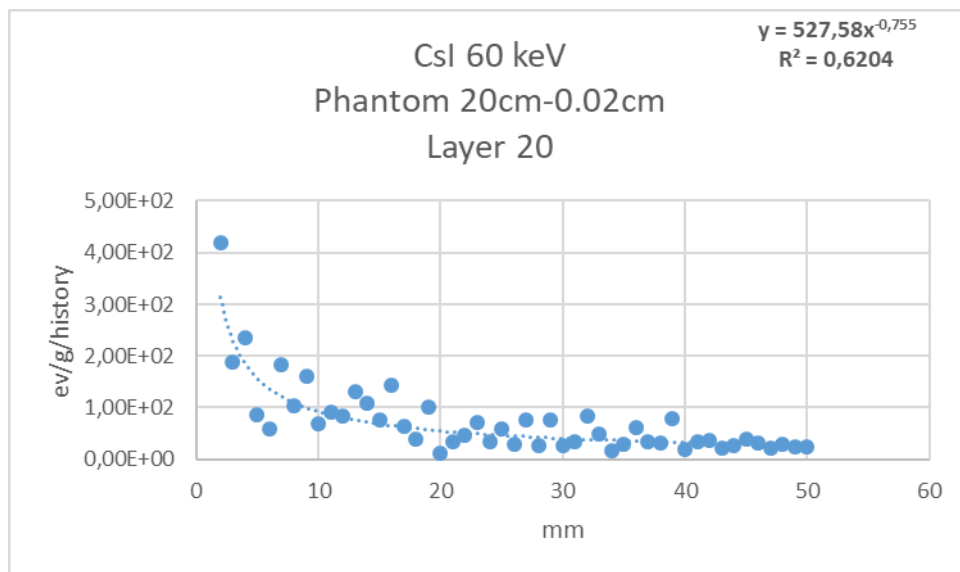


Εικόνα 101: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

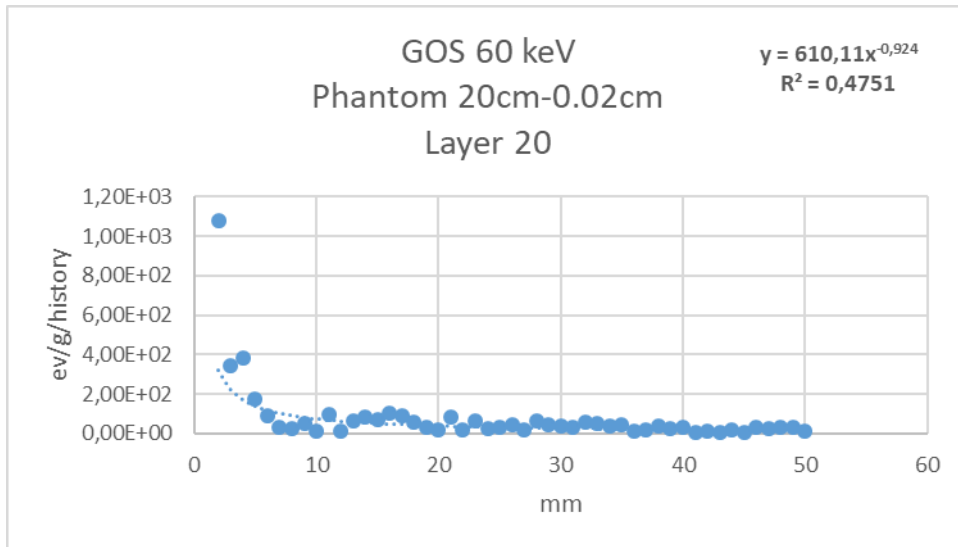


**Εικόνα 102:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

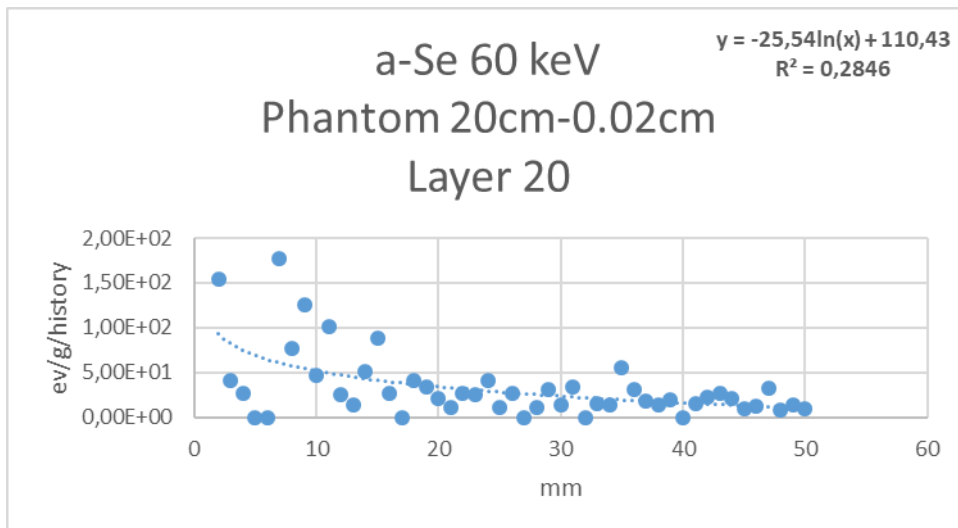
Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για το ομοίωμα με το υλικό GOS. Και στις τρεις περιπτώσεις, το  $R^2$  απέχει αρκετά από την μονάδα.



**Εικόνα 103:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

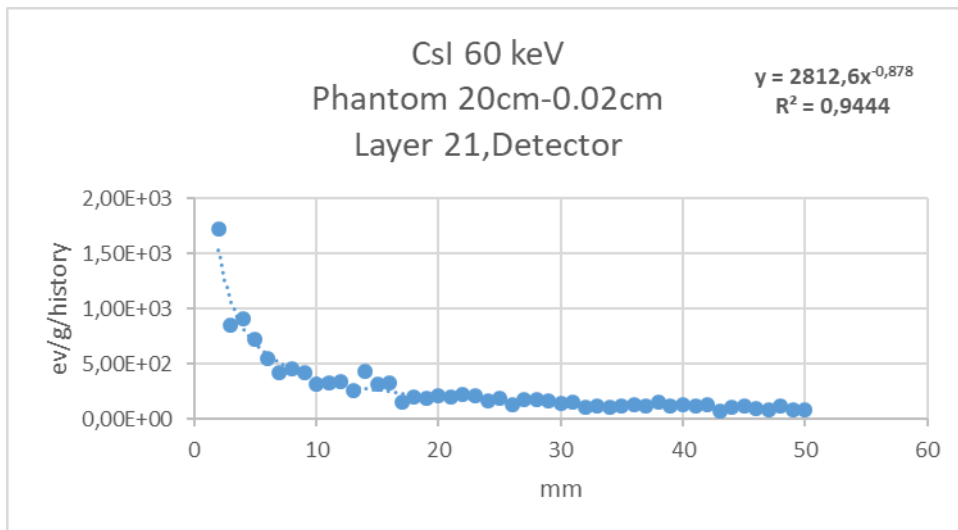


Εικόνα 104: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

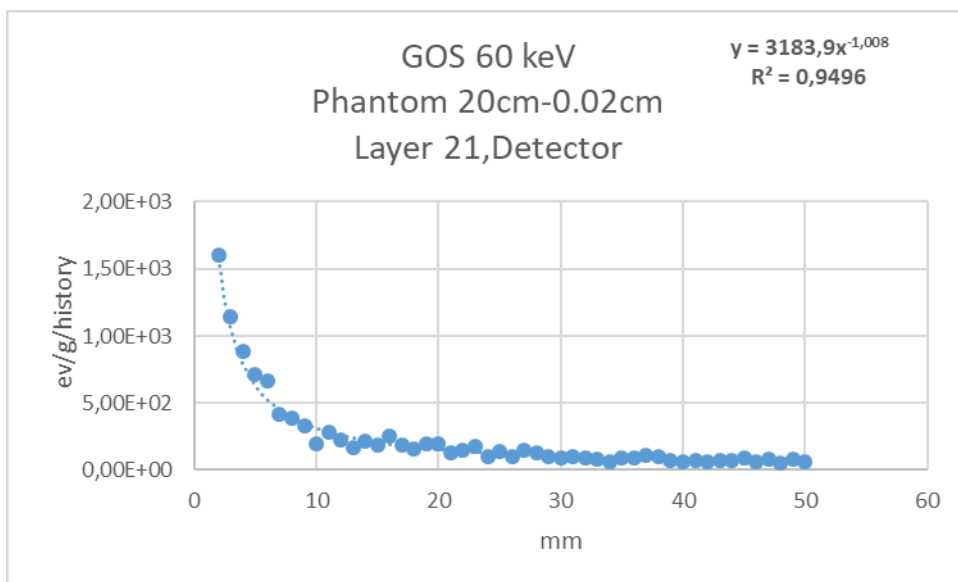


Εικόνα 105: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

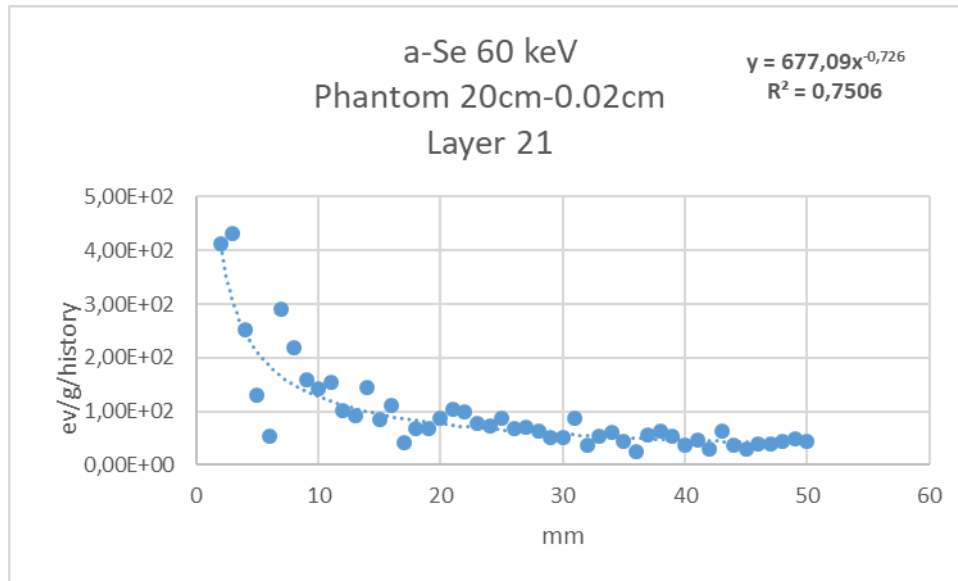
Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε ότι η κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο “μεταβατικό στάδιο” του ομοιώματος προς τον ανιχνευτή είναι συγκρίσιμη και για τους τρεις ανιχνευτές. Το  $R^2$  σε όλες τις περιπτώσεις απέχει αρκετά από την μονάδα και ιδιαίτερα στο υλικό a-Se.



Εικόνα 106: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



Εικόνα 107: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

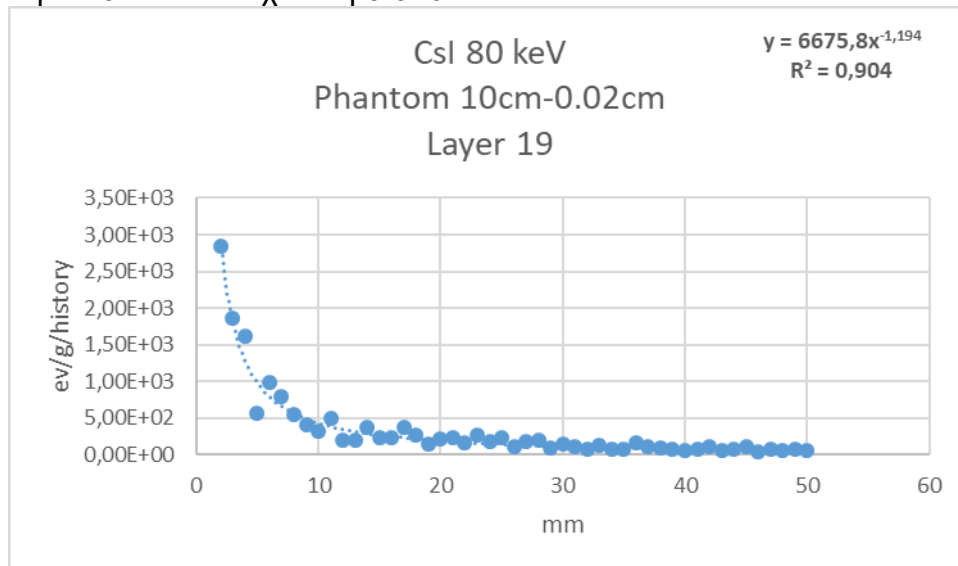


**Εικόνα 108:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα , παρατηρούμε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει συγκρίσιμες τιμές και για τους τρεις ανιχνευτές. Στα υλικά CSI ΚΑΙ GOS το  $R^2$  πλησιάζει την μονάδα, αντίθετα στο υλικό a-Se απέχει αρκετά από την μονάδα(0,75).

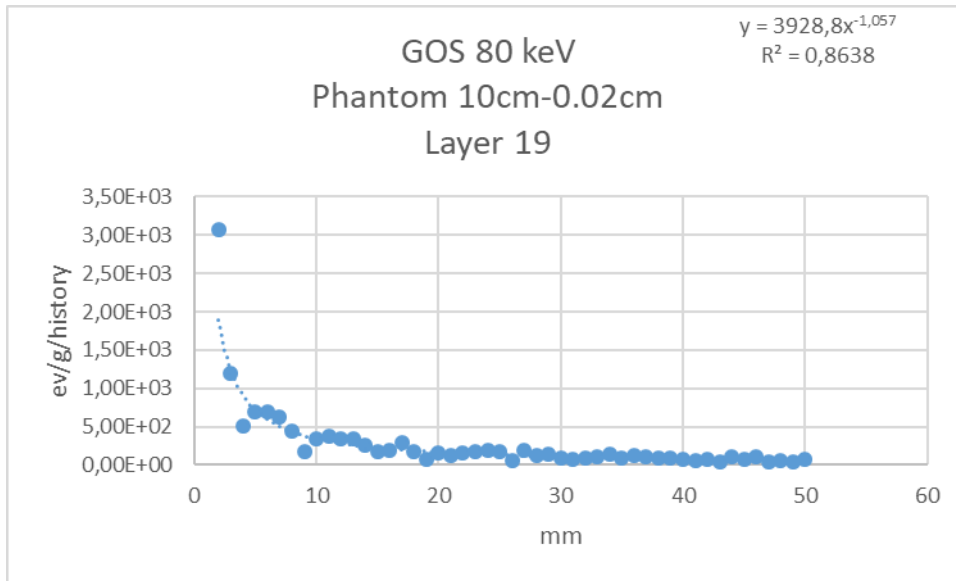
Στην συνέχεια θα ακολουθήσουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την ενέργεια των 80 KV:

- Ομοίωμα 10cm και ανιχνευτή 0.02cm :

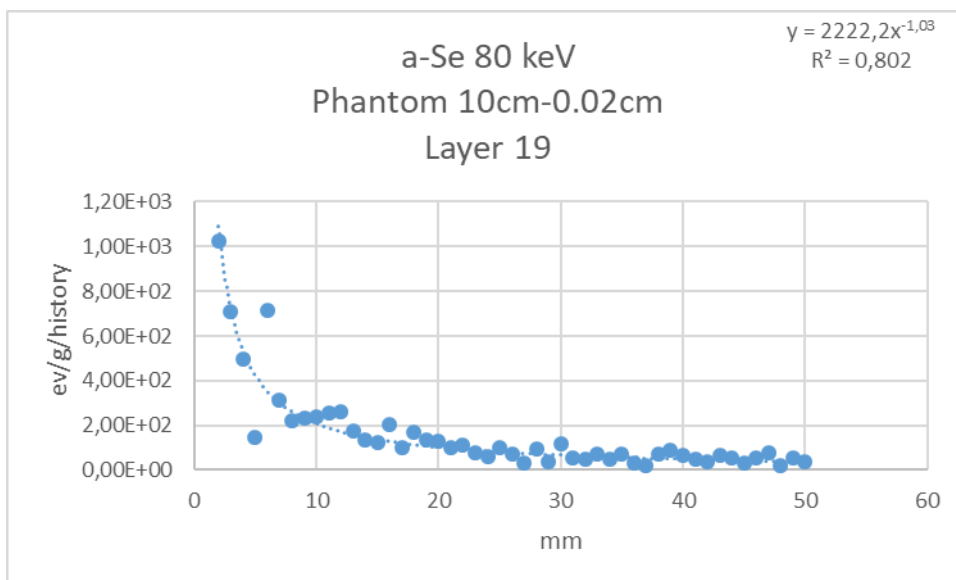


**Εικόνα 109:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



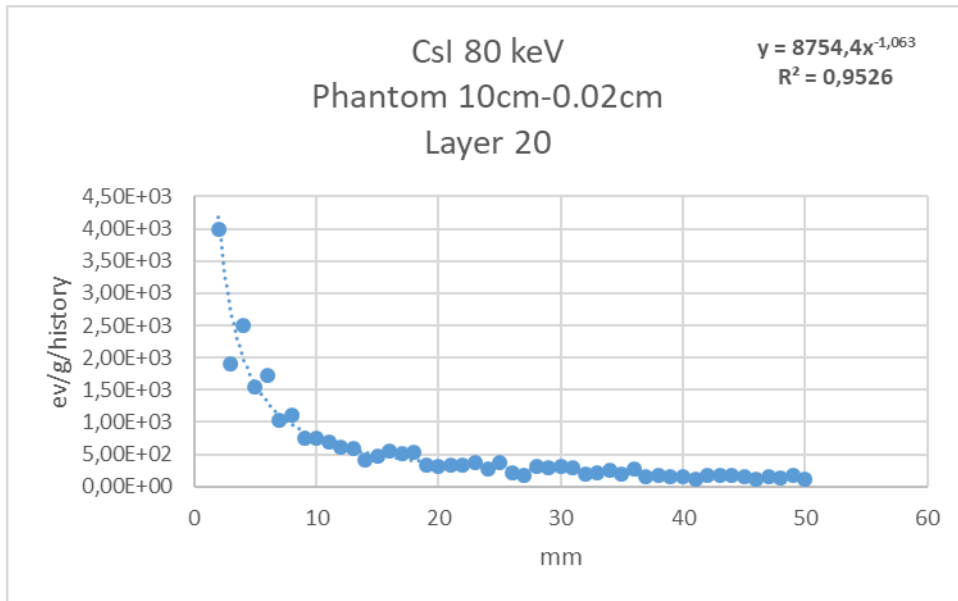


Εικόνα 110: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

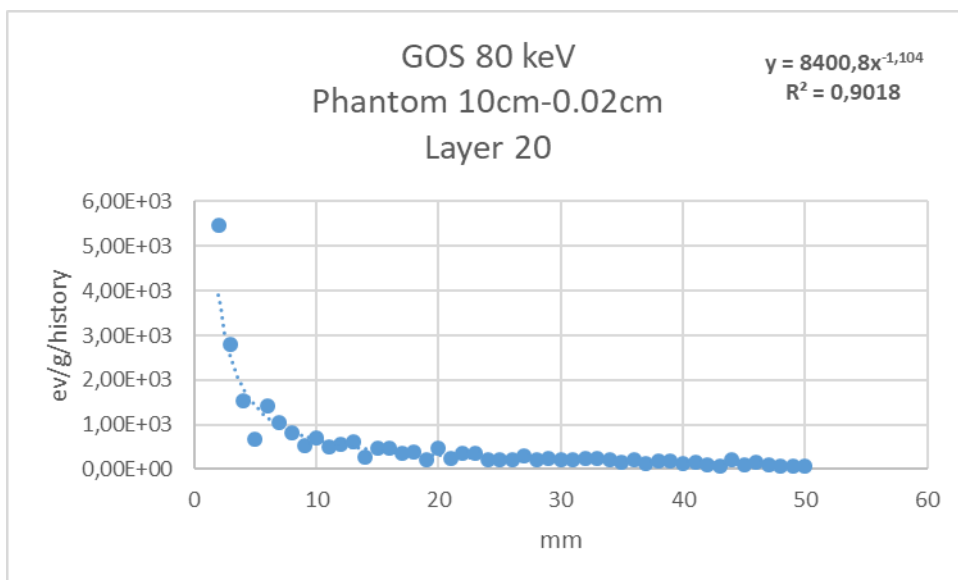


Εικόνα 111: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

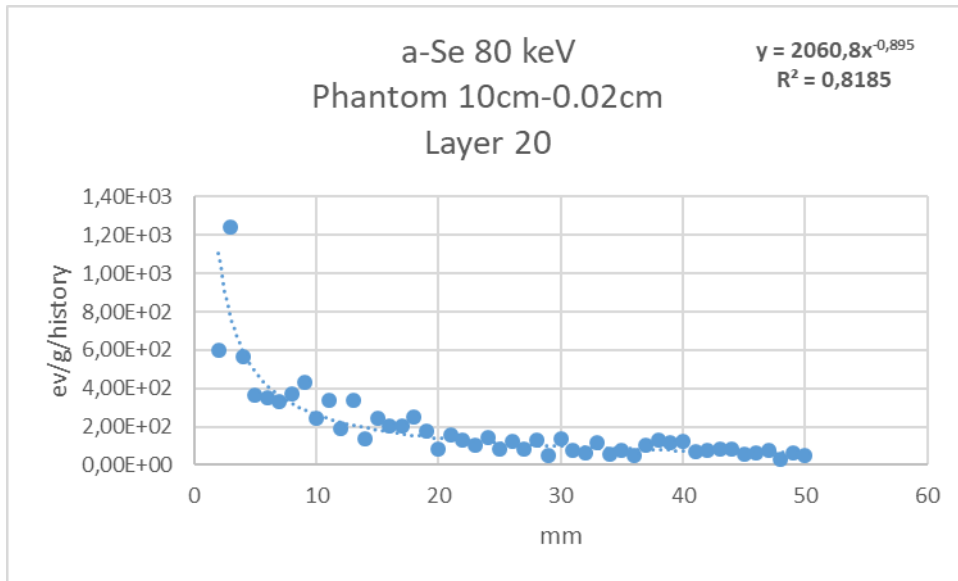
Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα η κατανομή της δόσης είναι συγκρίσιμη και στα τρία υλικά. Μια ενδεικτική τιμή κοντά στην θέση 0 είναι από  $1 \times 10^3$  -  $3 \times 10^3$  eV/g/history. Το  $R^2$  είναι  $>0,80$  για όλες τις περιπτώσεις.



Εικόνα 112: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

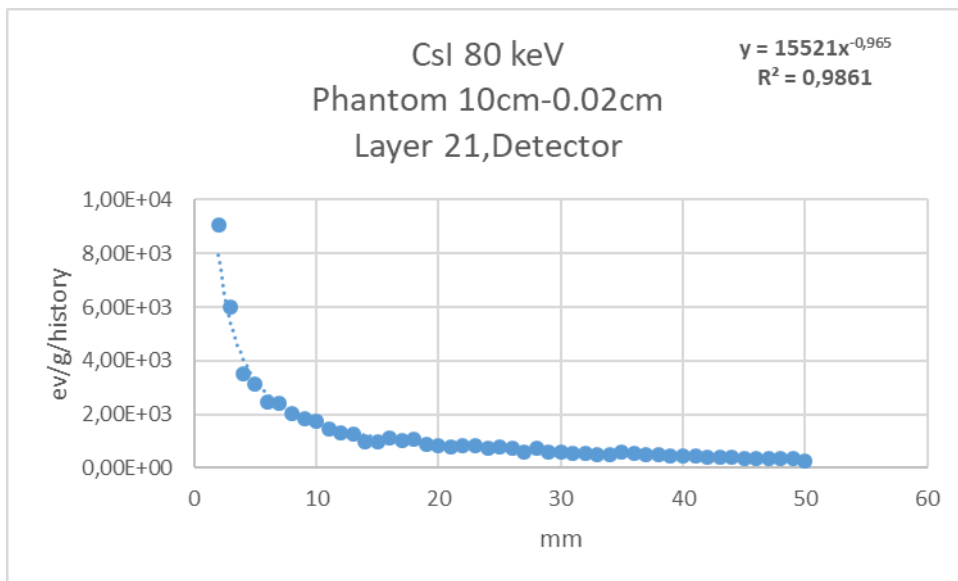


Εικόνα 113: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS .

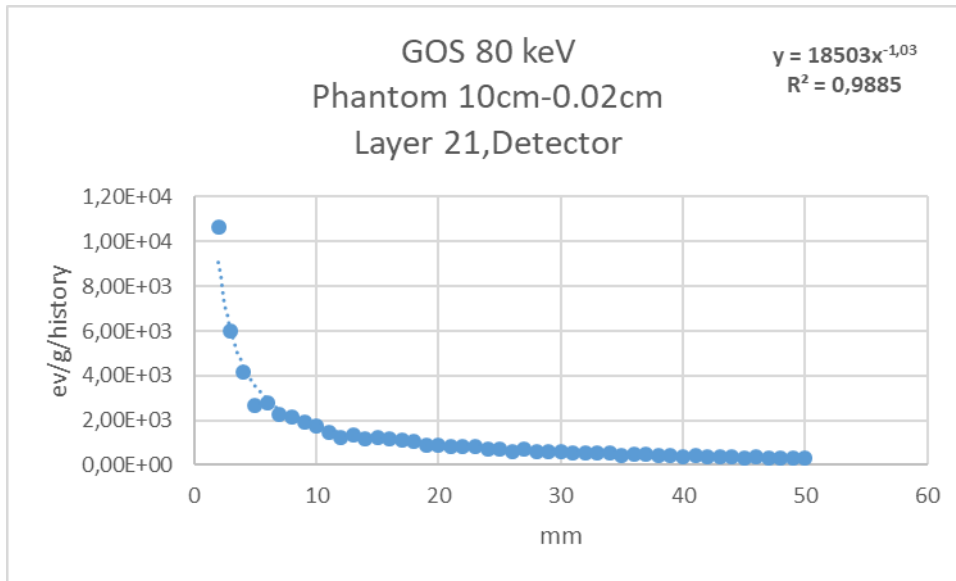


Εικόνα 114: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

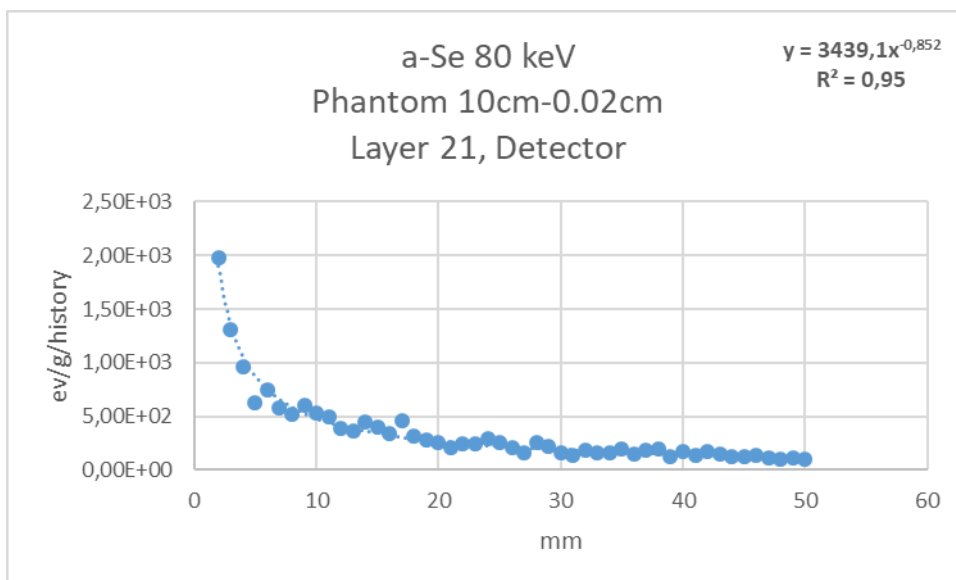
Στο στάδιο αυτό , τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω προσομοιώσεις είναι ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει συγκρίσιμες τιμές για όλες τις προσομοιώσεις. Το  $R^2$  πλησιάζει την μονάδα για όλες τις τιμές.



Εικόνα 115: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



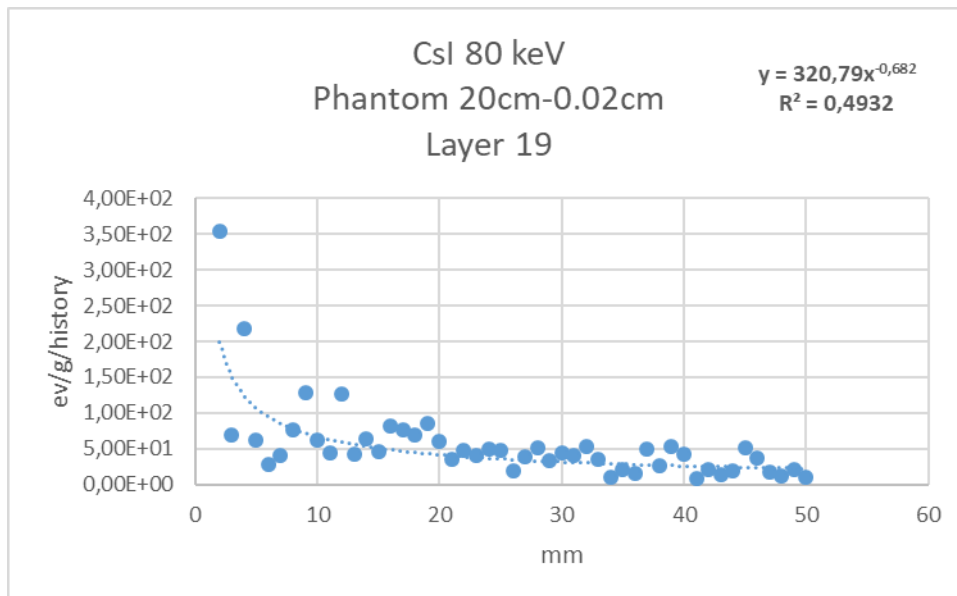
Εικόνα 116: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



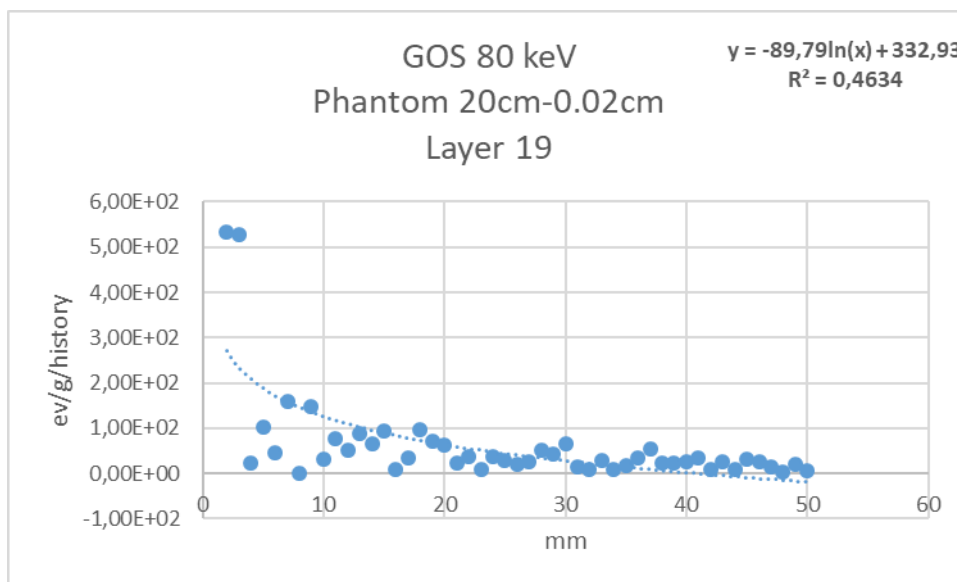
Εικόνα 117: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Παρατηρώντας τα γραφήματα σε αυτές τις προσομοιώσεις, διαπιστώνουμε ξανά ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει συγκρίσιμες τιμές για όλες τις περιπτώσεις. Το  $R^2$  σε όλα τα υλικά απέχει ελάχιστα από την μονάδα ( $R^2 > 0,95$ ).

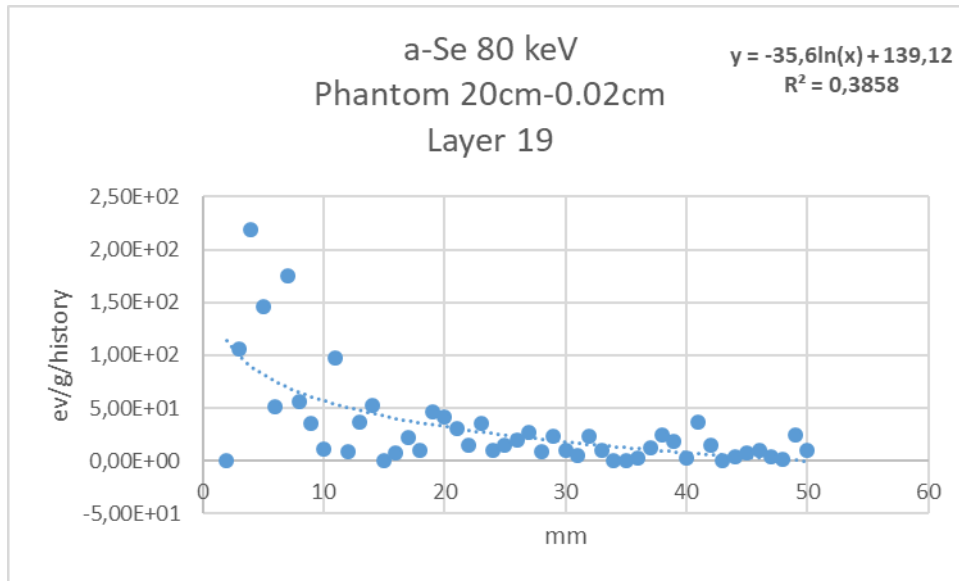
- Ομοίωμα 20cm και ανιχνευτή 0.02cm :



Εικόνα 118: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

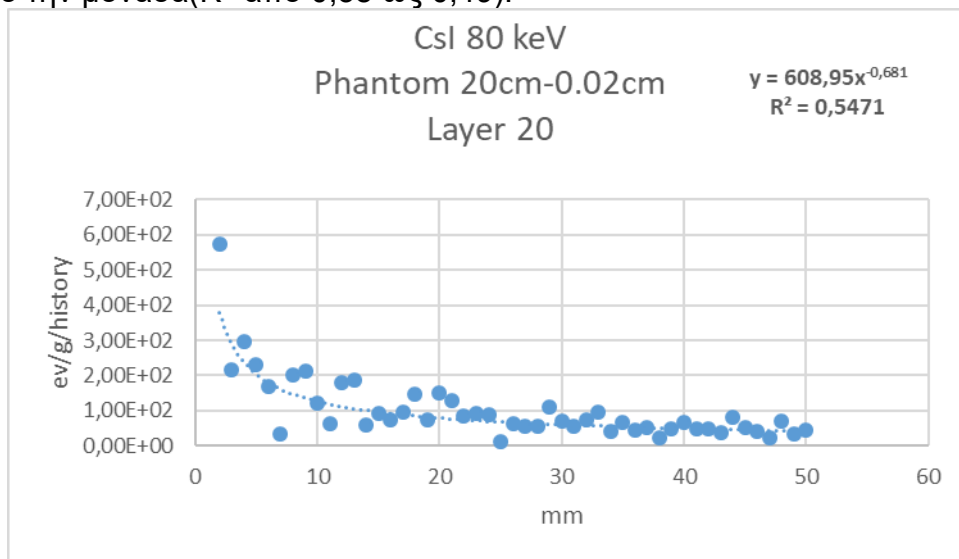


Εικόνα 119: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

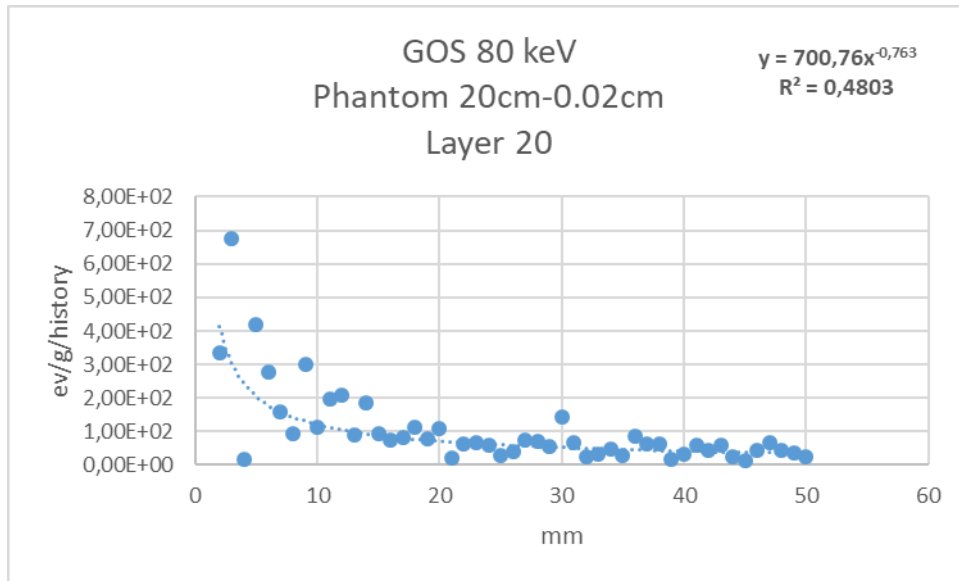


Εικόνα 120: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

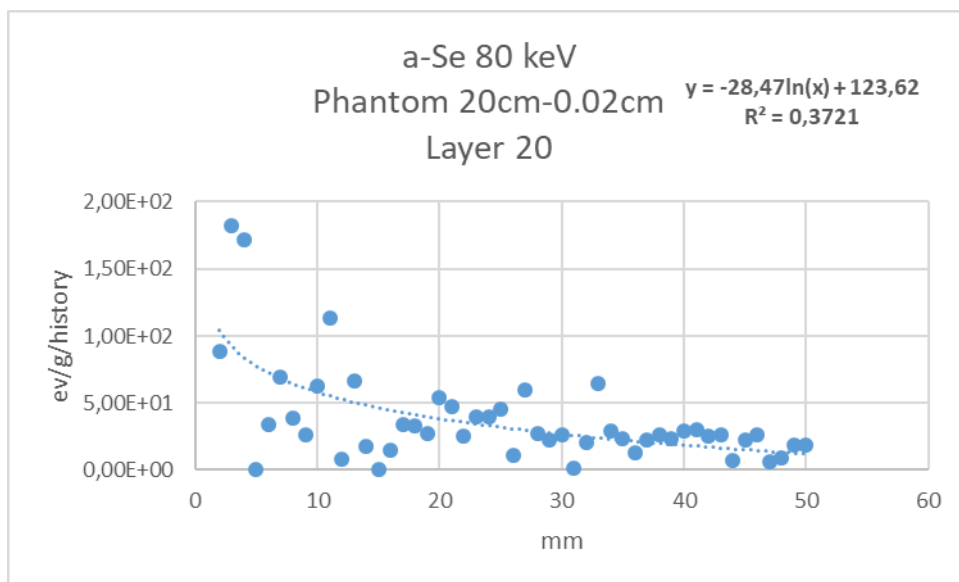
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω γραφήματα, η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι συγκρίσιμη για τα τρία υλικά. Το  $R^2$  σε όλα τα υλικά απέχει αρκετά από την μονάδα ( $R^2$  από 0,38 ως 0,49).



Εικόνα 121: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

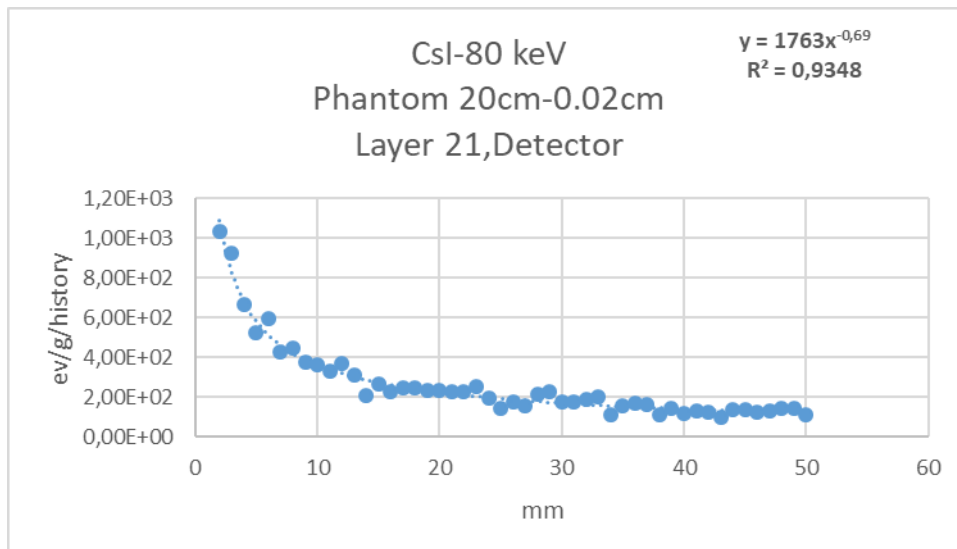


Εικόνα 122: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

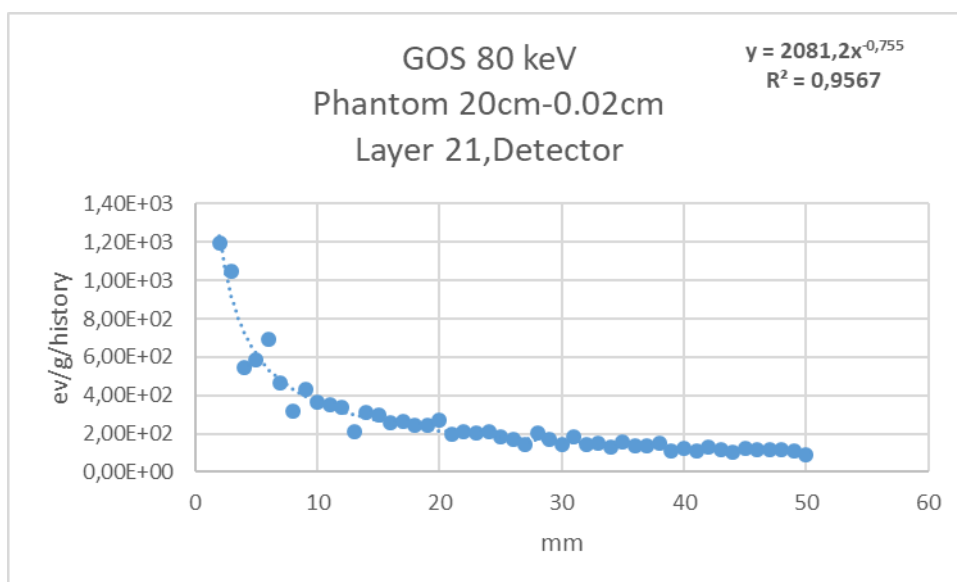


Εικόνα 123: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Στην περίπτωση αυτή από τα σχήματα παρατηρούμε ότι η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στο “μεταβατικό στάδιο” είναι συγκρίσιμη για όλα τα ομοιώματα. Θεωρητικά παρατηρείται μια μείωση της σκεδαζόμενης μετά τα 10 mm. Οι τιμές του R2 σε κάθε περίπτωση είναι μεταξύ 0.37 και 0.54.

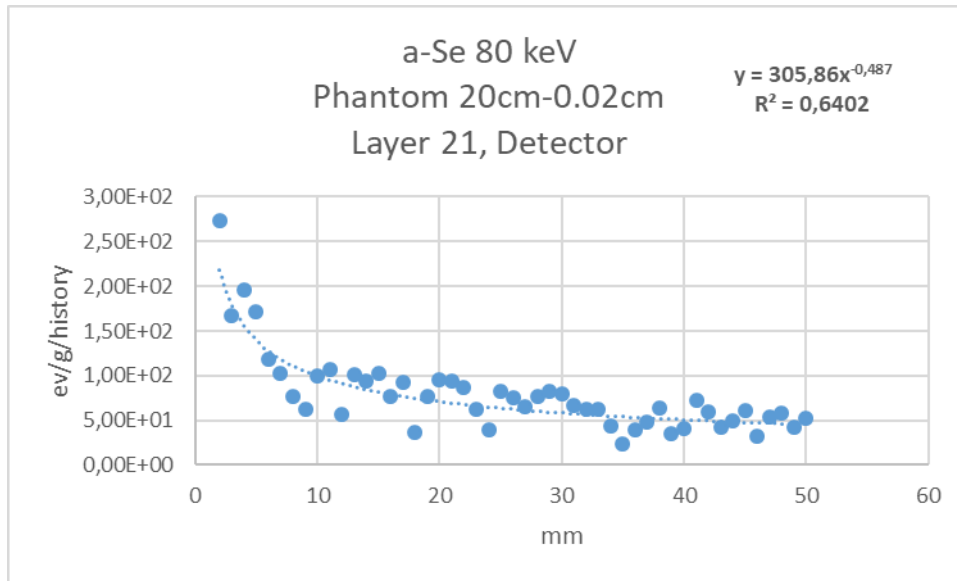


Εικόνα 124: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



Εικόνα 125: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



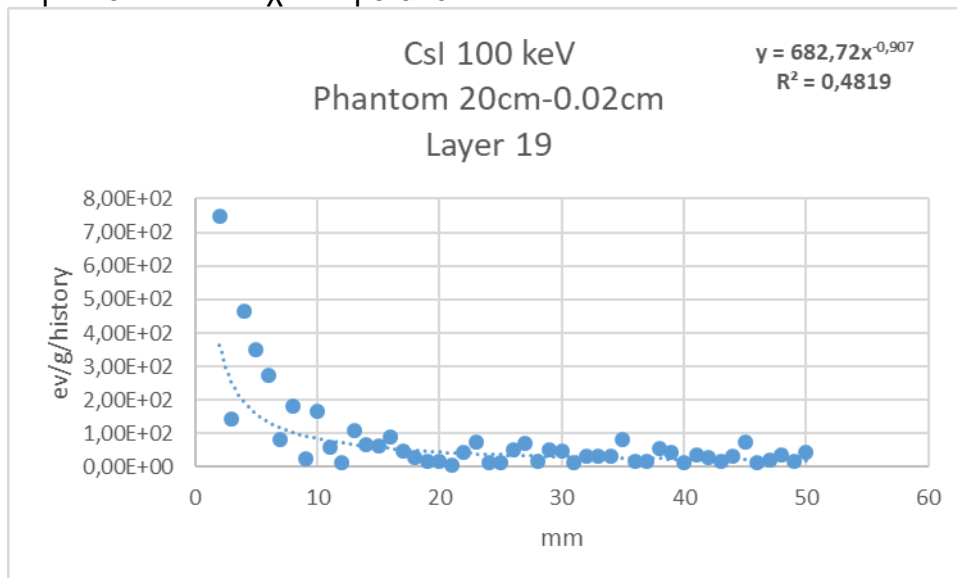


**Εικόνα 126:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

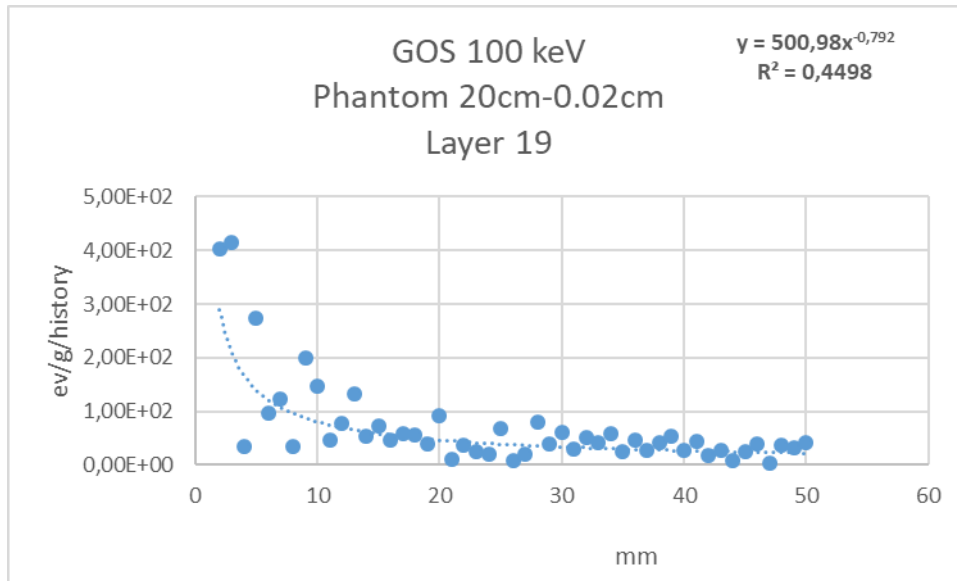
Στην περίπτωση αυτή, η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή είναι συγκρίσιμη και για τους δύο πρώτους ανιχνευτές (CSI,GOS). Στην περίπτωση του υλικού a-Se η κατανομή της σκεδαζόμενης δεν μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά ( $R^2= 0,64$ ).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την ενέργεια 100KV:

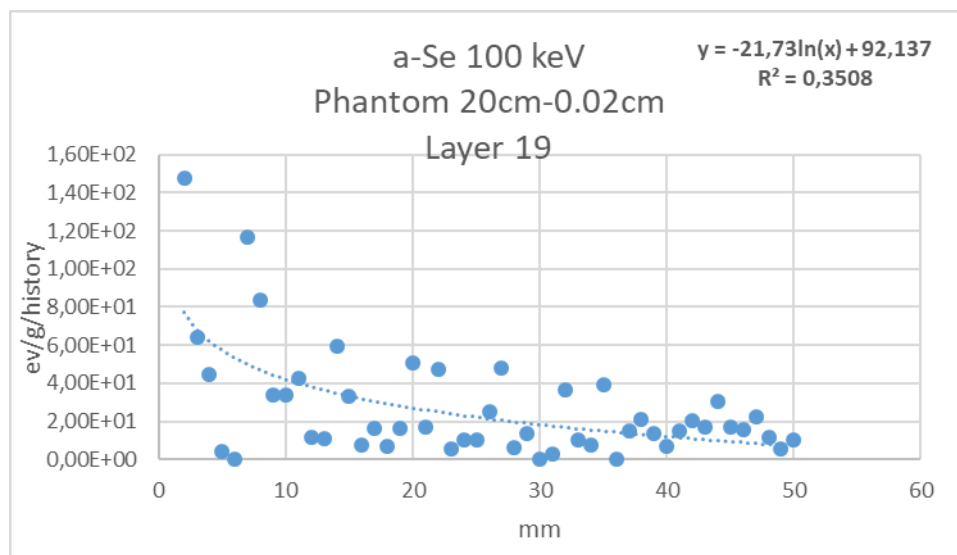
- Ομοίωμα 20cm και ανιχνευτή 0.02cm :



**Εικόνα 127:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

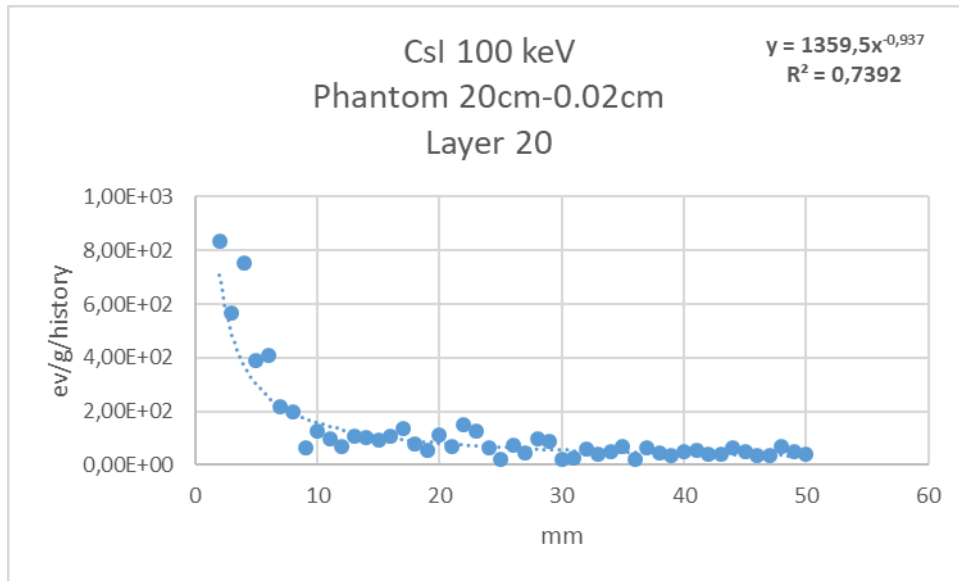


**Εικόνα 128:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

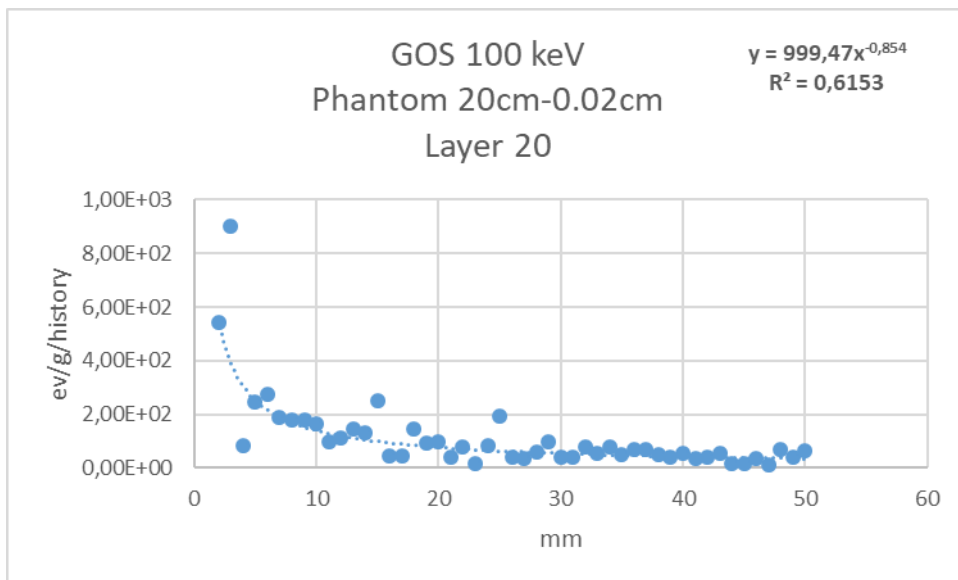


**Εικόνα 129:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

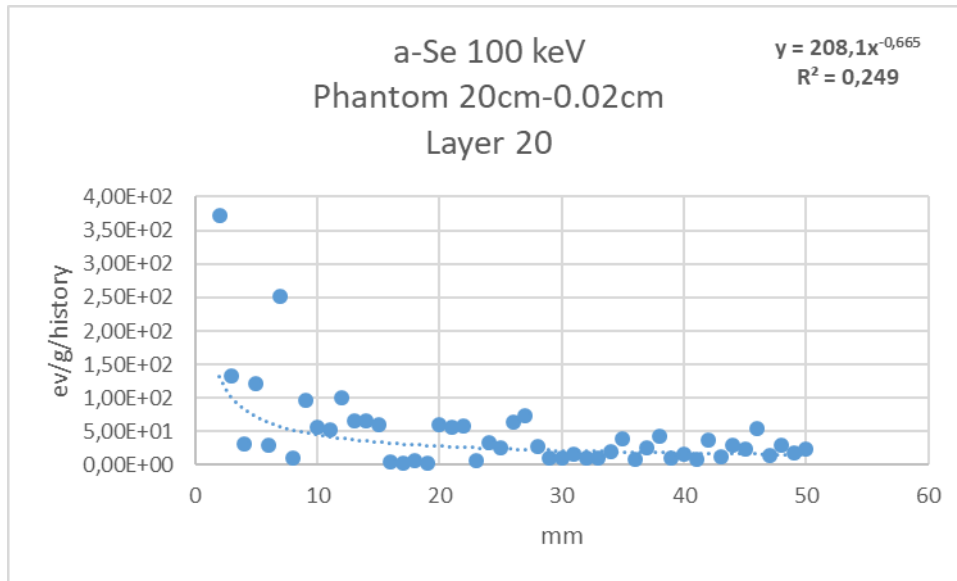
Τα γραφήματα αυτά παρουσιάζουν όσο αναφορά την κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία συγκρίσιμες τιμές. Μια ενδεικτική τιμή κοντά στην θέση 0 είναι  $4 \times 10^2$  eV/g/history. Για τις συγκεκριμένες συνθήκες η κατανομή της σκεδαζόμενης δεν μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά ( $R^2 < 0,48$ ).



Εικόνα 130: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

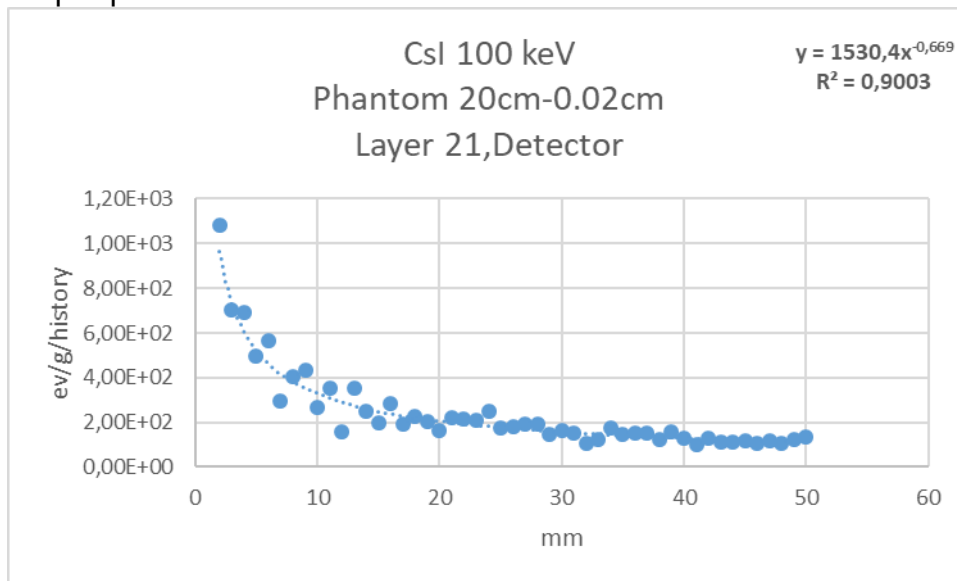


Εικόνα 131: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS

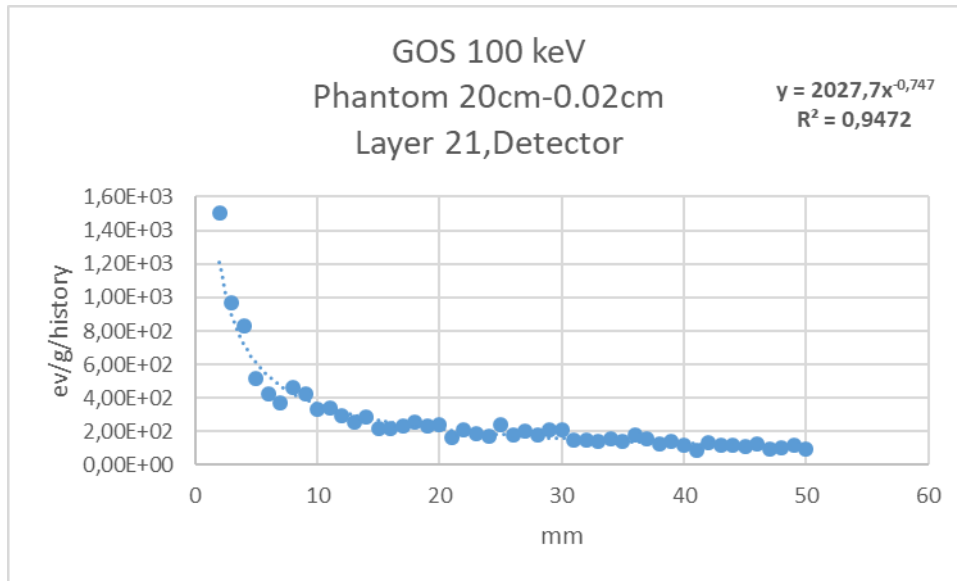


**Εικόνα 132:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

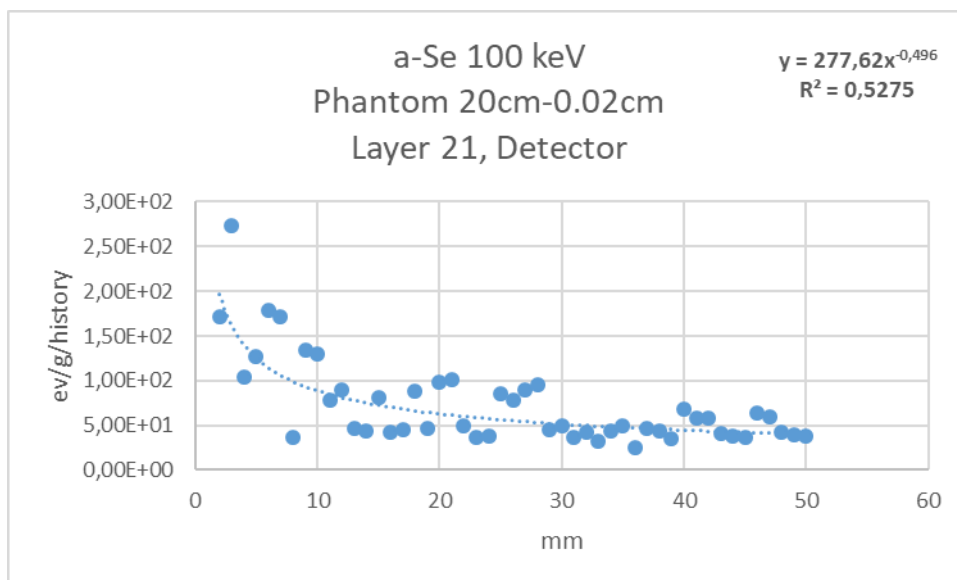
Στις παραπάνω περιπτώσεις οι τιμές είναι συγκρίσιμες στο “μεταβατικό στάδιο” του ομοιώματος προς τον ανιχνευτή για τα υλικά CSI και GOS. Αντίθετα, για τον ανιχνευτή με το υλικό a-Se η κατανομή της σκεδαζόμενης δεν μπορεί να προσομοιωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό.



**Εικόνα 133:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



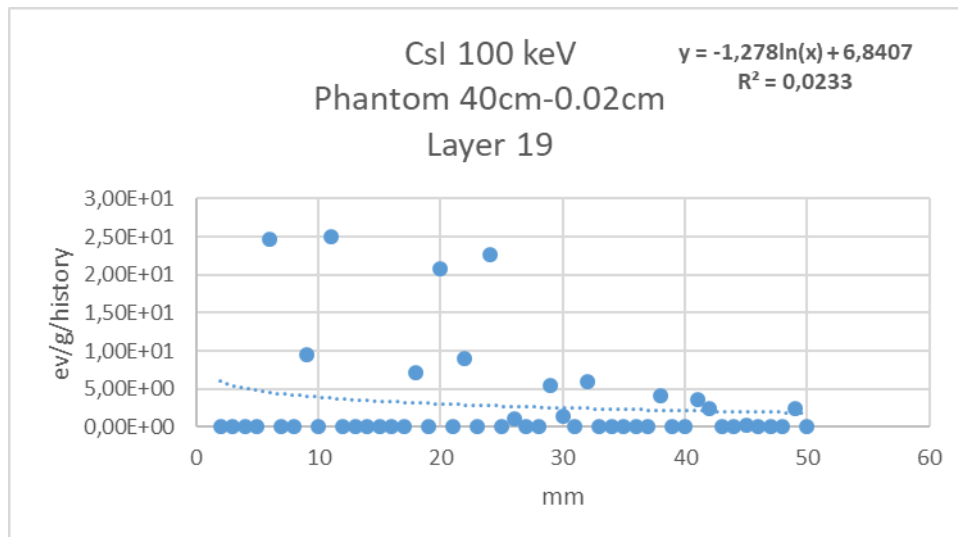
**Εικόνα 134:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



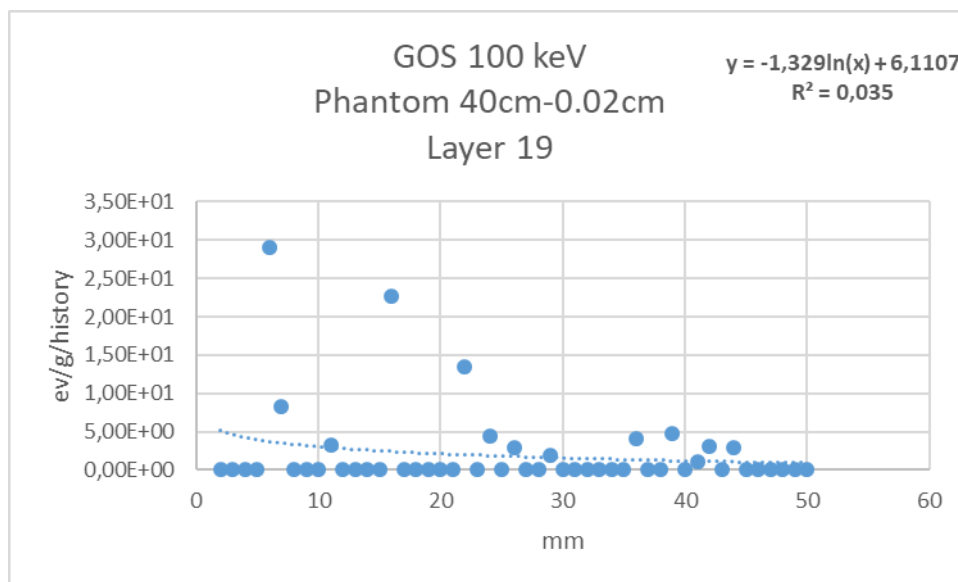
**Εικόνα 135:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se

Για τα παραπάνω σχήματα τα οποία αναφέρονται στον ανιχνευτή , με μια γρήγορη ματιά καταλαβαίνουμε την ομοιομορφία της κατανομής της δόσης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας για τους ανιχνευτές(CSI,GOS). Μια ενδεικτική τιμή κοντά στην θέση 0 είναι περίπου  $1,20 \times 10^3$  με  $R^2 > 0,94$ . Δεν ισχύει όμως το ίδιο για τον ανιχνευτή με a-Se.

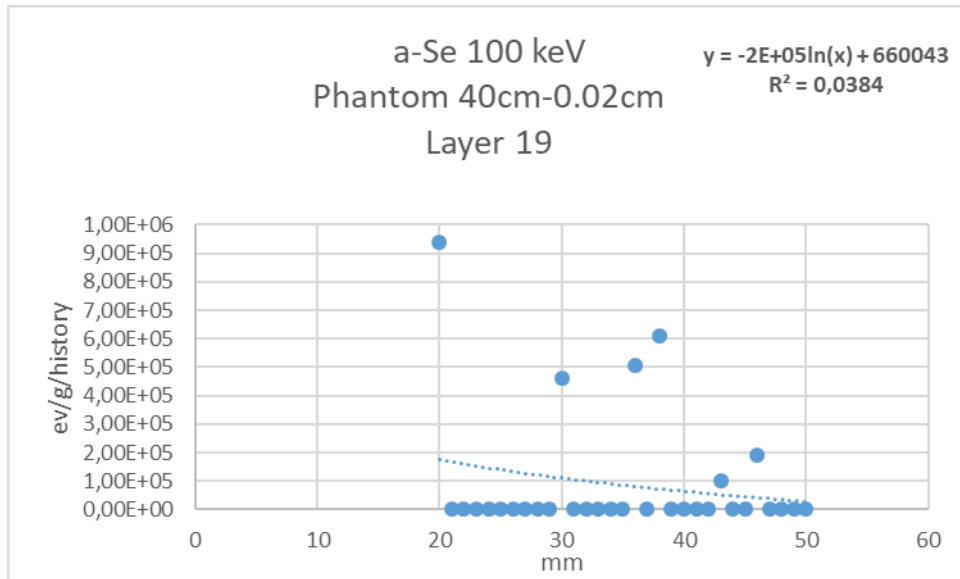
- Ομοίωμα 40cm και ανιχνευτή 0.02cm :



Εικόνα 136: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

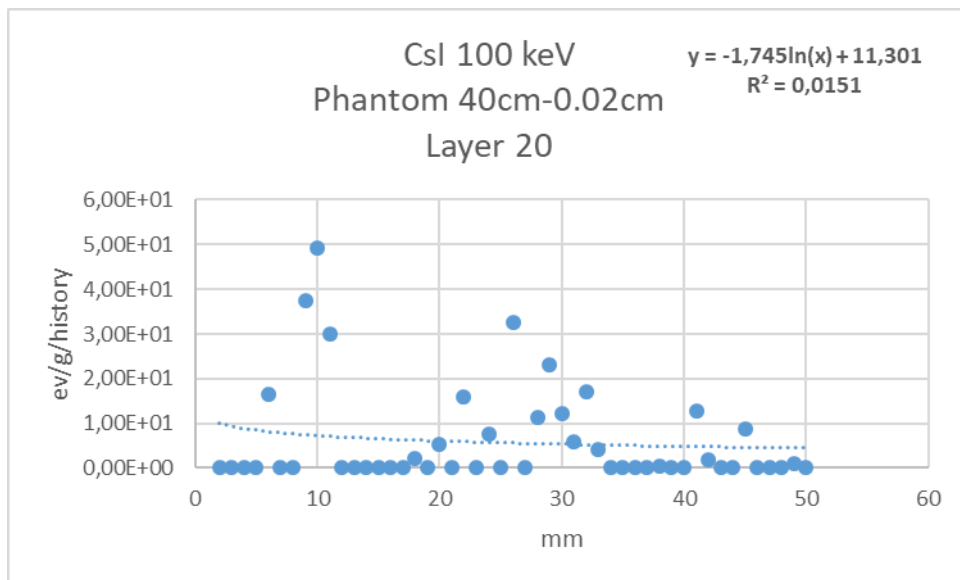


Εικόνα 137: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

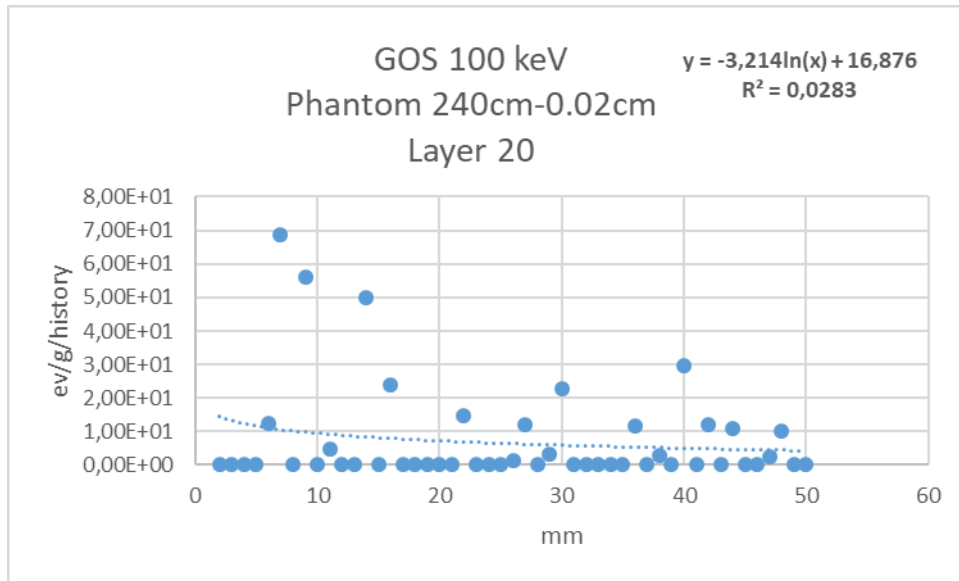


**Εικόνα 138:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

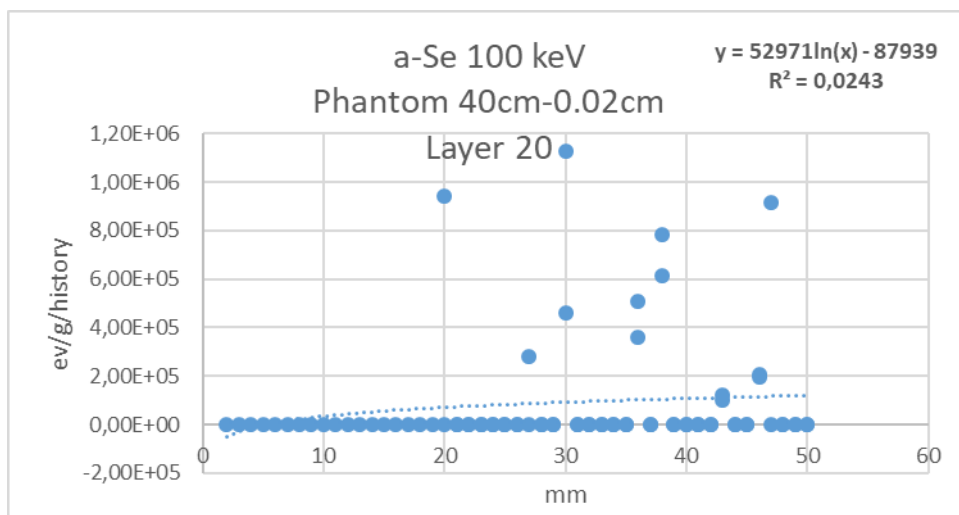
Στις περιπτώσεις αυτές, μεγαλώνοντας την απόσταση του ομοιώματος παρατηρούμε μια ιδιαίτερη ανομοιομορφία στην εναπόθεση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Οι τιμές κοντά στην θέση 0 είναι συγκρίσιμες για τα δύο πρώτα ομοιώματα, όμως η σκέδαση για το ομοίωμα a-Se αλλάζει εντελώς, καθώς παρατηρείται ότι σκεδαζόμενη ακτινοβολία περιγράφεται μεταξύ 20mm ως 50 mm. Το  $R^2$  σε όλες τις περιπτώσεις είναι πάρα πολύ μικρό.



**Εικόνα 139:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



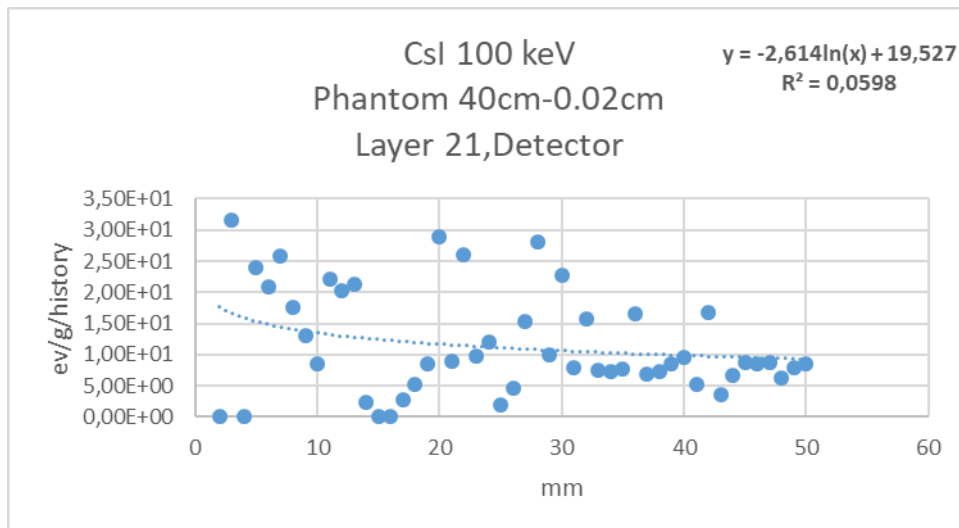
Εικόνα 140: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



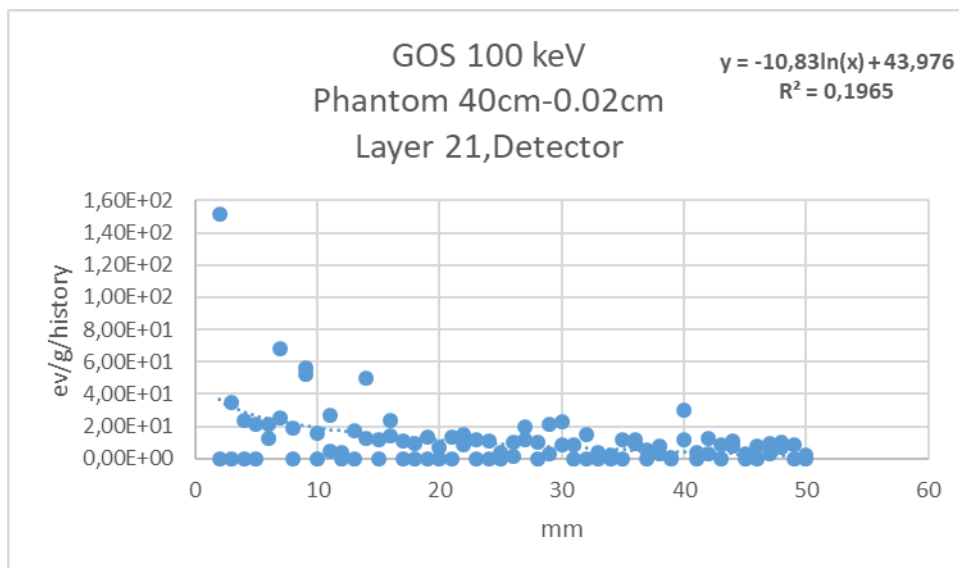
Εικόνα 141: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se

Παρατηρώντας τα γραφήματα στο “μεταβατικό στάδιο” βλέπουμε μια ανομοιομορφία της κατανομής της ροής της ενέργειας για την σκεδαζόμενη ακτινοβολία. Το  $R^2$  είναι εξαιρετικά μικρό σε όλες τις προσομοιώσεις.

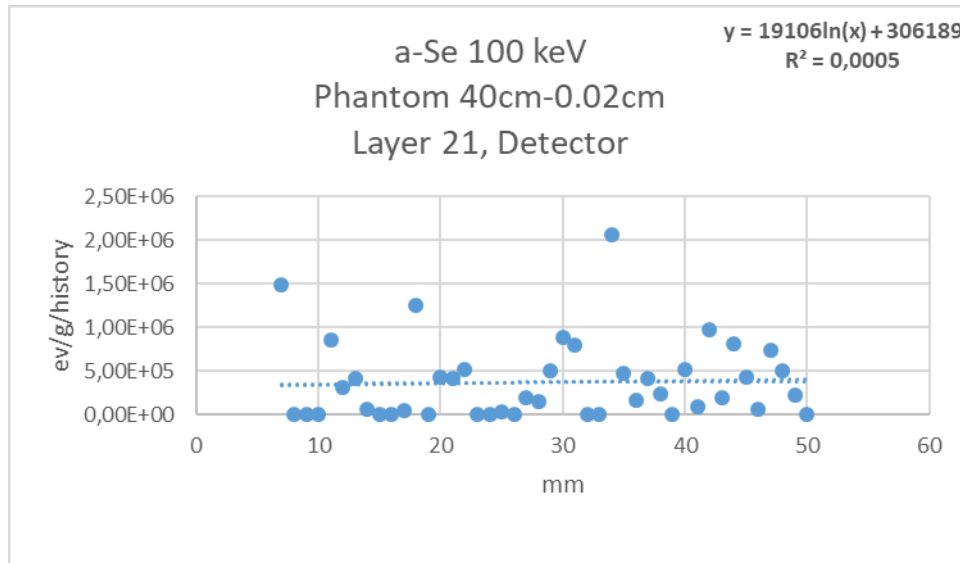




Εικόνα 142: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



Εικόνα 143: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

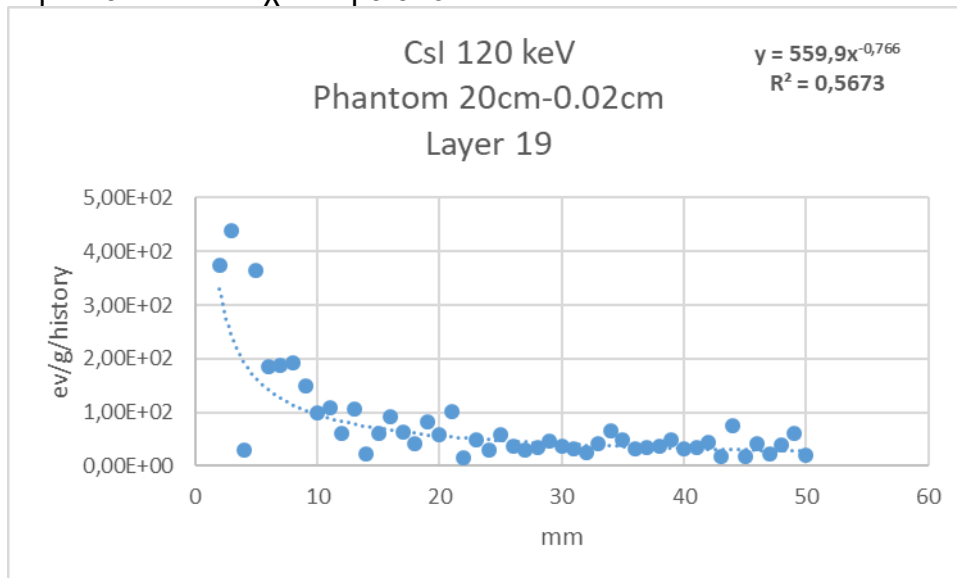


**Εικόνα 144:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

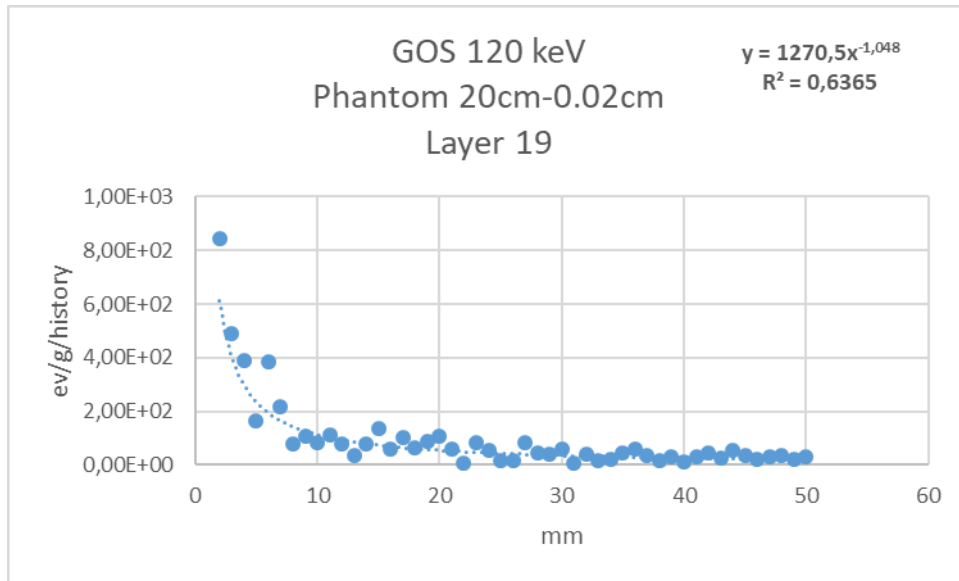
Στην περίπτωση αυτή, συνεχίζεται η ανομοιομορφία της κατανομής της ροής της ενέργειας για την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στους ανιχνευτές. και στις τρεις περιπτώσεις, το  $R^2$  απέχει αρκετά από την μονάδα.

Εν συνεχεία ακολουθούν τα αποτελέσματα για την ενέργεια 120 KV:

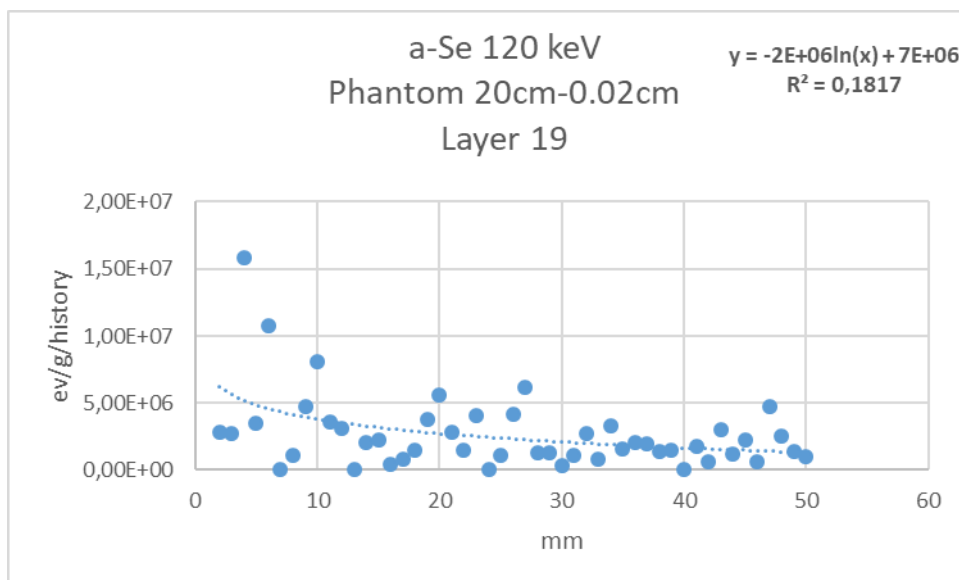
- Ομοίωμα 20cm και ανιχνευτή 0.02cm :



**Εικόνα 145:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

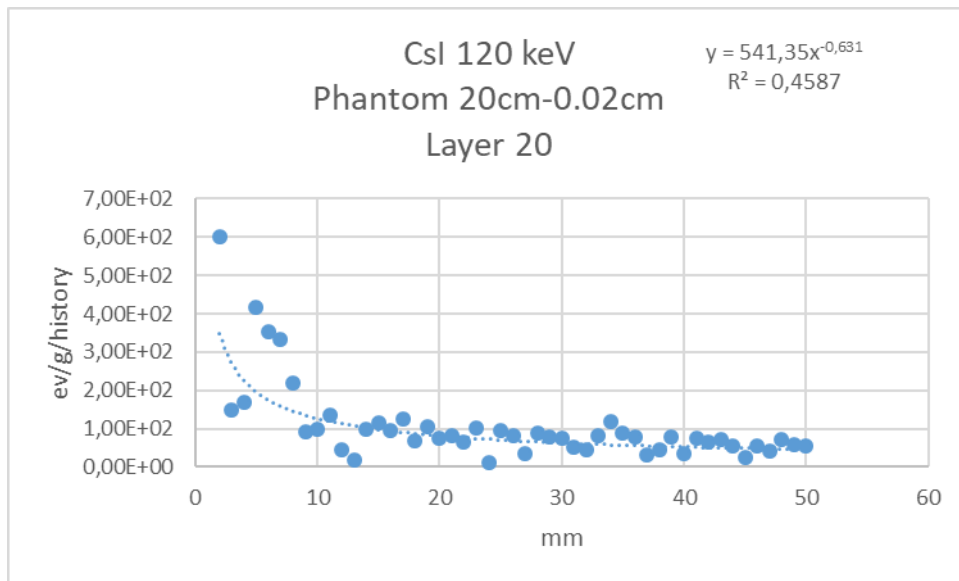


**Εικόνα 146:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

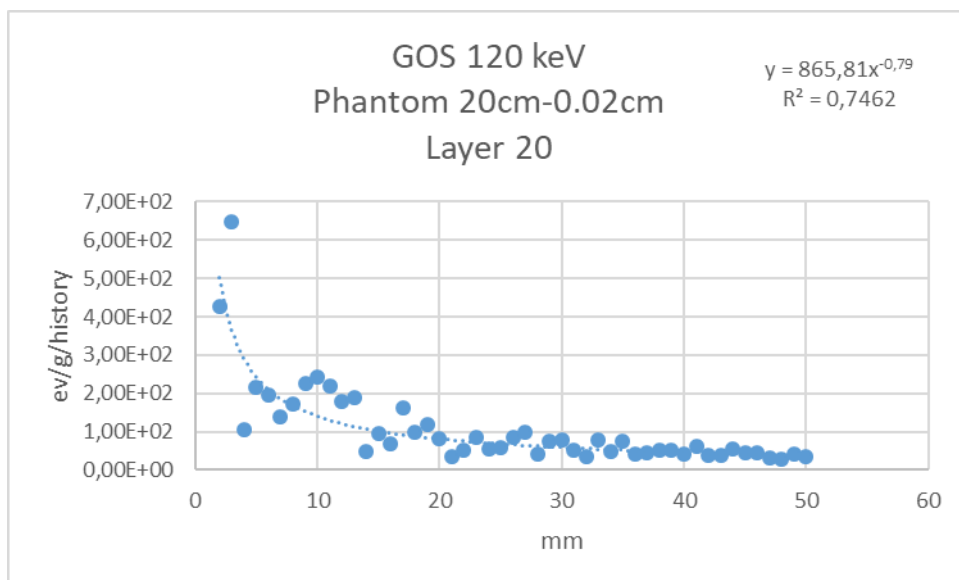


**Εικόνα 147:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

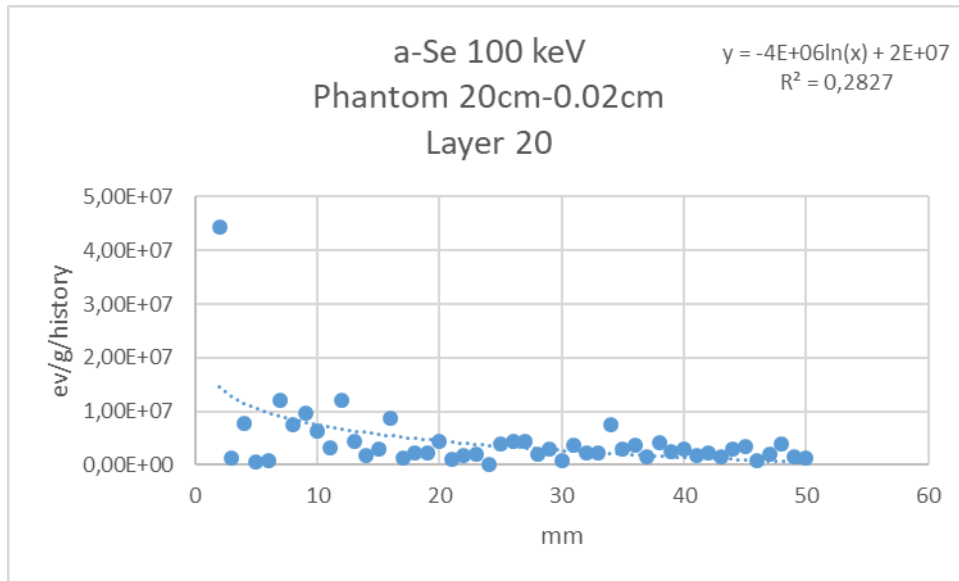
Στην ενέργεια αυτή, η κατανομή της δόσης της σκεδαζόμενης ενέργειας των παραπάνω ομοιωμάτων επανέρχεται σε καλύτερα “στατιστικά” σε συγκριση με την προηγούμενη ενέργεια (100KV). Οι τιμές είναι συγκρίσιμες για τα δύο πρώτα ομοιώματα καθώς ακολουθούν καλύτερη προσομοίωση ( $R^2 > 0,63$ ) σε σύγκριση με το ομοίωμα με ανιχνευτή a-Se ( $R^2 < 0,18$ ).



Εικόνα 148: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

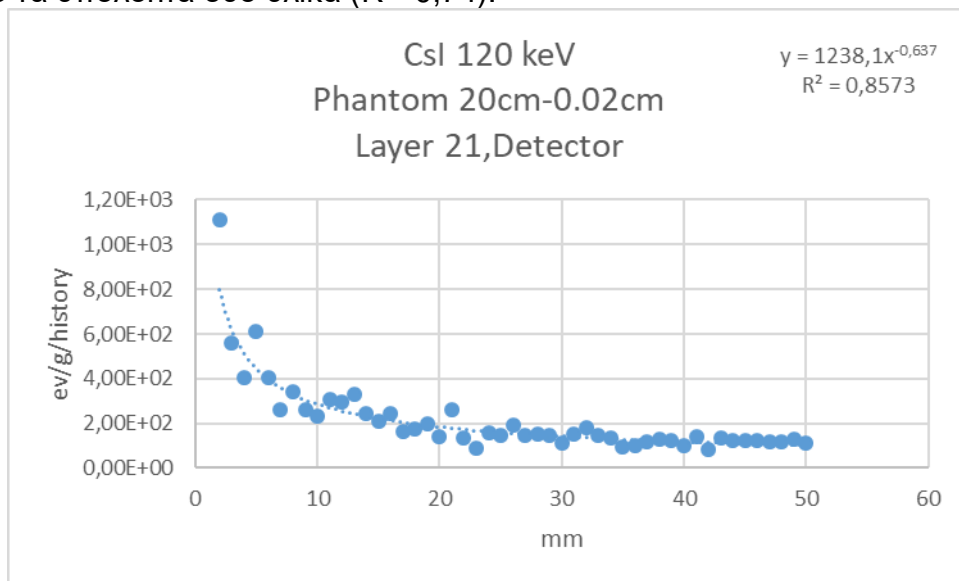


Εικόνα 149: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

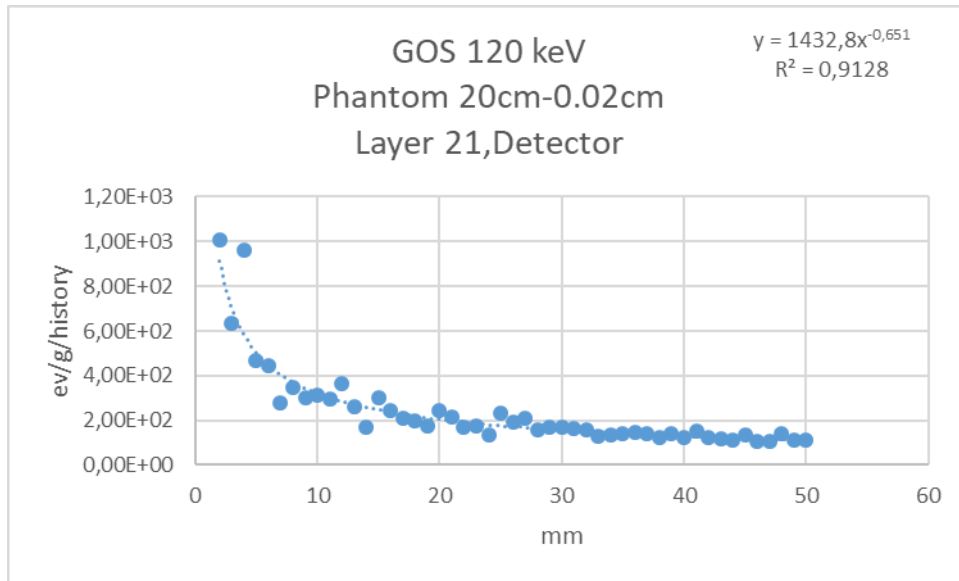


Εικόνα 150: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

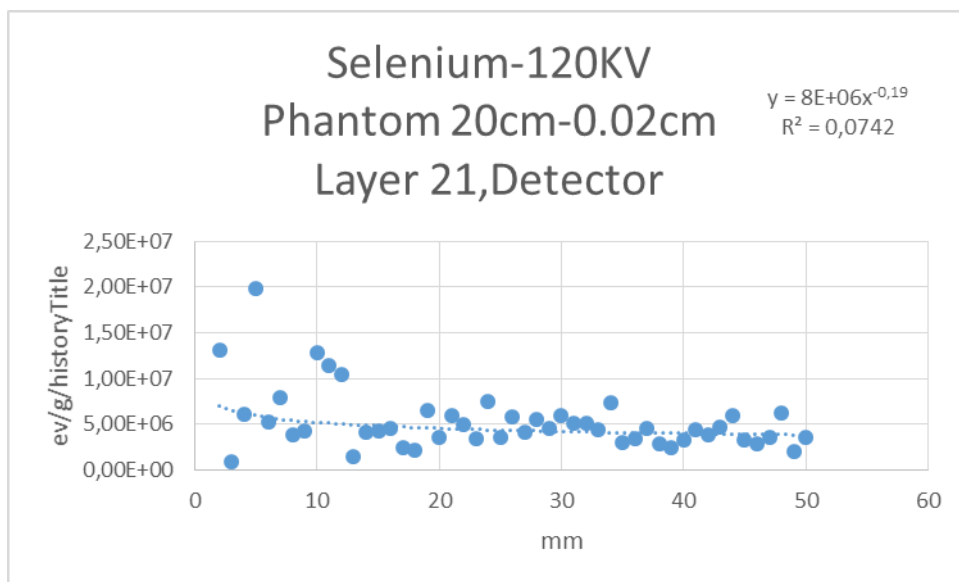
Στο στάδιο αυτό το υλικό GOS παρουσιάζει όσο αναφορά την σκεδαζόμενη ακτινοβολία μεγαλύτερες τιμές. Η κατανομή της σκεδαζόμενης μπορεί να προσομοιωθεί σε καλύτερο βαθμό από τα υπόλοιπα δύο υλικά ( $R^2=0,74$ ).



Εικόνα 151: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



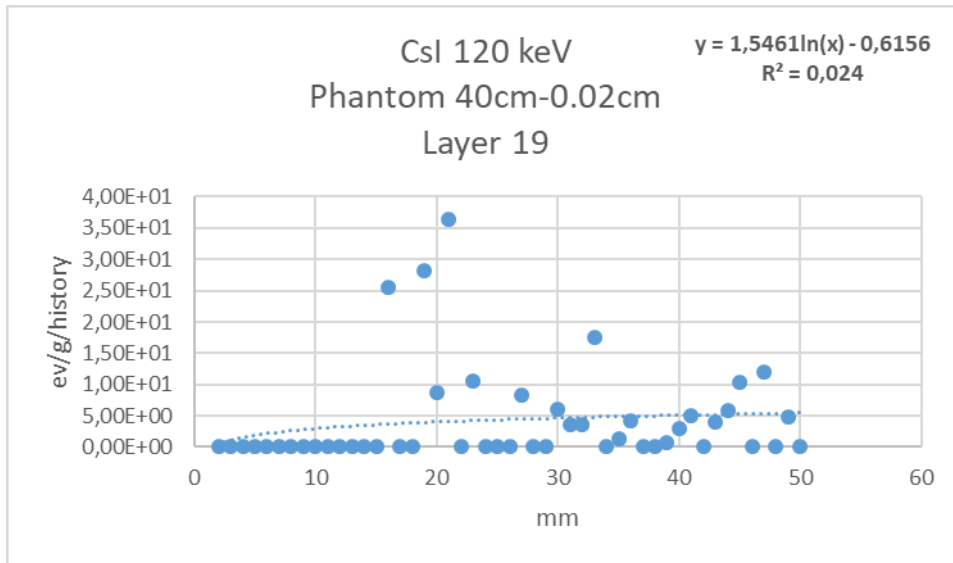
Εικόνα 152: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



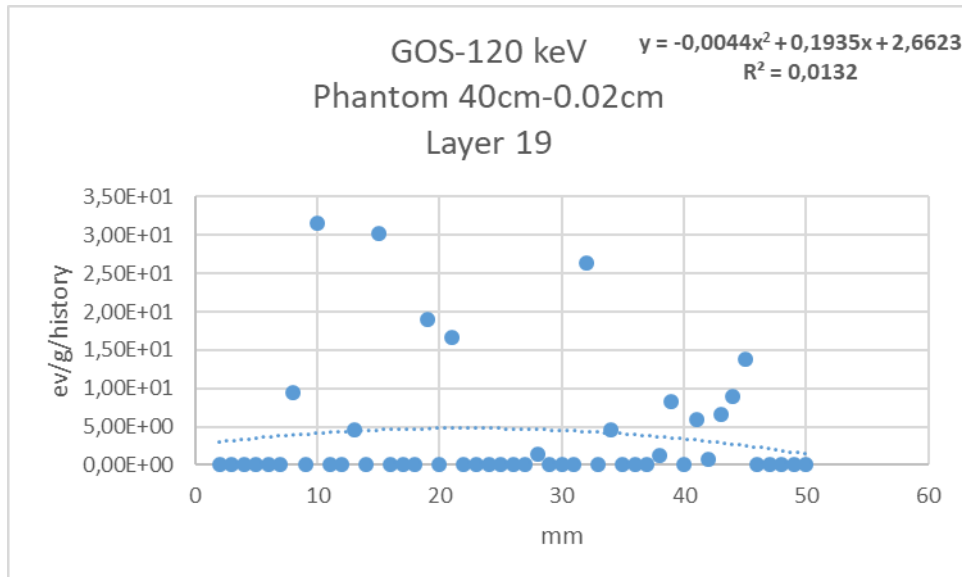
Εικόνα 153: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Στην περίπτωση αυτή, οι δύο πρώτοι ανιχνευτές παρουσιάζουν συγκρίσιμες τιμές .Η σκεδαζόμενη πρακτικά μειώνεται σημαντικά μετά τα 10 mm. Το  $R^2$  κυμαίνεται <0,91.

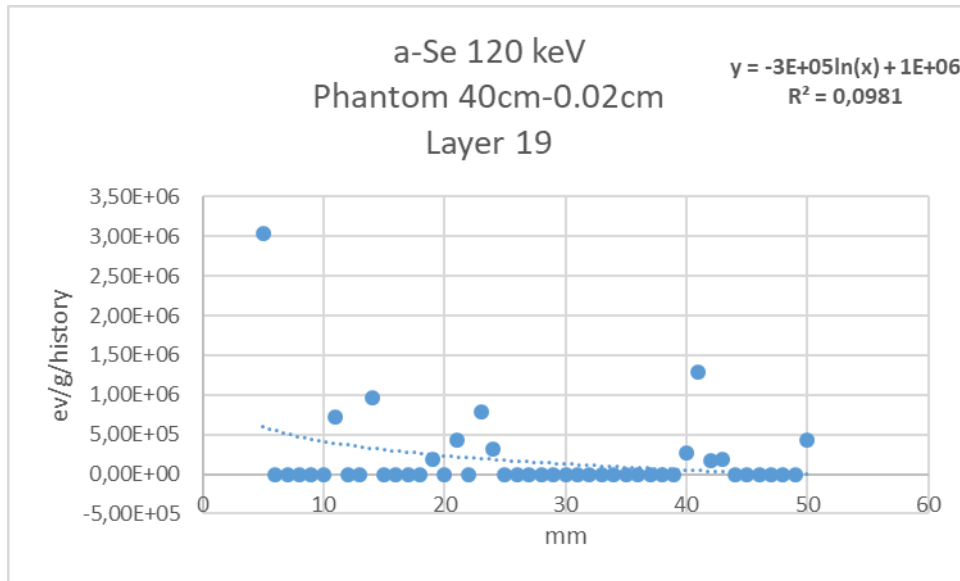
- Ομοίωμα 40cm και ανιχνευτή 0.02cm :



**Εικόνα 154:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

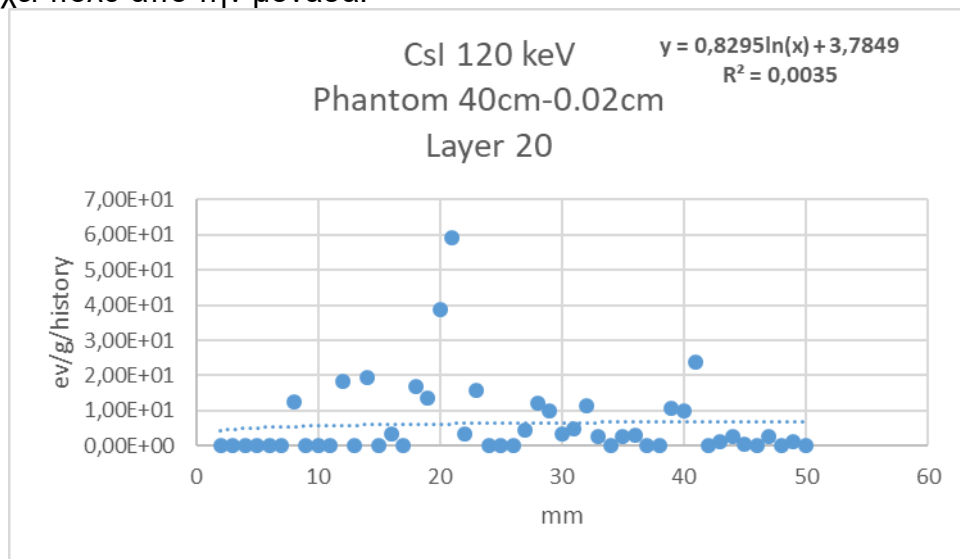


**Εικόνα 155:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



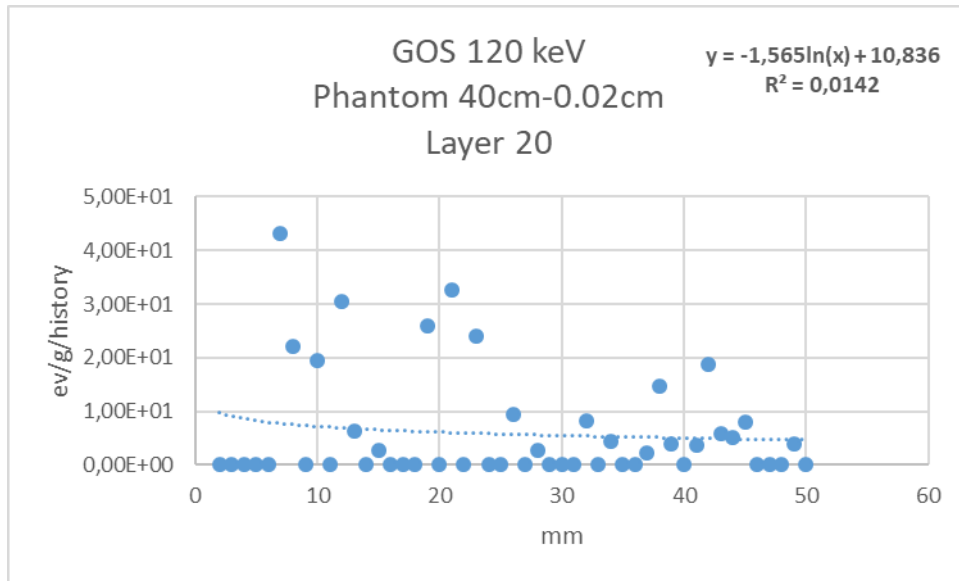
Εικόνα 156: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Στα παραπάνω γραφήματα παρατηρείται ότι στην κατανομή εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας παρατηρείται μια ανομοιομορφία για όλες τις προσομοιώσεις. Το  $R^2$  απέχει πολύ από την μονάδα.

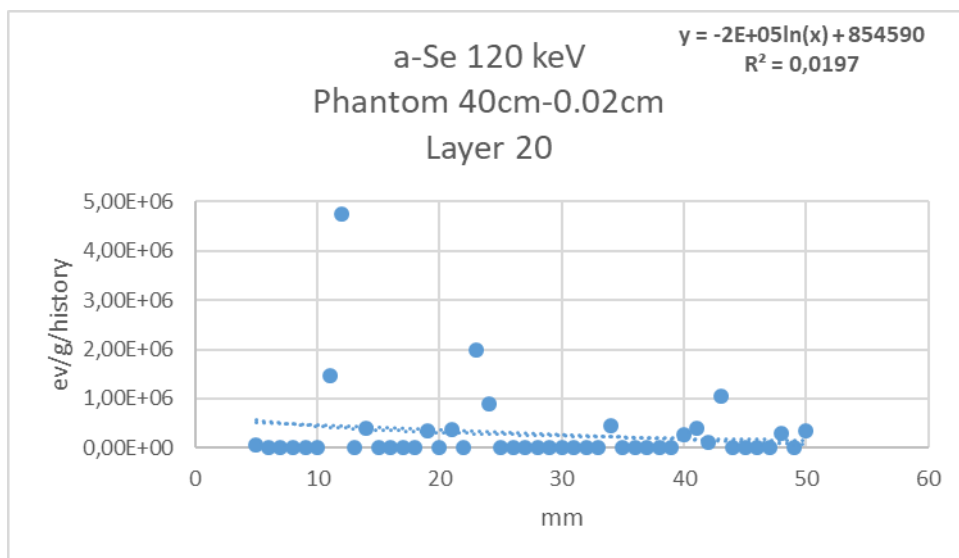


Εικόνα 157: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



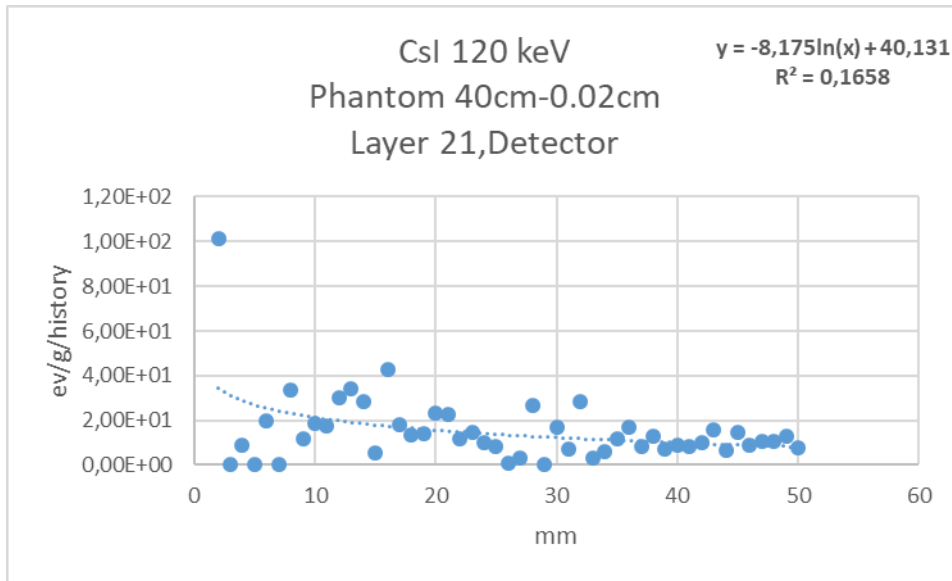


Εικόνα 158: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

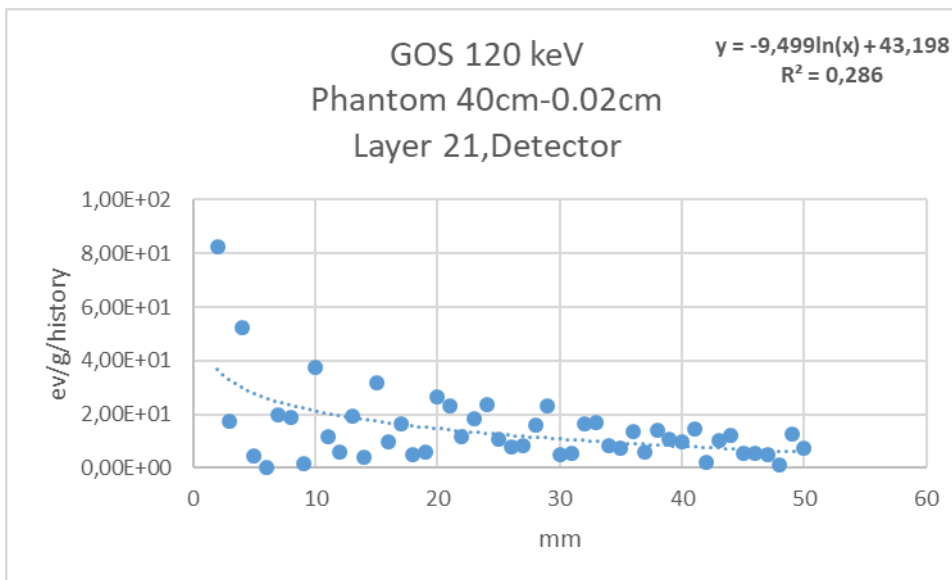


Εικόνα 159: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

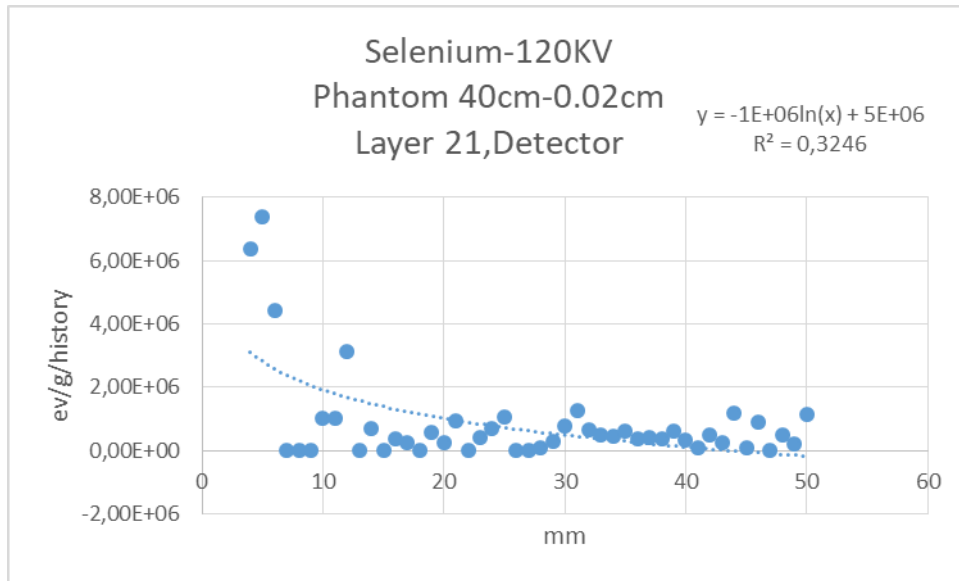
Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε ότι η κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο “μεταβατικό στάδιο” του ομοιώματος προς τον ανιχνευτή, έχει μεγαλύτερες τιμές για τον ομοίωμα με τον ανιχνευτή a-Se.



Εικόνα 160: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



Εικόνα 161: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

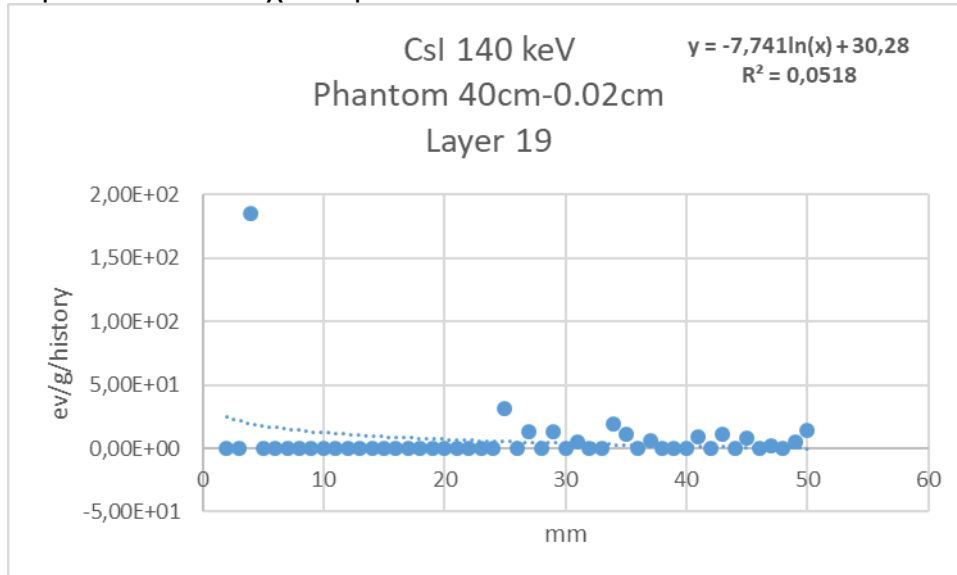


**Εικόνα 162:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

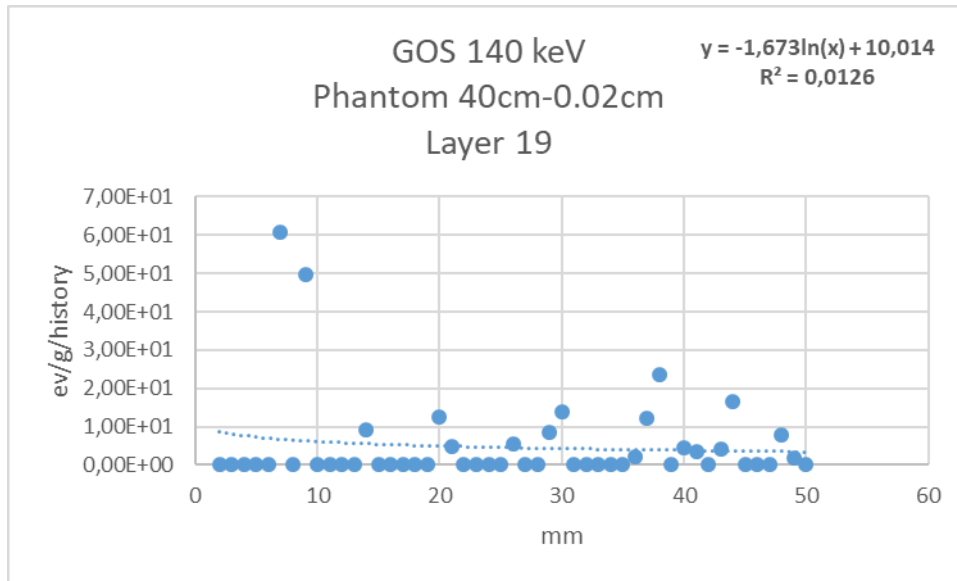
Στα παραπάνω διαγράμματα ,παρατηρούμε ότι ο ανιχνευτής με το υλικό a-Se παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές στην κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας όσο αναφορά την σκεδαζόμενη ακτινοβολία. Η τιμή του  $R^2$  σε κάθε περίπτωση απέχει αρκετά από την μονάδα.

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα για την ενέργεια 140KV :

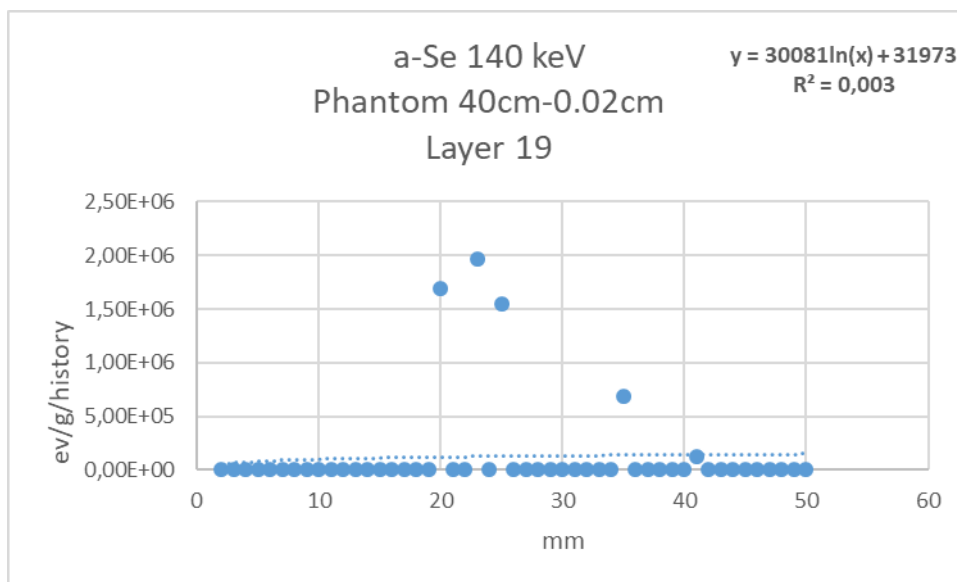
- Ομοίωμα 40cm και ανιχνευτή 0.02cm :



**Εικόνα 163:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό Csl.

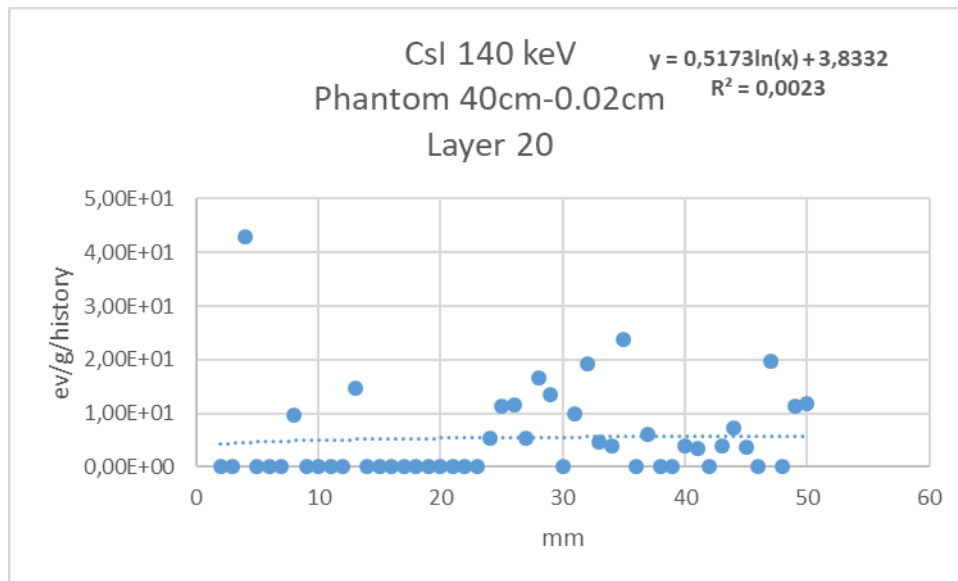


Εικόνα 164: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

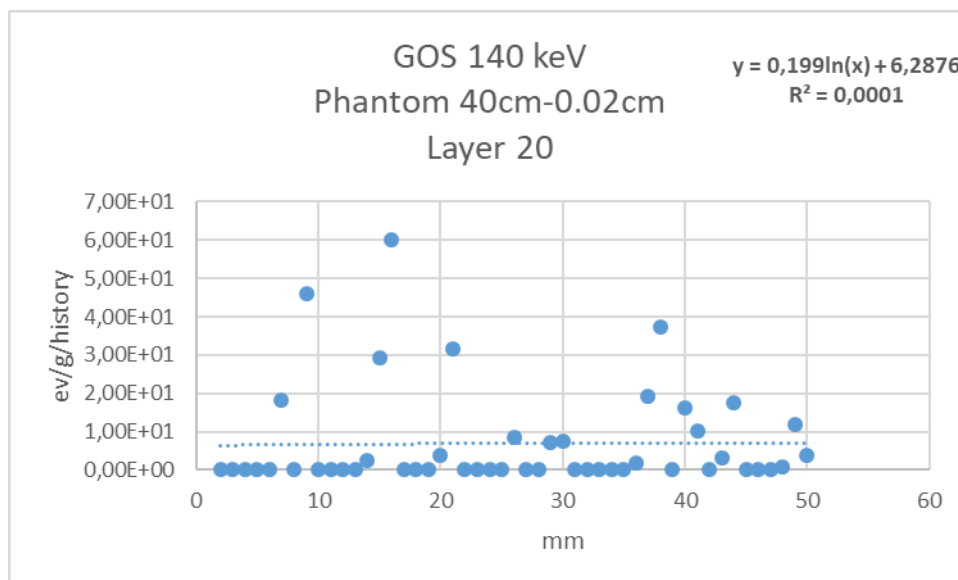


Εικόνα 165: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

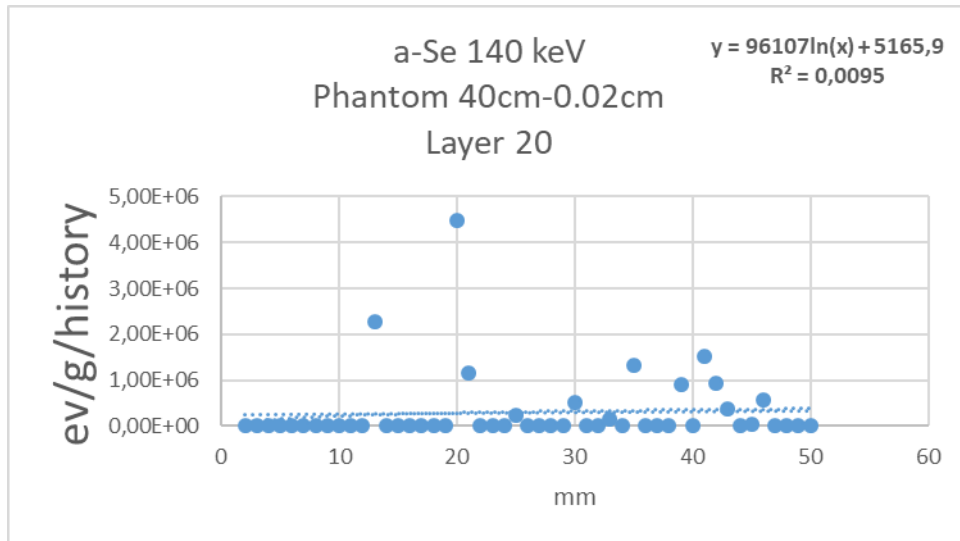
Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε ότι η κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας έχει μεγαλύτερες τιμές για τον ομοίωμα με τον ανιχνευτή a-Se. Σε όλες τις περιπτώσεις το  $R^2$  απέχει σε μεγάλο ποσοστό από την μονάδα.



Εικόνα 166: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

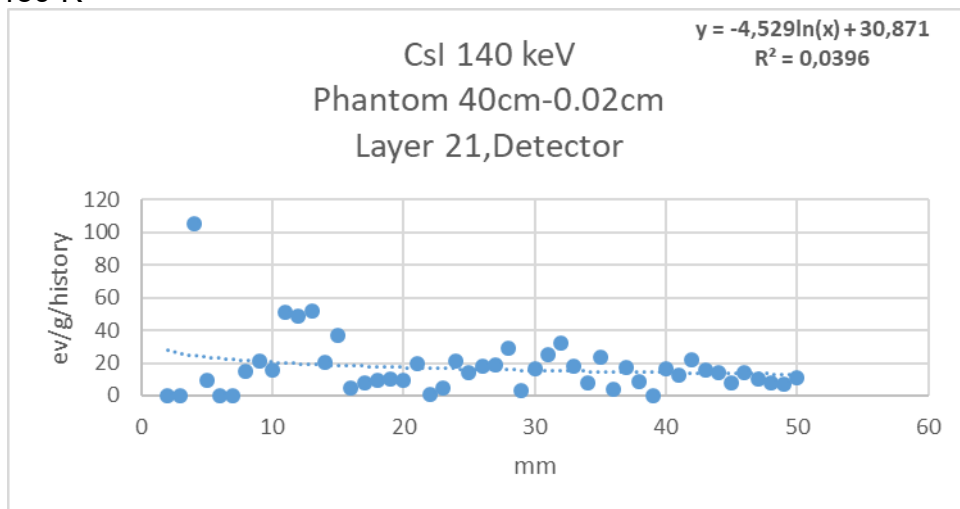


Εικόνα 167: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

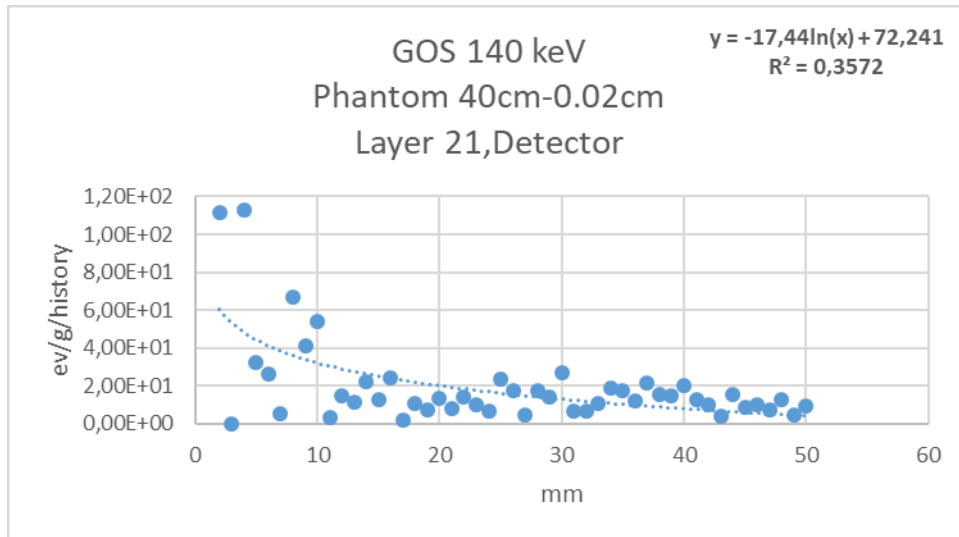


Εικόνα 168: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

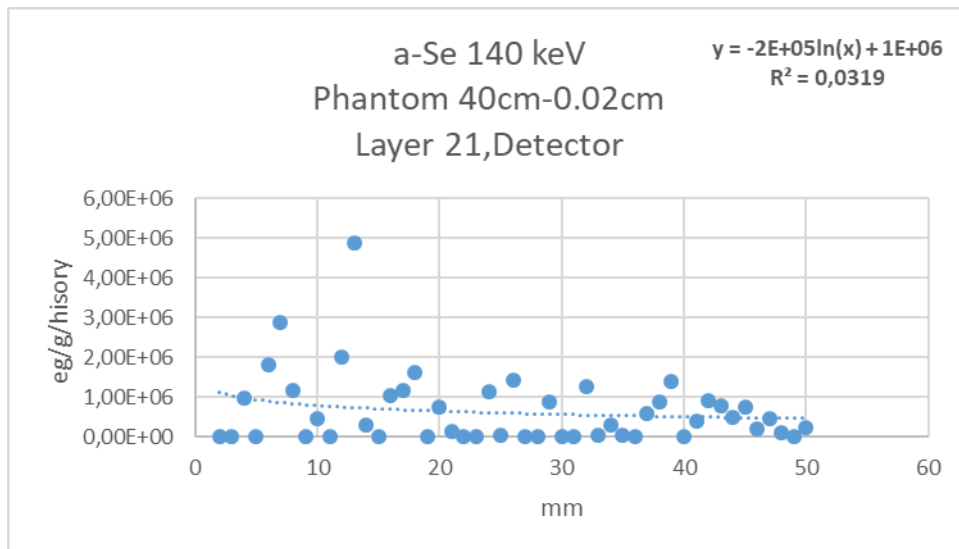
Στις παραπάνω προσομοιώσεις η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι συγκρίσιμη και για τις τρεις προσομοιώσεις. Για τις συγκεκριμένες συνθήκες η κατανομή της σκεδαζόμενης δεν μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά λόγω του μικρού ποσοστού του  $R^2$ .



Εικόνα 169: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



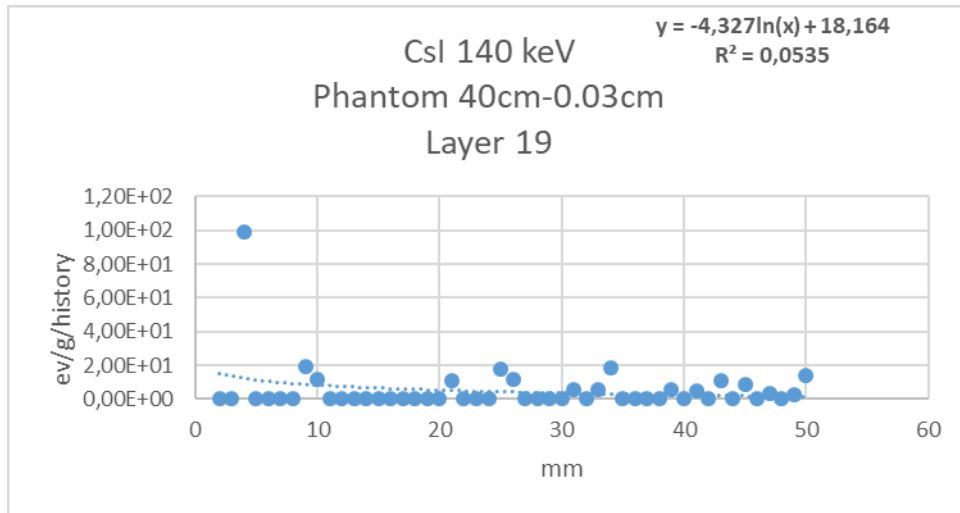
Εικόνα 170: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



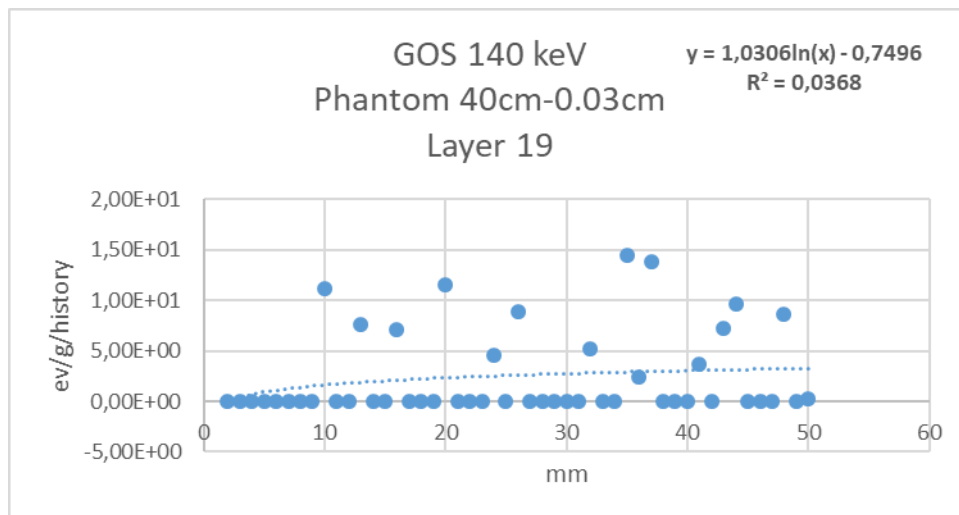
Εικόνα 171: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή έχει μεγαλύτερες τιμές για το υλικό a-Se. Ομοίως σε αυτές τις προσομοιώσεις το  $R^2$  απέχει σε μεγάλο ποσοστό από την μονάδα.

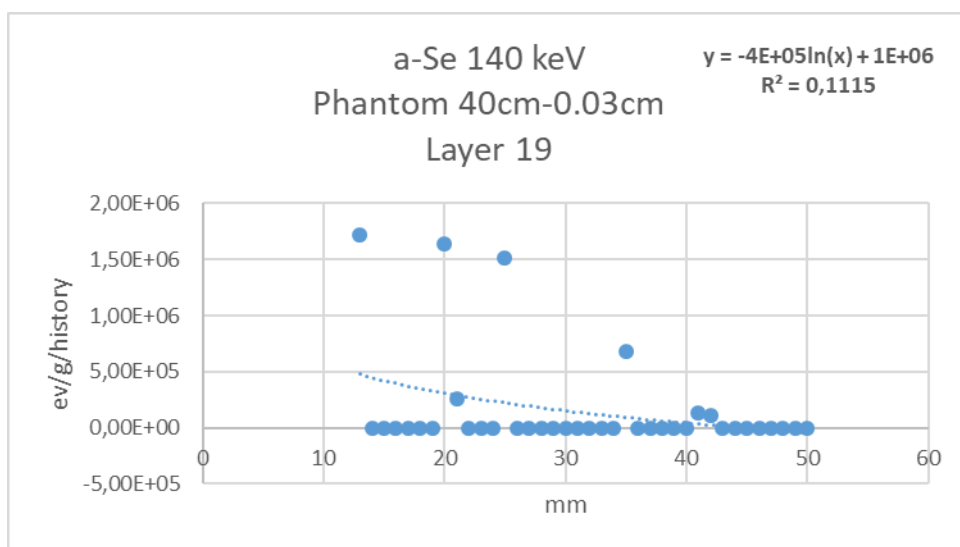
- Ομοίωμα 40cm και ανιχνευτή 0.03cm :



**Εικόνα 172:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



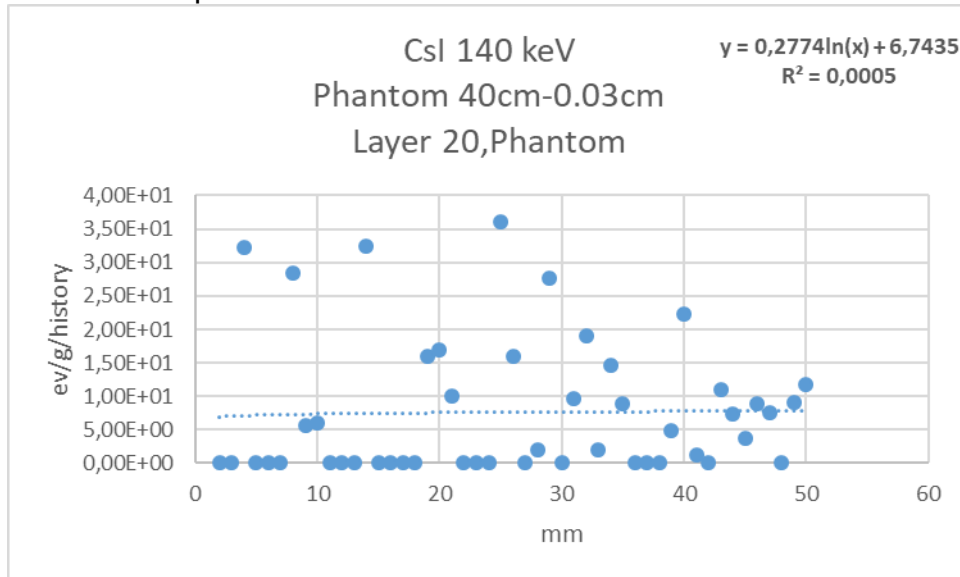
**Εικόνα 173:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



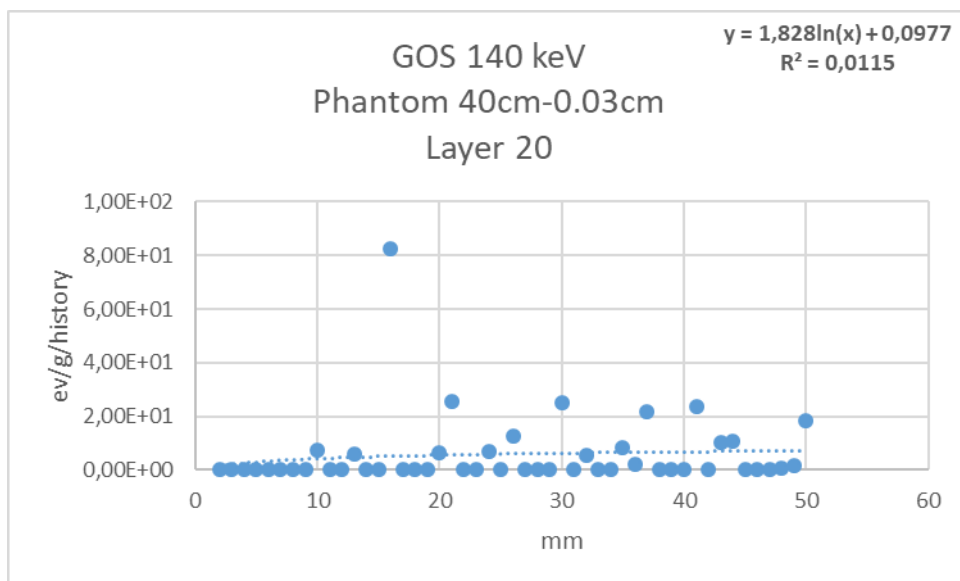
**Εικόνα 174:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.



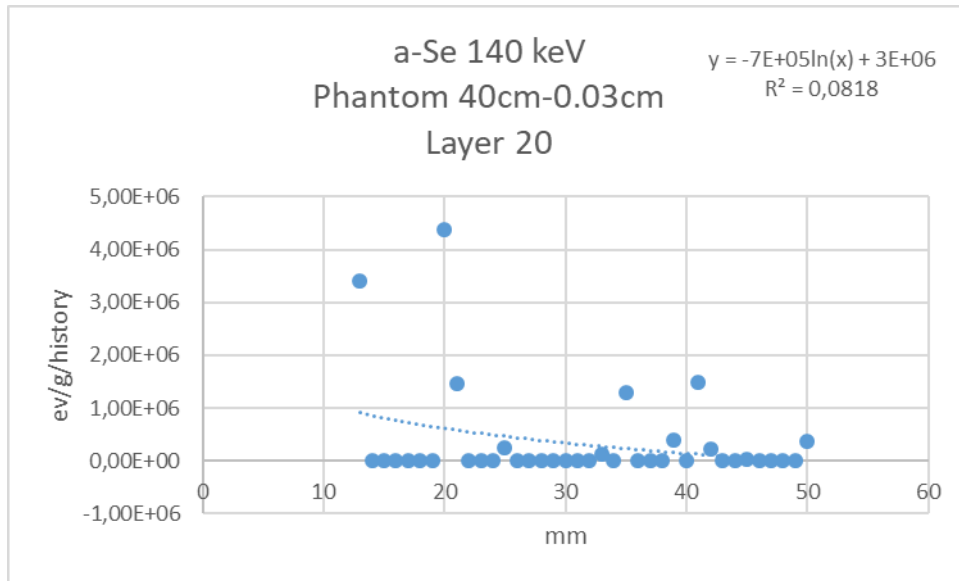
Μεγαλώνοντας την γωνία του ανιχνευτή η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στο επίπεδο του ομοιώματος δεν διορθώνεται (σε όλες τις προσομοιώσεις). Παρατηρούμε πάλι μια ανομοιομορφία και στις τρεις περιπτώσεις, καθώς και το  $R^2$  απέχει πολύ από την μονάδα με αποτέλεσμα η κατανομή της ενέργειας να μην μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά.



**Εικόνα 175:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

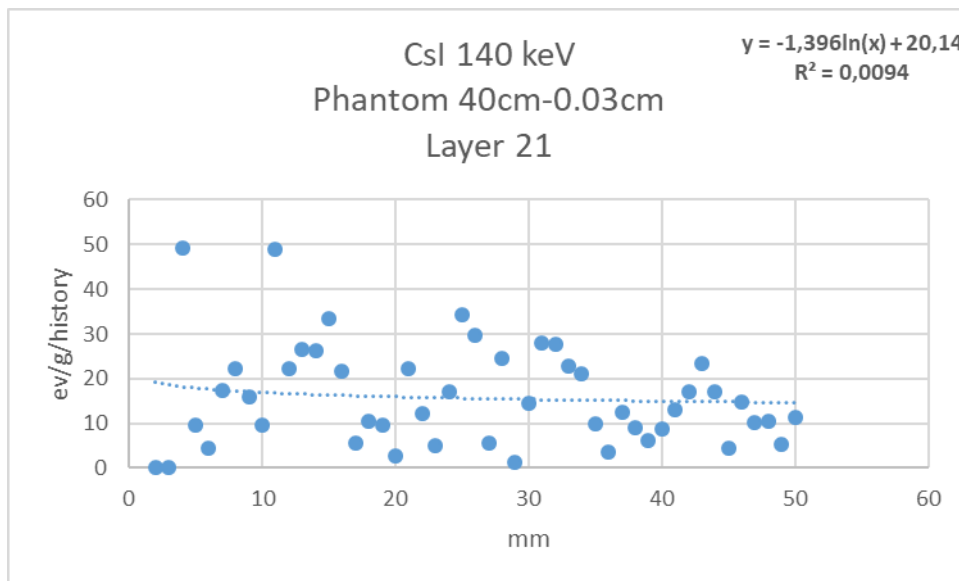


**Εικόνα 176:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

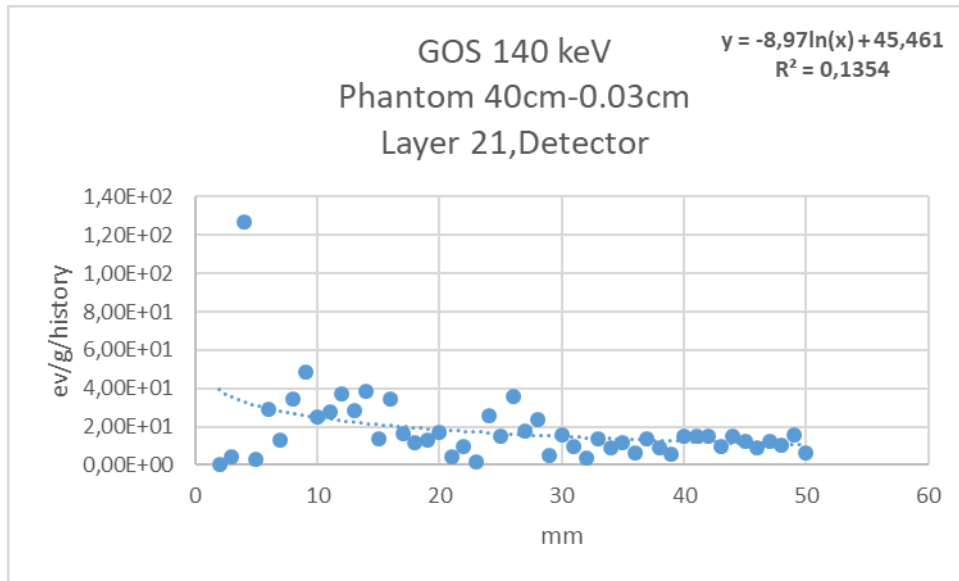


**Εικόνα 177:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

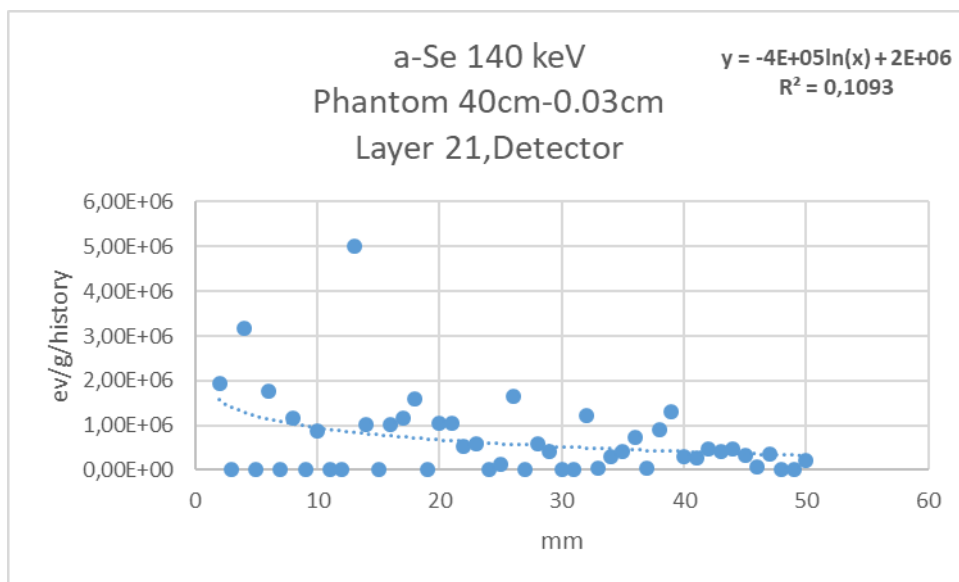
Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για το ομοίωμα με GOS (προσδιορίζοντας το με βάση τη τιμή κοντά στο 0). Επίσης, παρατηρούμε ότι η σκεδαζόμενη για το υλικό a-Se μειώνεται γύρω στα 15mm. Και στις τρεις περιπτώσεις, το  $R^2$  απέχει αρκετά από την μονάδα.



**Εικόνα 178:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



**Εικόνα 179:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



**Εικόνα 180:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

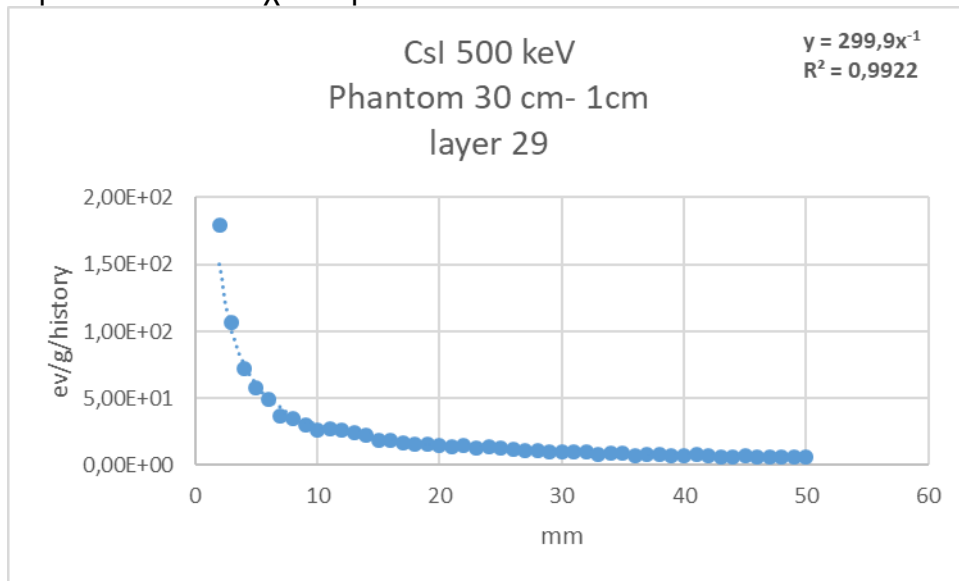
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για τον ανιχνευτή με το υλικό a-Se. . Και στις τρεις περιπτώσεις ,το  $R^2$  απέχει αρκετά από την μονάδα.

### 5.1.3 Αποτελέσματα για μεγαλύτερες ενέργειες

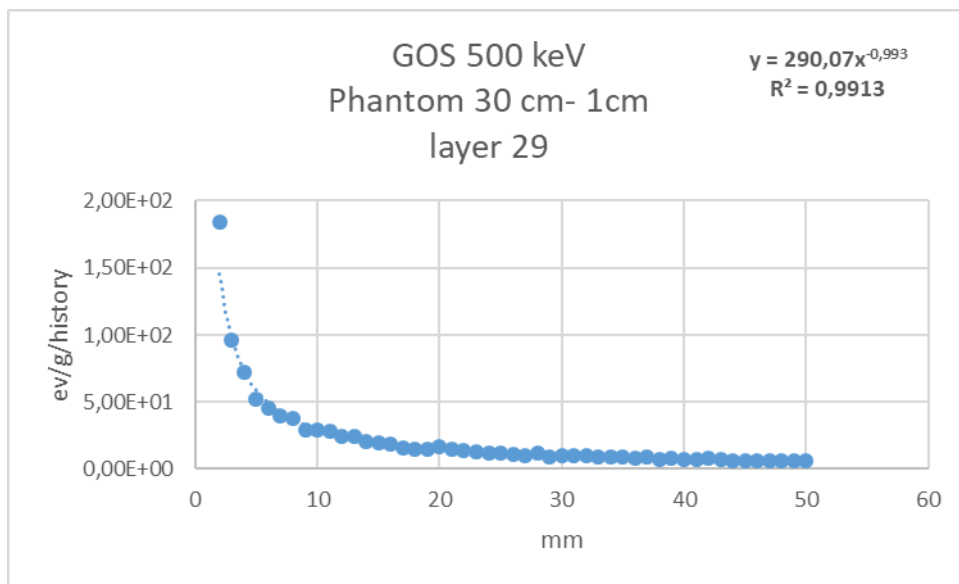
Στην συνέχεια θα ακολουθήσουν οι προσομοιώσεις για τις ενέργειες 500 keV, 1, 2, 6 MeV. Πρέπει να αναφερθεί ότι τα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν αφορούν την κατανομή ενέργειας στα στρώματα(layers): 29/39 το οποίο ανήκει στο ομοίωμα, 30/40 το οποίο χαρακτηρίζει την αλλαγή του ομοιώματος με τον ανιχνευτή, θα το χαρακτηρίζαμε “μεταβατικό στάδιο” και 31/41 το οποίο ανήκει στον ανιχνευτή.

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την ενέργεια 500 keV:

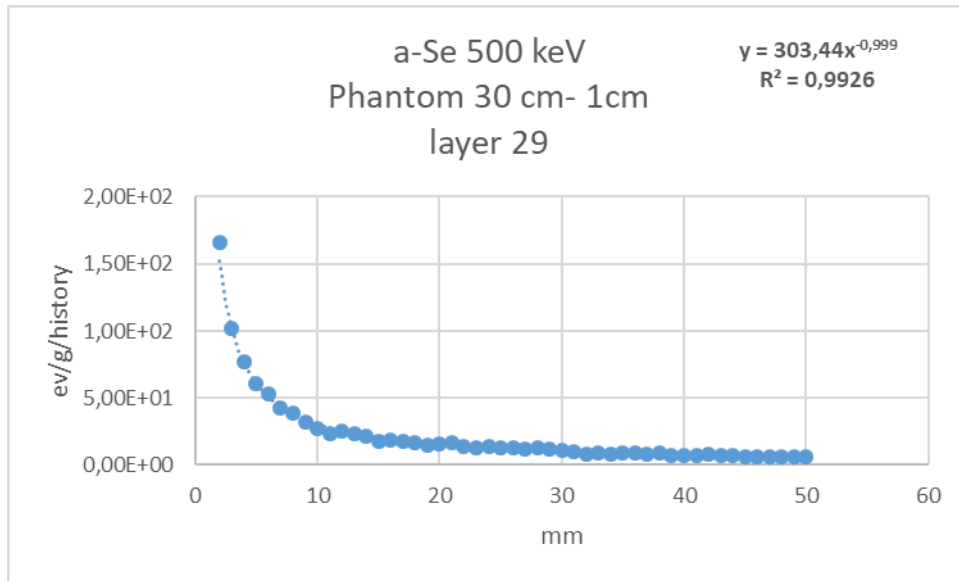
- Ομοίωμα 30cm και ανιχνευτή 1cm :



Εικόνα 181: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

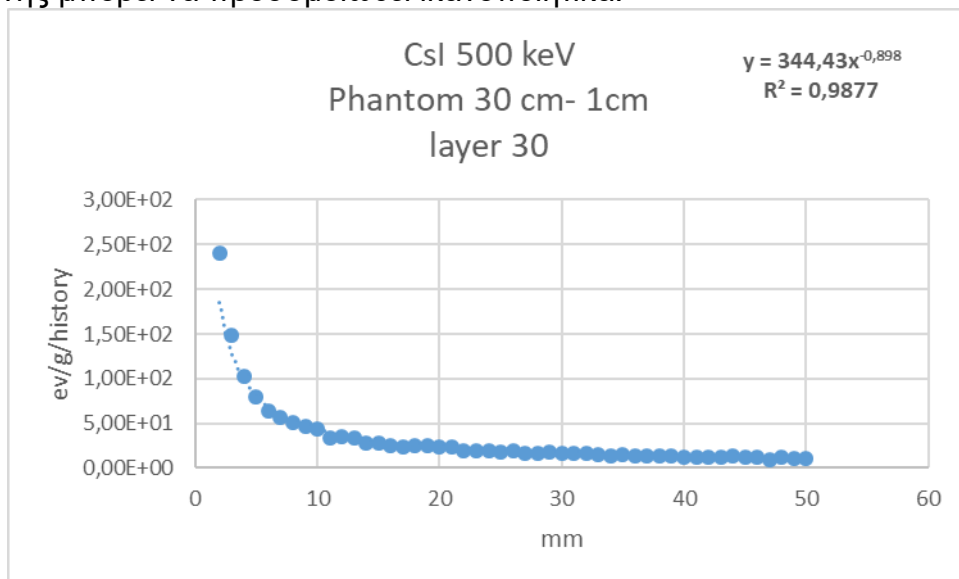


Εικόνα 182: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

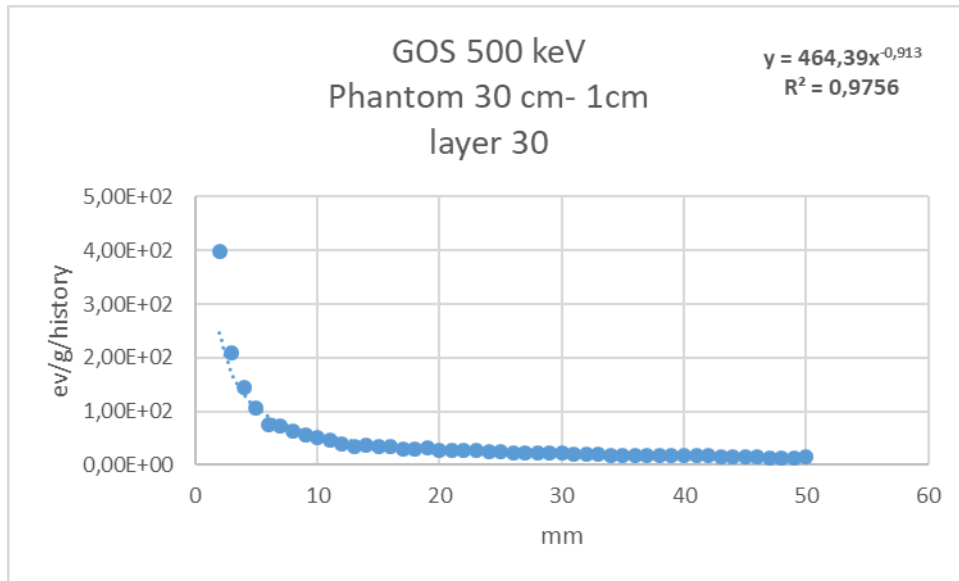


Εικόνα 183: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

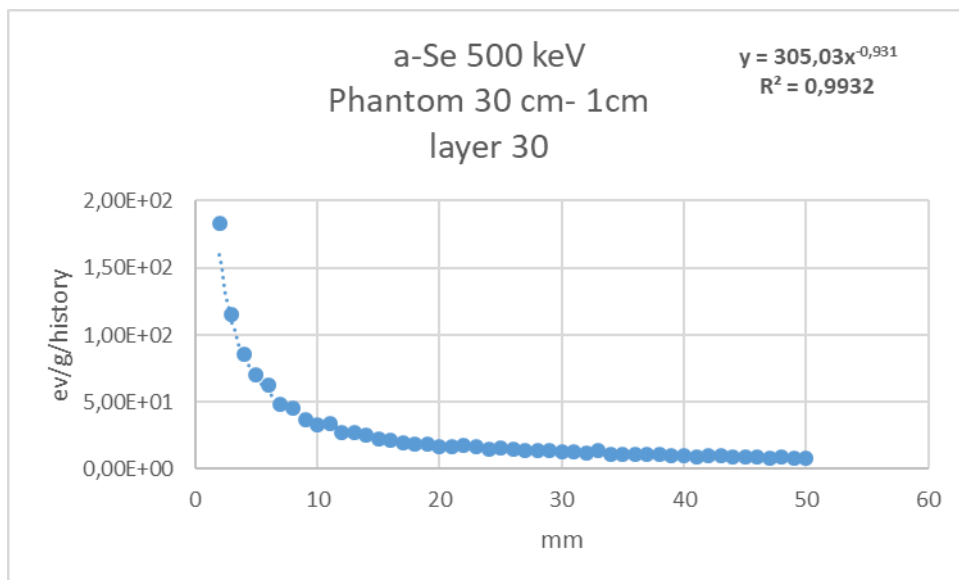
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι συγκρίσιμη και για τις τρεις προσομοιώσεις. Μια ενδεικτική τιμή κοντά στη θέση 0 είναι  $1,50 \times 10^2$  eV/g/history. Το  $R^2$  είναι πολύ κοντά στην μονάδα (0,99) σε όλες τις περιπτώσεις. Συνεπώς για τις συγκεκριμένες συνθήκες η κατανομή της σκεδαζόμενης μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά.



Εικόνα 184: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

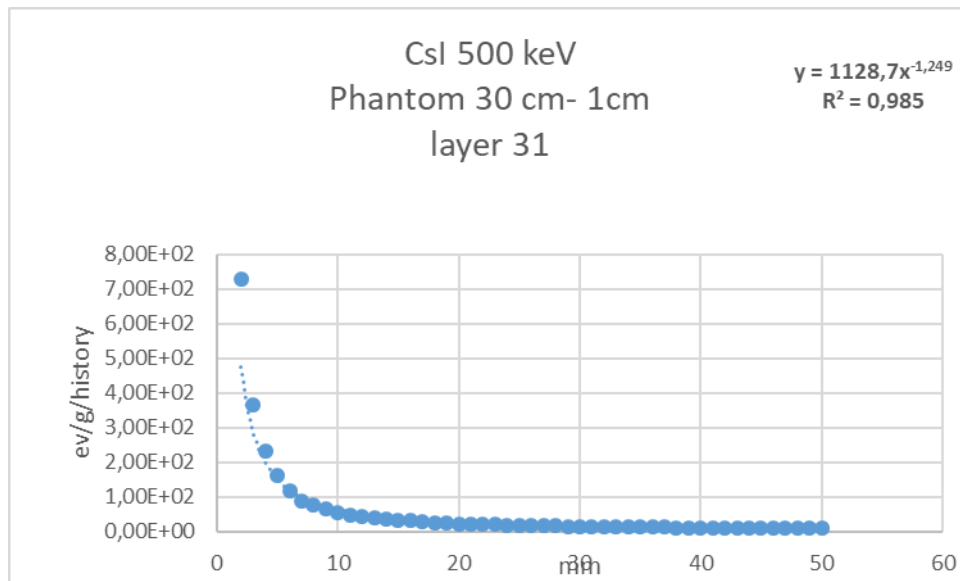


Εικόνα 185: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

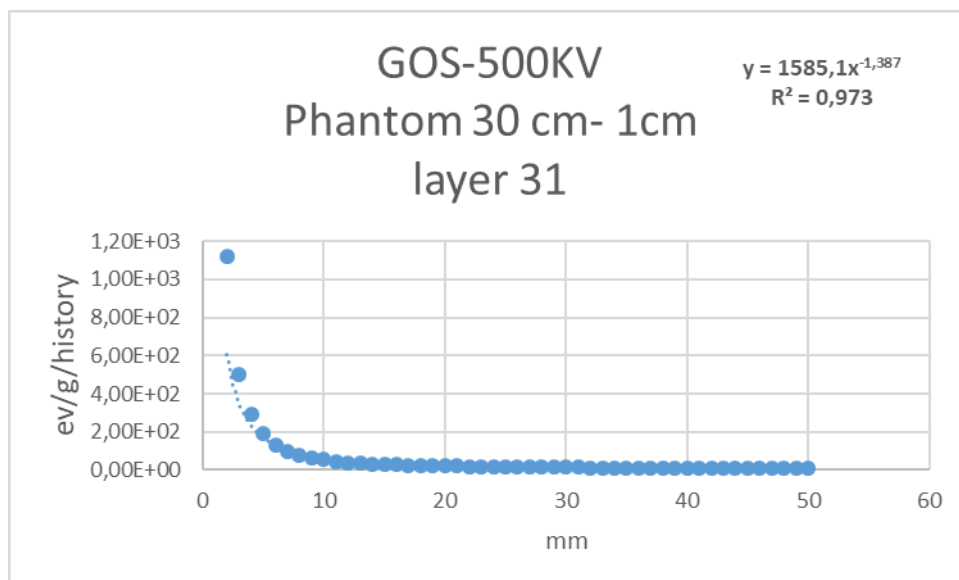


Εικόνα 186: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

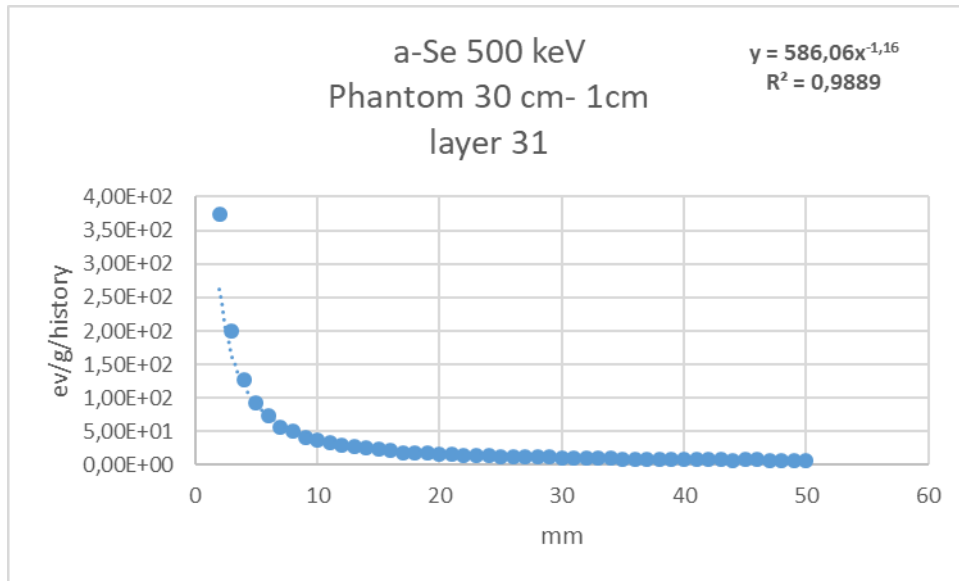
Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα βλέπουμε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για το ομοίωμα με το υλικό GOS (προσδιορίζοντας το με βάση τη τιμή κοντά στο 0). Η σκεδαζόμενη αρχίζει να μειώνεται αισθητά μετά τα 10 mm. Το  $R^2$  εξακολουθεί να είναι πολύ κοντά στην μονάδα σε όλες τις περιπτώσεις.



Εικόνα 187: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



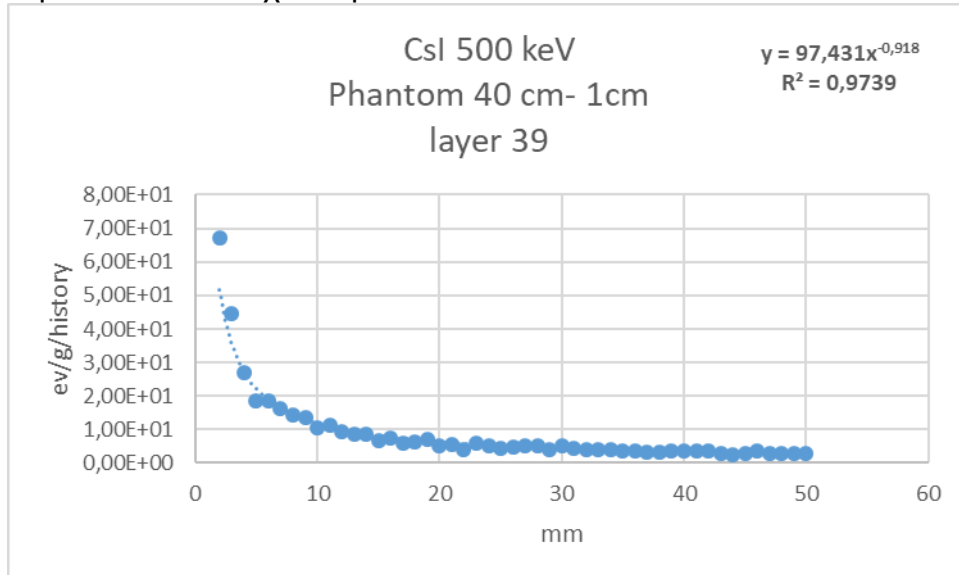
Εικόνα 188: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



**Εικόνα 189:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

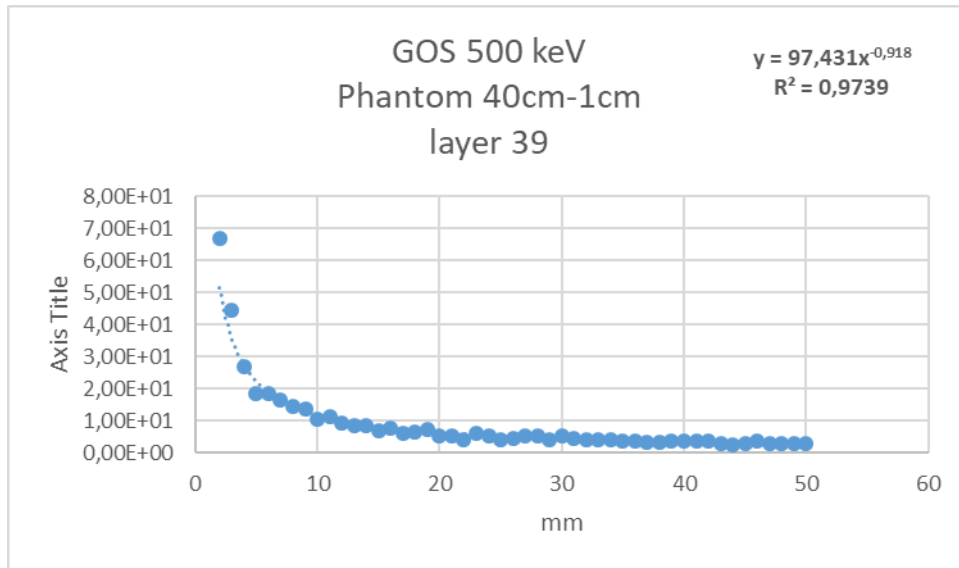
Στα παραπάνω σχήματα , η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για το ανιχνευτή με το υλικό GOS και η σκεδαζόμενη αρχίζει να μειώνεται αισθητά μετά τα 10mm. Για τις συγκεκριμένες συνθήκες η κατανομή της σκεδαζόμενης μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά ( $R^2 > 0.92$  για κάθε περίπτωση).

- Ομοίωμα 40cm και ανιχνευτή 1cm :

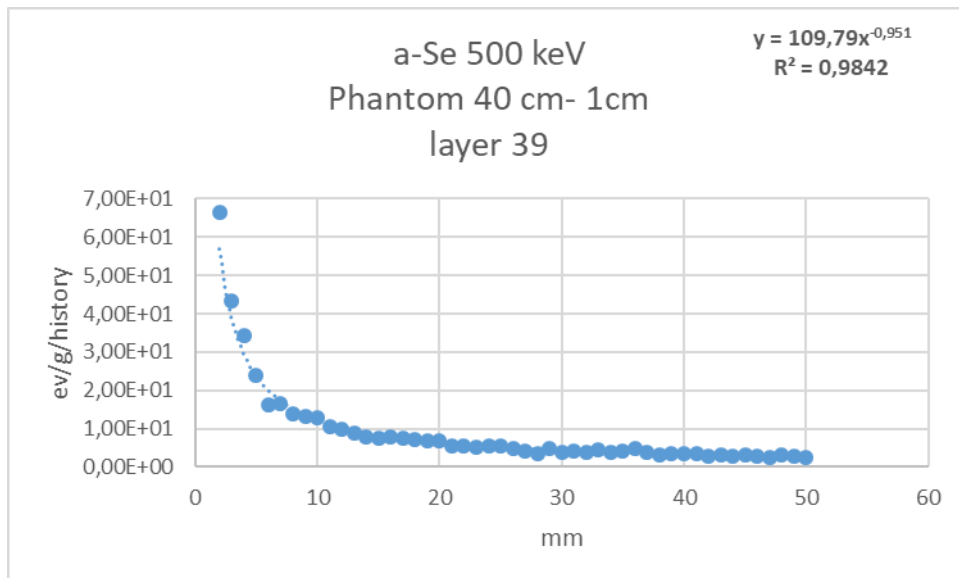


**Εικόνα 190:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



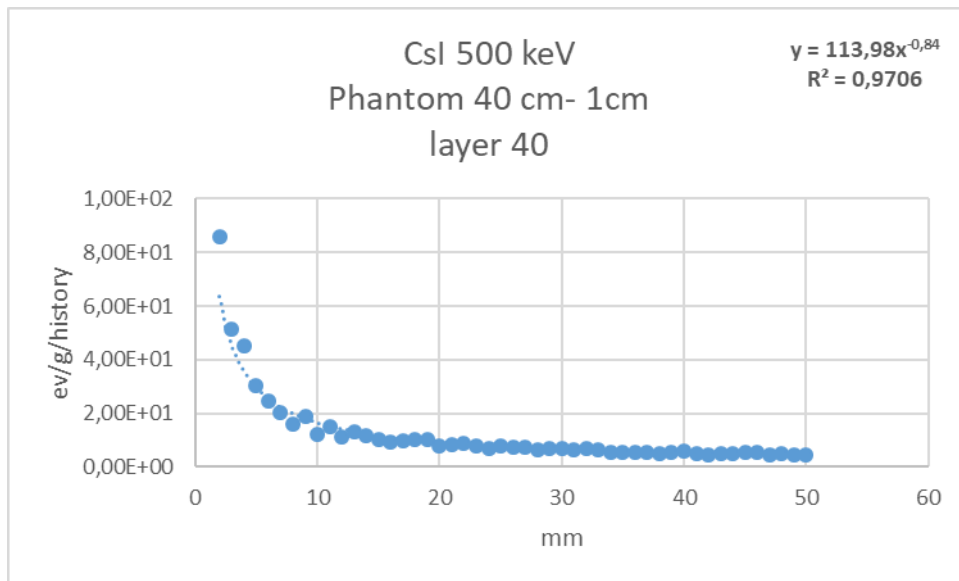


**Εικόνα 191:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

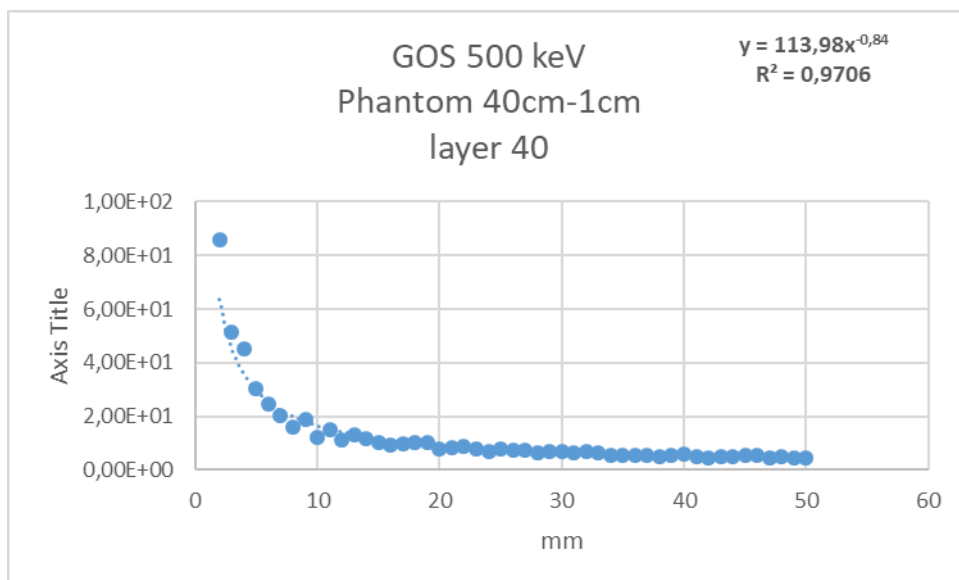


**Εικόνα 192:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

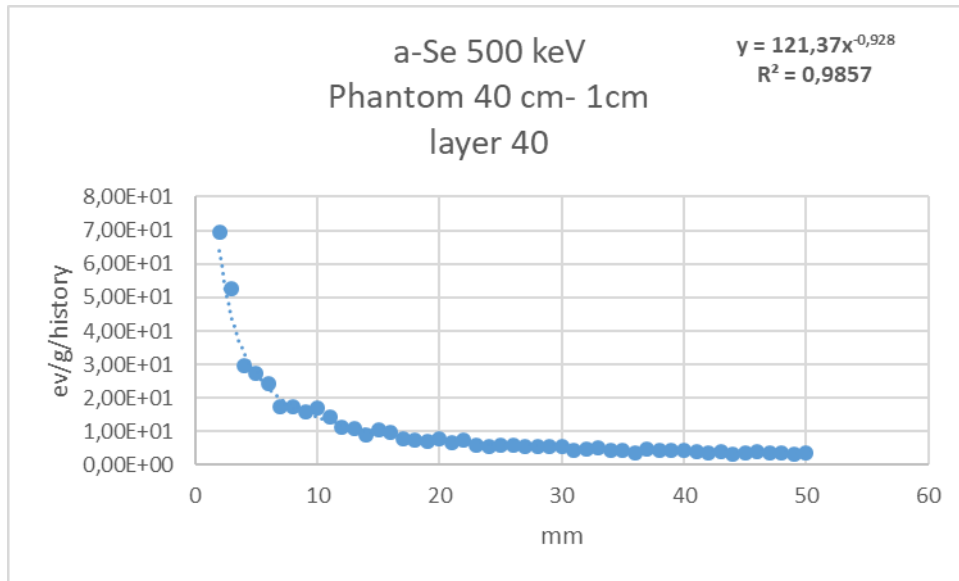
Όπως παρατηρούμε, στα γραφήματα αυτά η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει συγκρίσιμες τιμές και για τις τρεις προσομοιώσεις. Το  $R^2$  σε όλες τις περιπτώσεις πλησιάζει την μονάδα, συνεπώς η κατανομή της σκεδαζόμενης προσομοιώνεται ικανοποιητικά.



Εικόνα 193: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

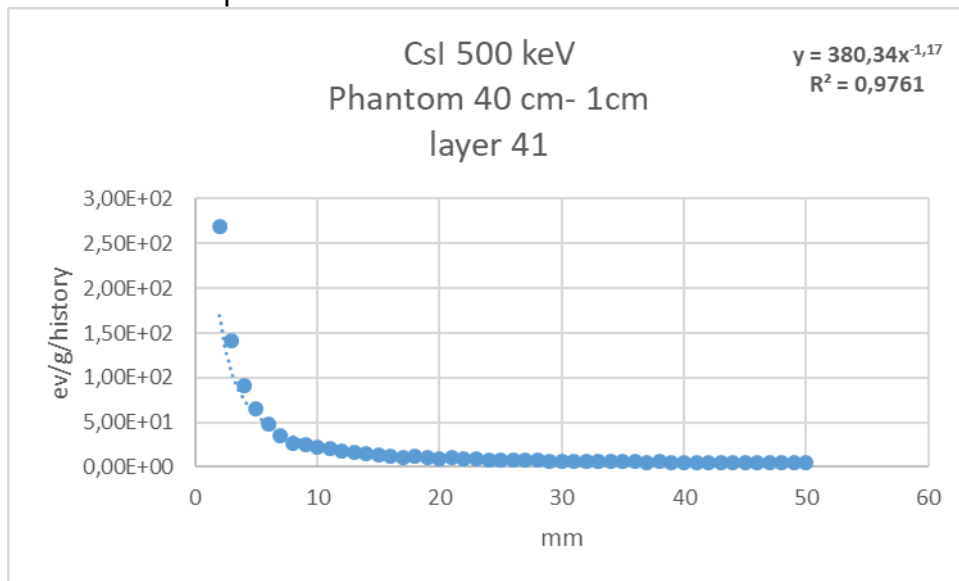


Εικόνα 194: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

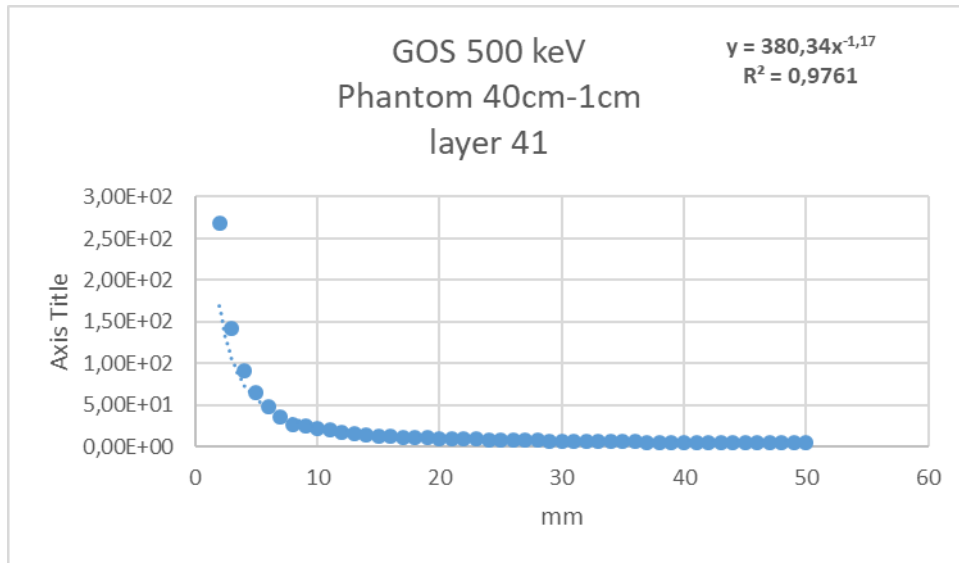


Εικόνα 195: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

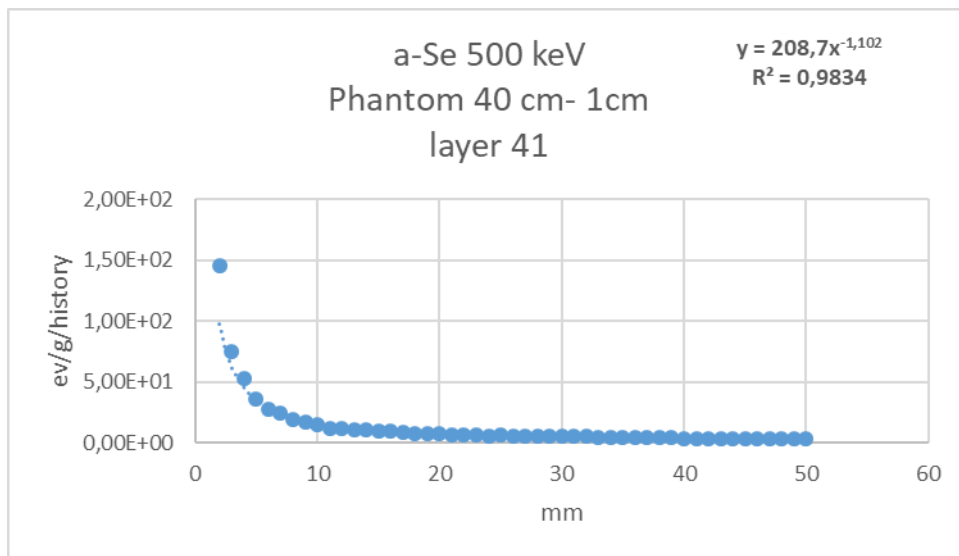
Και σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να δούμε ότι οι τιμές της κατανομής της δόσης για την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι συγκρίσιμη σε όλα τα υλικά. Το  $R^2$  σε όλες τις περιπτώσεις πλησιάζει την μονάδα, επομένως βλέπουμε ότι κατανομή της σκεδαζόμενης προσομοιώνεται ικανοποιητικά.



Εικόνα 196: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



**Εικόνα 197:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

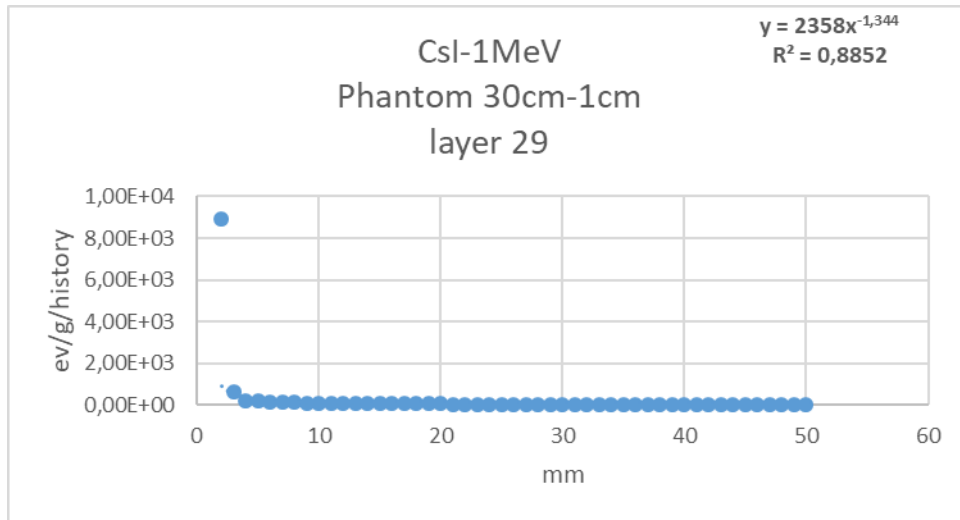


**Εικόνα 198:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

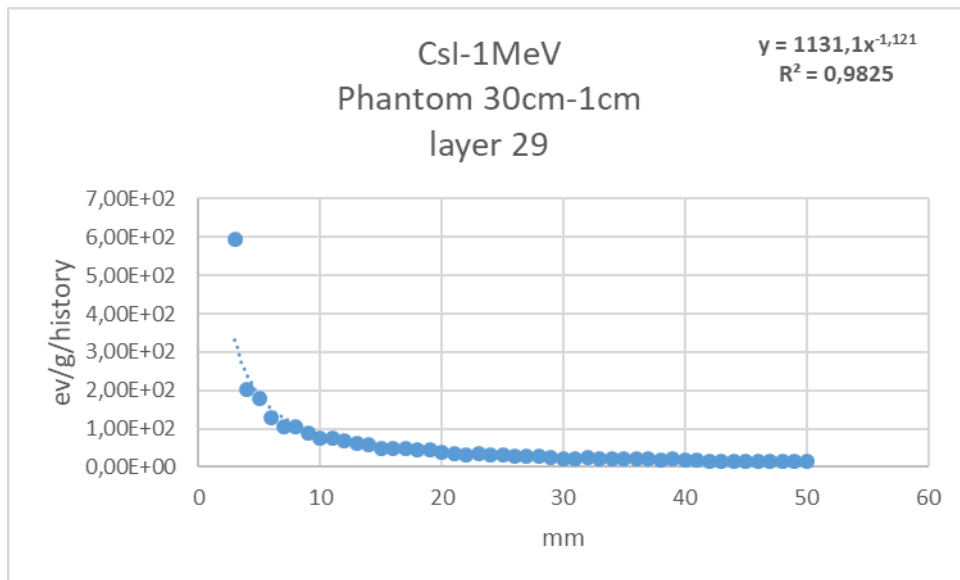
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή είναι συγκρίσιμη και για τους τρεις ανιχνευτές. Μια ενδεικτική τιμή κοντά στη θέση 0 είναι περίπου  $2 \times 10^2$  eV/g/history. Για τις συγκεκριμένες συνθήκες η κατανομή της σκεδαζόμενης μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά ( $R^2 > 0.97$  για κάθε περίπτωση). Έπειτα ακολουθούν οι προσομοιώσεις για την ενέργεια 1MeV:

Στην ενέργεια αυτή τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν 2 φορές ανά επίπεδο, την πρώτη φορά από το βήμα 2 ως το 50 (καθώς το βήμα 1 αφορά μη σκεδαζόμενη ακτινοβολία) και την δεύτερη φορά από το βήμα 3 ως το 50 διότι από το βήμα αυτό η κατανομή της δόσης όσο αναφορά την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι καλύτερη ως προς την ομοιομορφία και την δυνατότητα να υπολογιστεί σε καλύτερο βαθμό η χωρική κατανομή της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

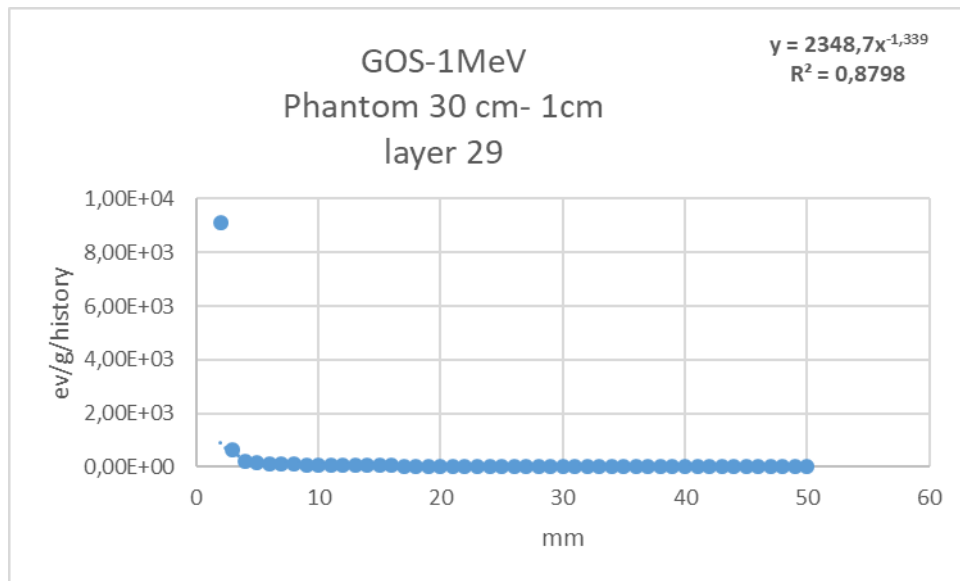
- Ομοίωμα 30cm και ανιχνευτή 1cm :



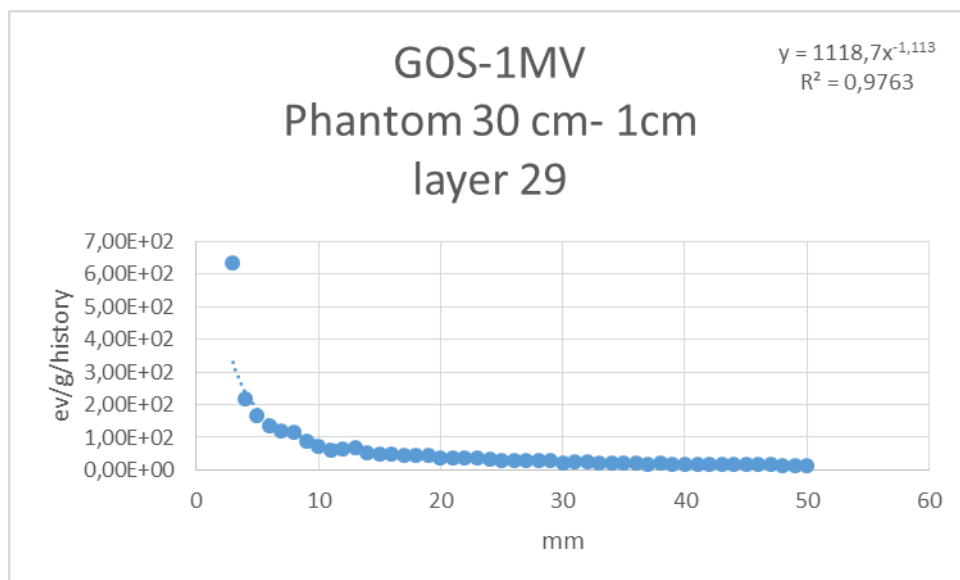
**Εικόνα 199:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CSI.



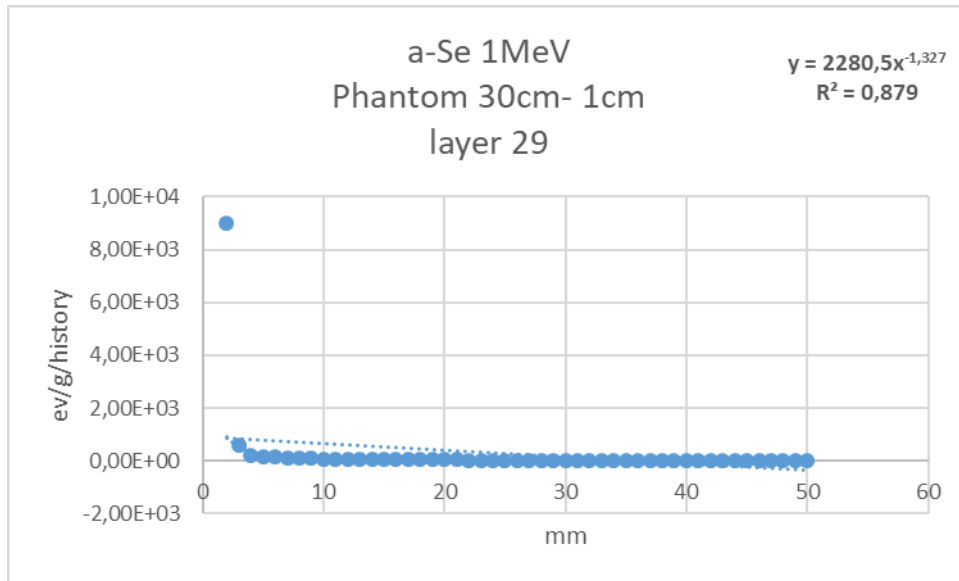
**Εικόνα 200:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CSI, συλλέγοντας τα αποτελέσματα έπειτα από το βήμα 3 (step3).



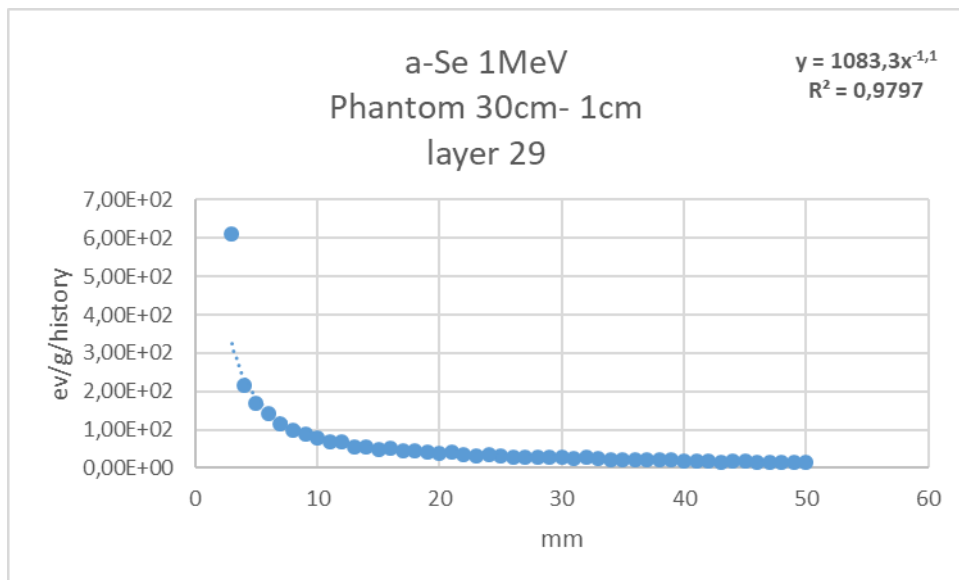
Εικόνα 201: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



Εικόνα 202: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS. ,συλλέγοντας τα αποτελέσματα έπειτα από το βήμα 3 (step3).

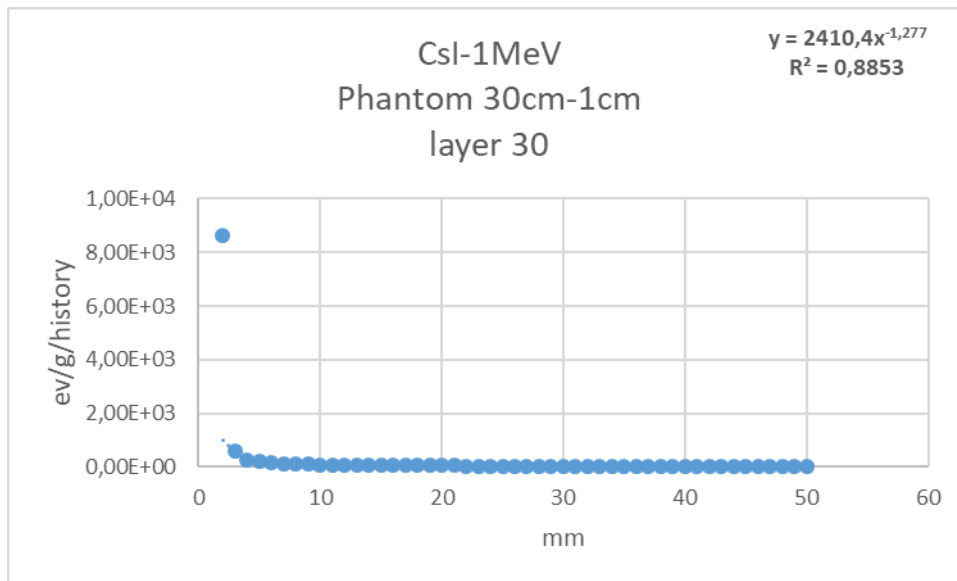


**Εικόνα 203:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

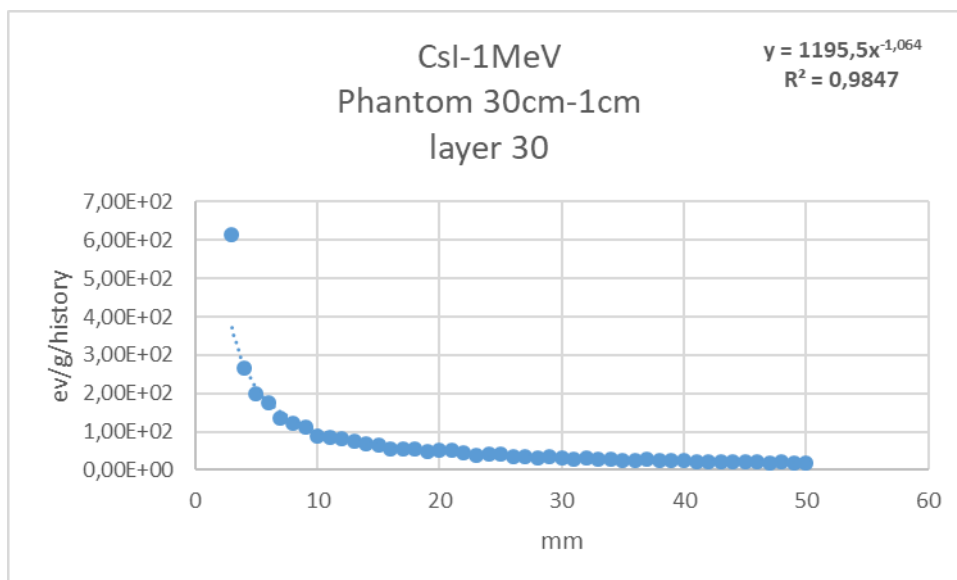


**Εικόνα 204:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se. ,συλλέγοντας τα αποτελέσματα έπειτα από το βήμα 3 (step3)

Συγκρίνοντας τα σχήματα μεταξύ τους (σχεδιασμένα από τα βήμα3), παρατηρούμε ότι η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι συγκρίσιμη και για τα τρία ομοιώματα. Μια ενδεικτική τιμή κοντά στη θέση 0 είναι  $6 \times 10^2$  eV/g/history. Το  $R^2$  είναι μεγαλύτερο από 0,97 για όλες τις προσομοιώσεις.

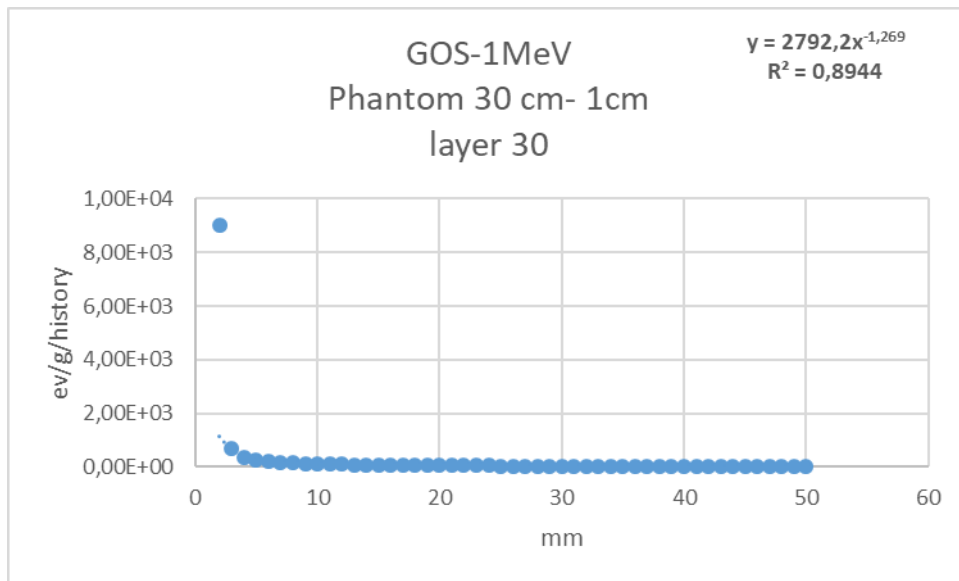


Εικόνα 205: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

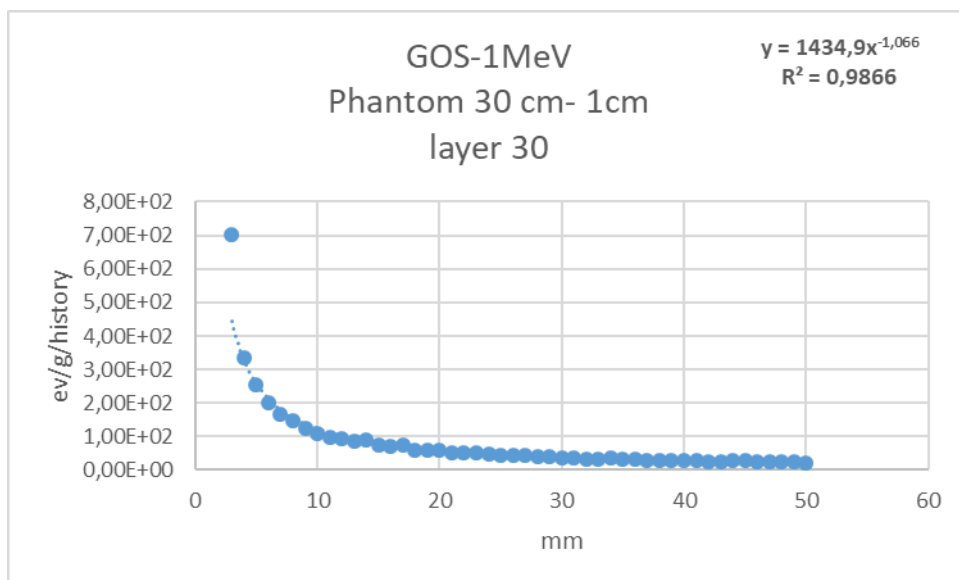


Εικόνα 206: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI, συλλέγοντας τα αποτελέσματα έπειτα από το βήμα 3 (step3).

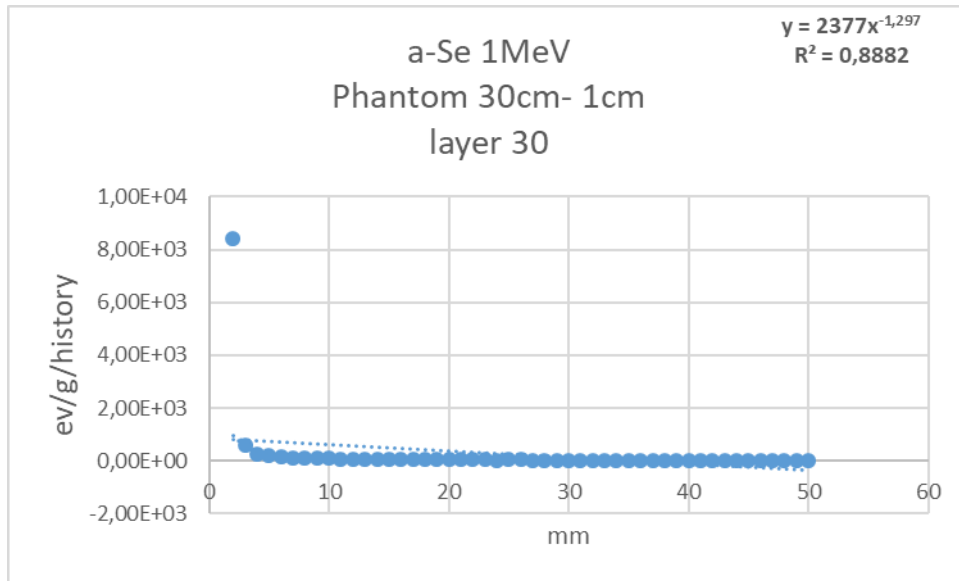




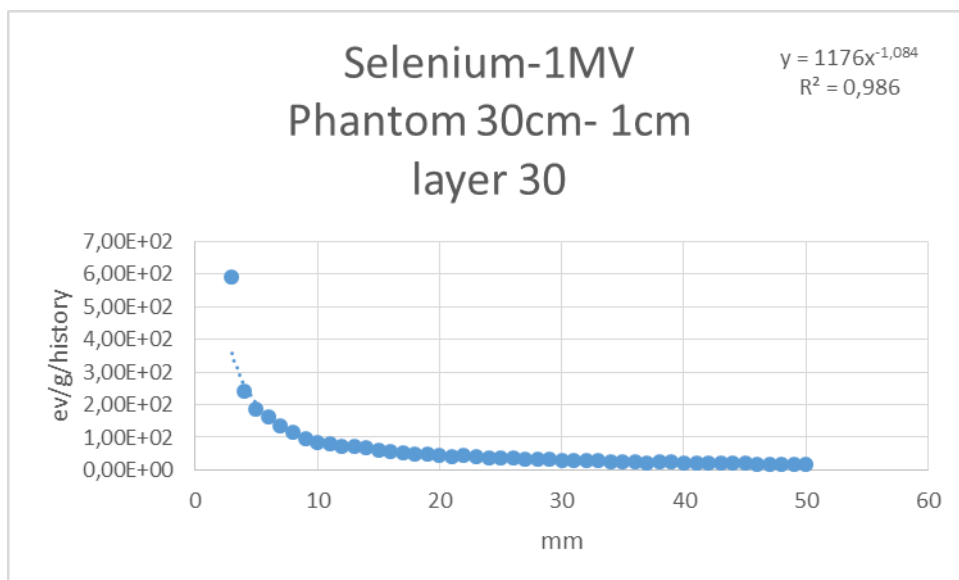
Εικόνα 207: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



Εικόνα 208: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS, συλλέγοντας τα αποτελέσματα έπειτα από το βήμα 3 (step3).

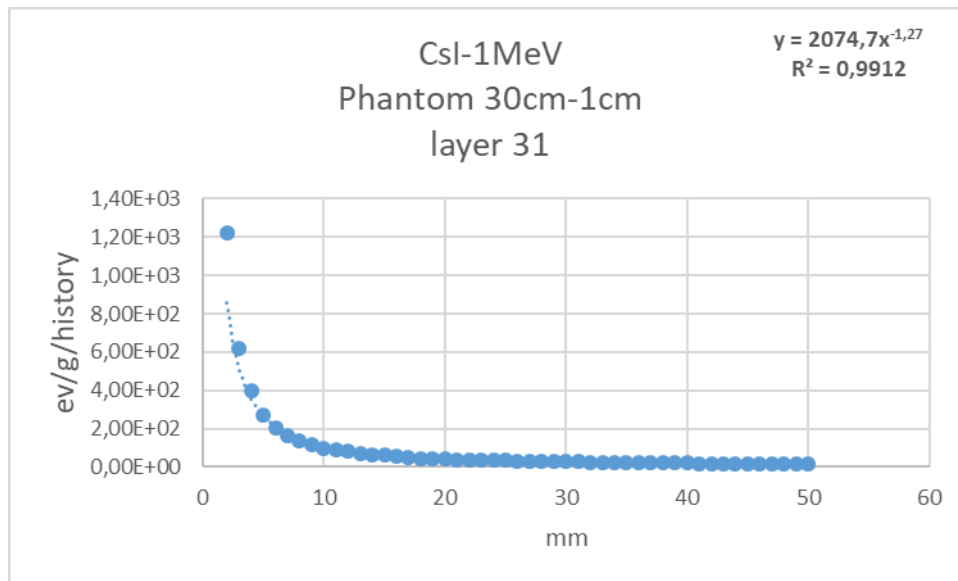


Εικόνα 209: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

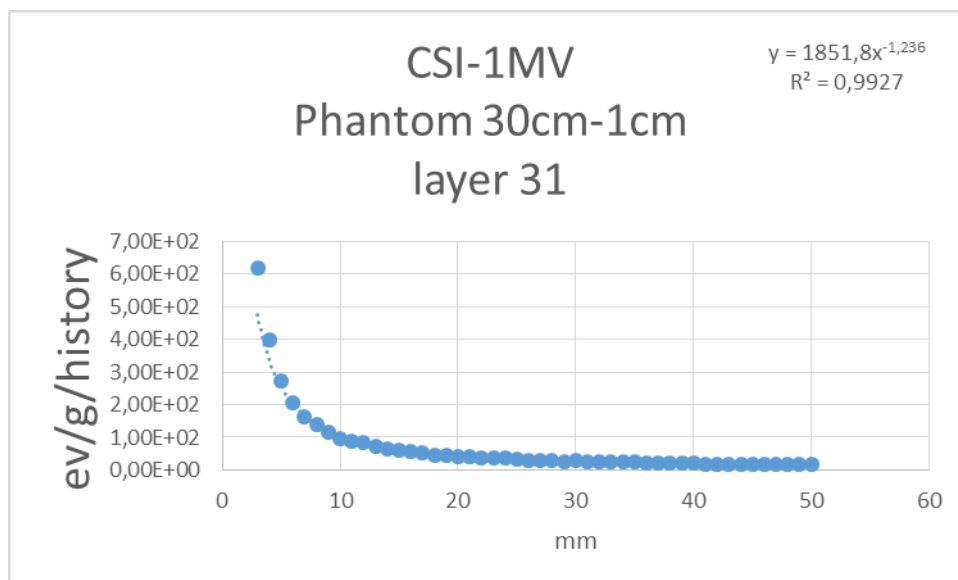


Εικόνα 210: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se, συλλέγοντας τα αποτελέσματα έπειτα από το βήμα 3 (step3).

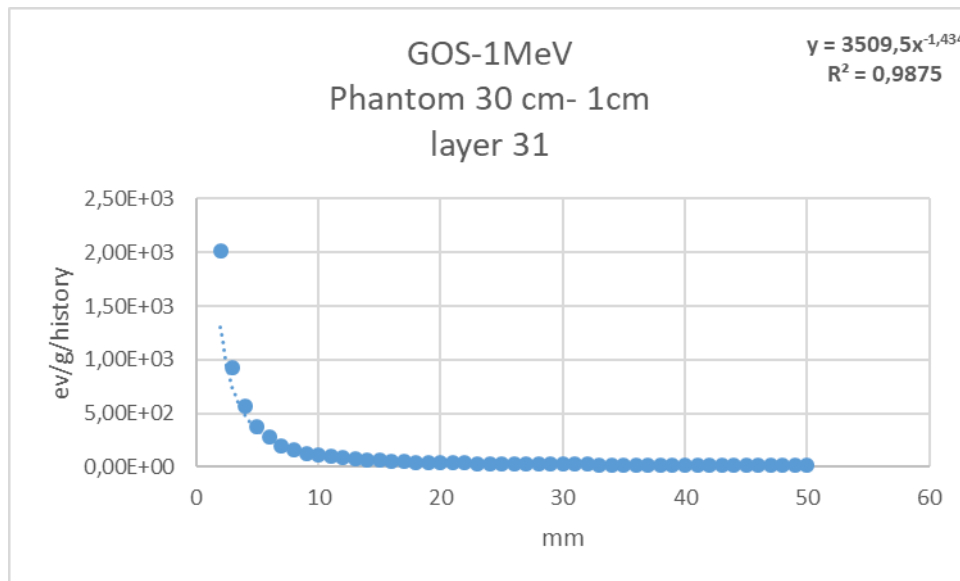
Στην περίπτωση αυτή, στο “μεταβατικό στάδιο” του ομοιώματος προς τον ανιχνευτή παρατηρούμε ότι η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι συγκρίσιμη για όλα τα υλικά. Μια ενδεικτική τιμή κοντά στη θέση 0 είναι  $6 \times 10^2$  eV/g/history. Το  $R^2$  είναι μεγαλύτερο από 0,98 για όλες τις προσομοιώσεις.



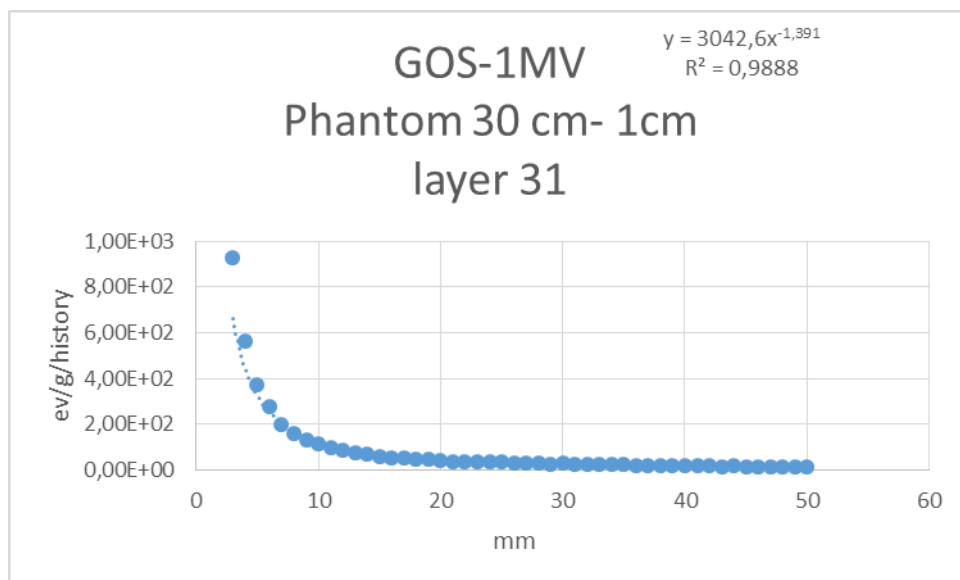
Εικόνα 211: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



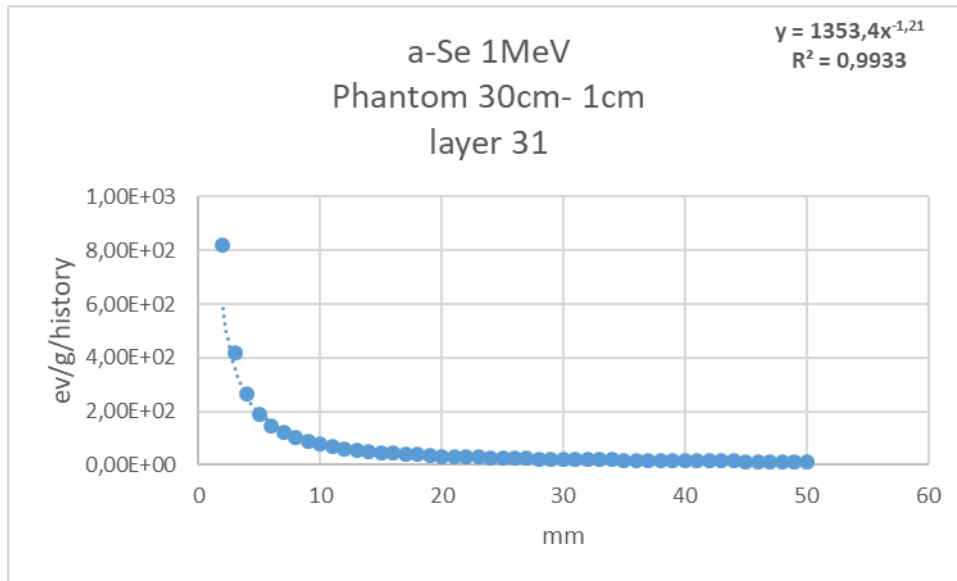
Εικόνα 212: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI ,συλλέγοντας τα αποτελέσματα έπειτα από το βήμα 3 (step3).



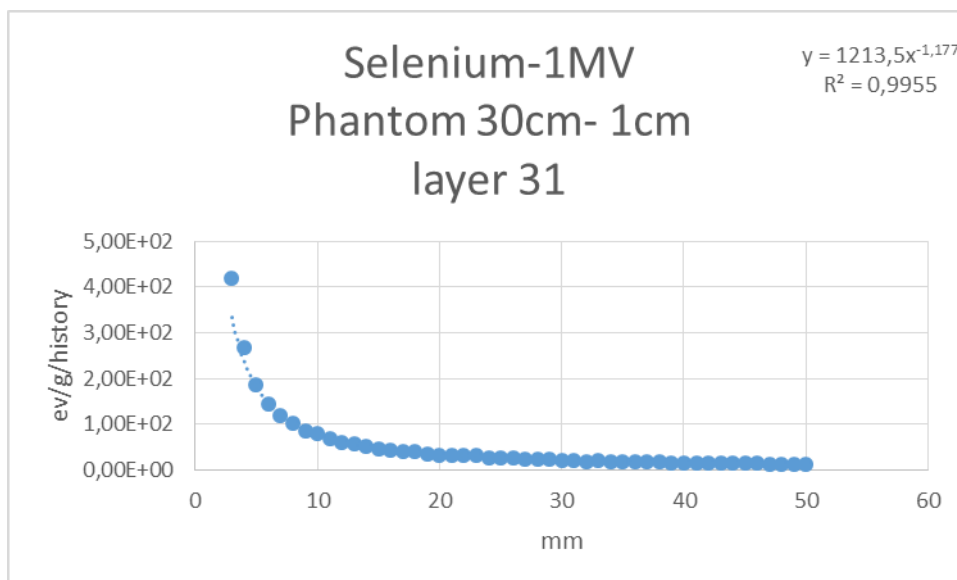
Εικόνα 213: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



Εικόνα 214: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS, συλλέγοντας τα αποτελέσματα έπειτα από το βήμα 3 (step3).



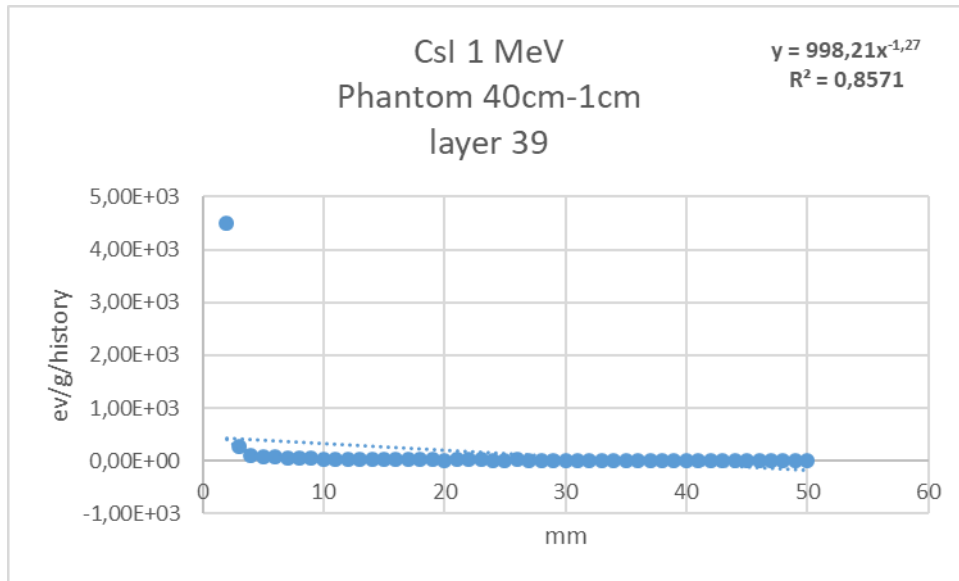
**Εικόνα 215:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.



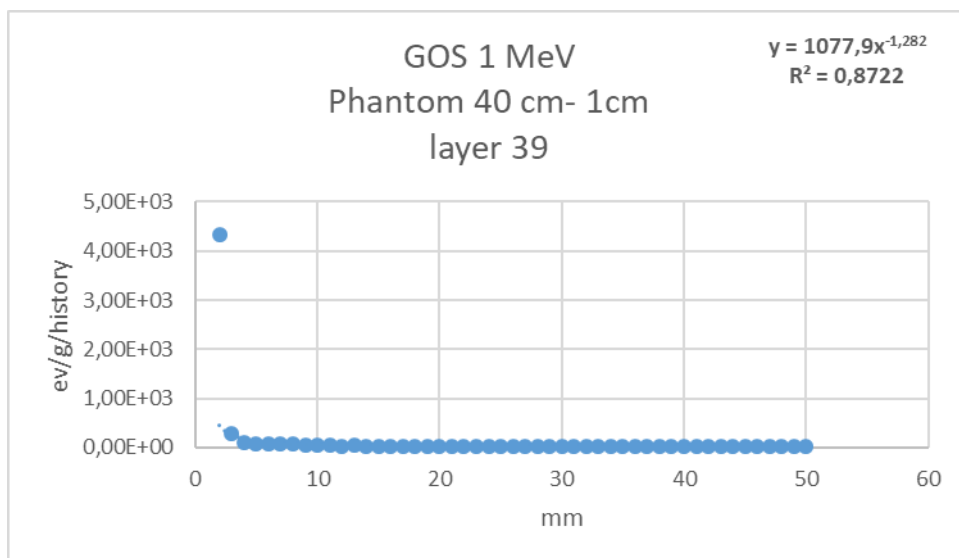
**Εικόνα 216:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se ,συλλέγοντας τα αποτελέσματα έπειτα από το βήμα 3 (step3).

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα, η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή είναι συγκρίσιμη και για τους τρεις ανιχνευτές. Αυτό είναι φανερό και στα δύο διαγράμματα των τριών υλικών. Συγκρίνοντας όμως, τα διαγράμματα από το τρίτο βήμα, θεωρούμε μια ενδεικτική τιμή περίπου κοντά στη θέση 0 να είναι  $6 \times 10^2$  eV/g/history. Το  $R^2$  πλησιάζει την μονάδα για όλες τις προσομοιώσεις.

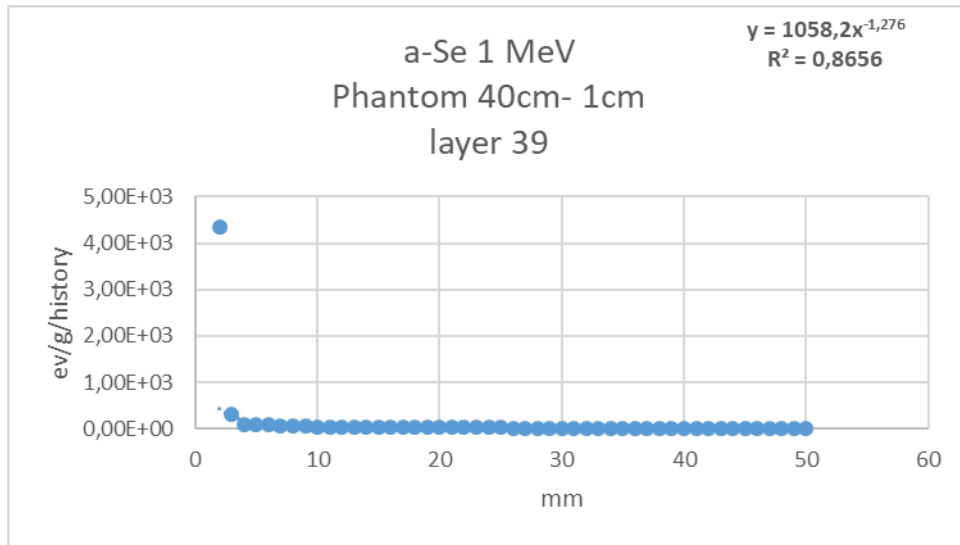
- Ομοίωμα 40cm και ανιχνευτή 1cm :



**Εικόνα 217:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

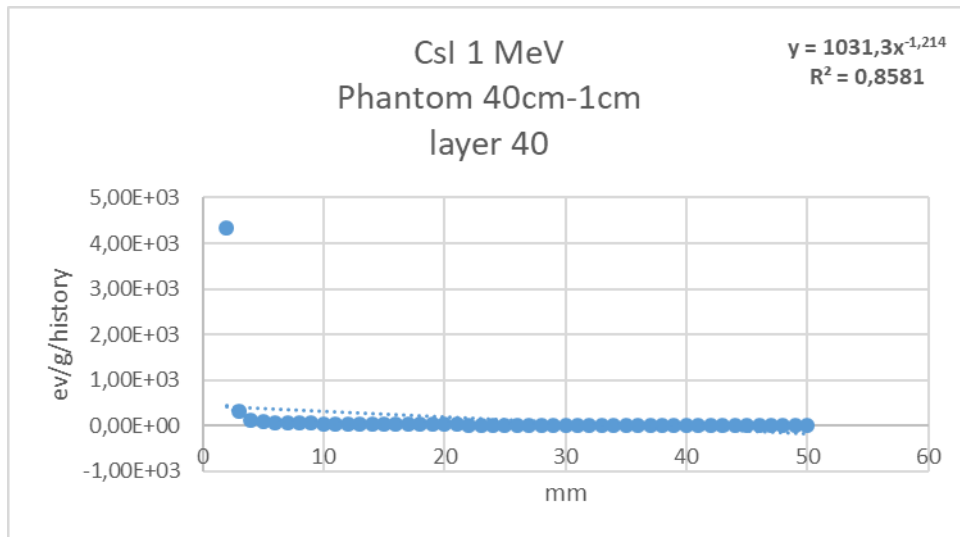


**Εικόνα 218:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

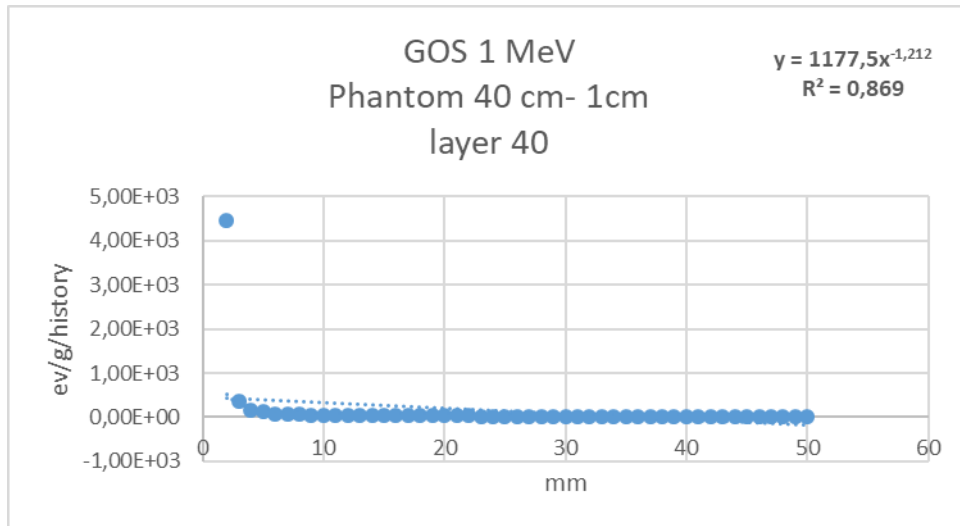


Εικόνα 219: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

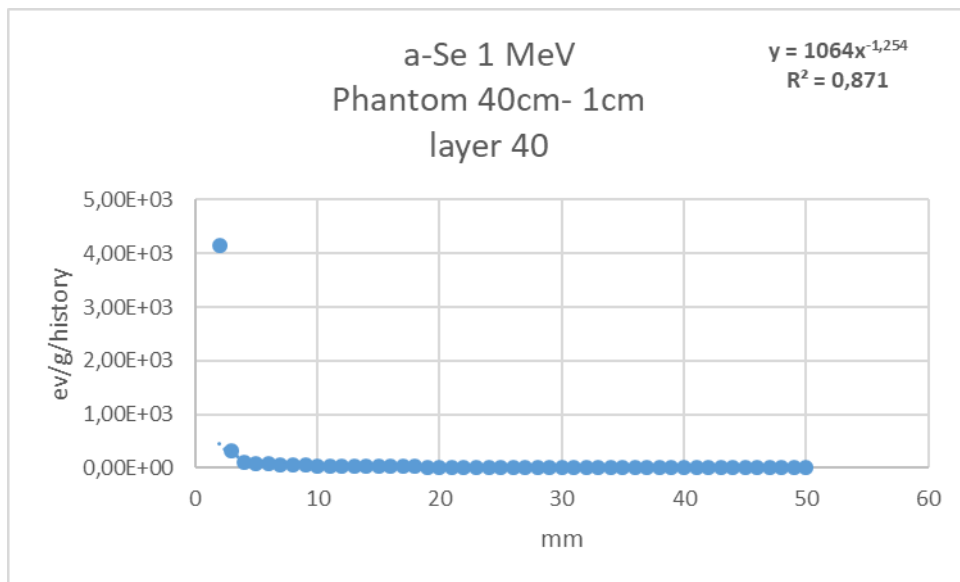
Στα τρία παραπάνω γραφήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι συγκρίσιμη σε όλες τις περιπτώσεις. Το  $R^2$  πλησιάζει την μονάδα σε όλα τα γραφήματα.



Εικόνα 220: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



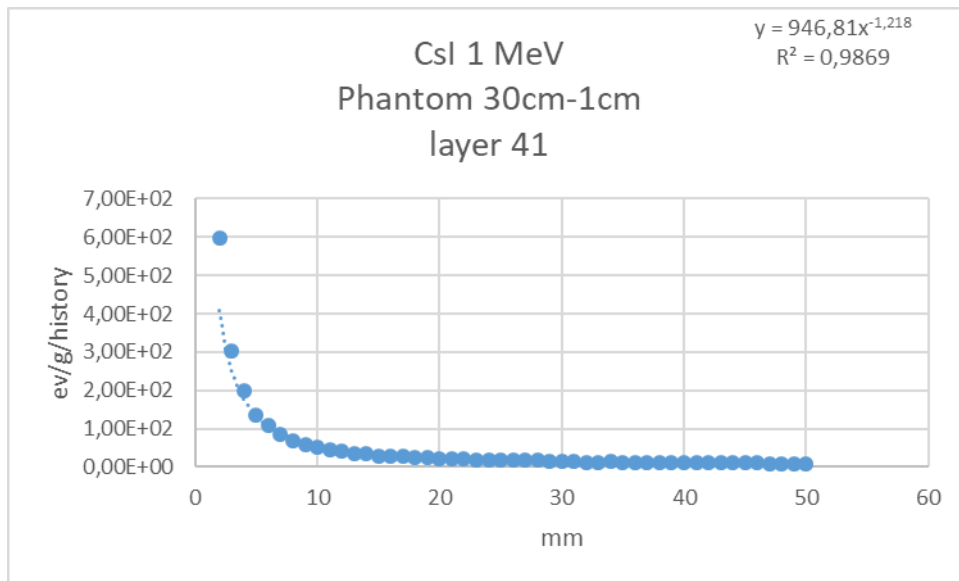
Εικόνα 221: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



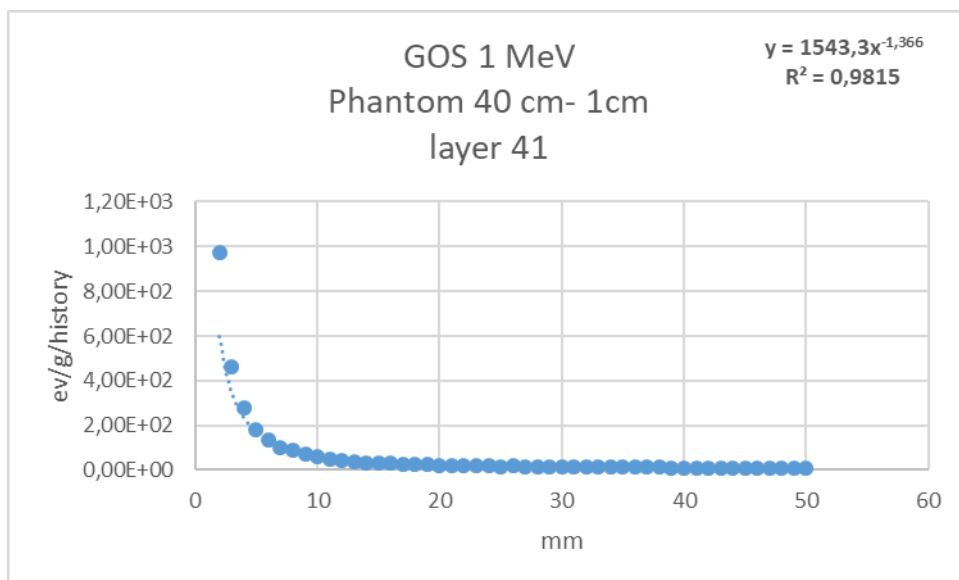
Εικόνα 222: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Μπορούμε να καταλάβουμε στο “μεταβατικό στάδιο” ότι στα γραφήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι συγκρίσιμη σε όλες τις περιπτώσεις. Το  $R^2$  πλησιάζει την μονάδα ( $> 0,85$ ) και για τις τρεις περιπτώσεις.

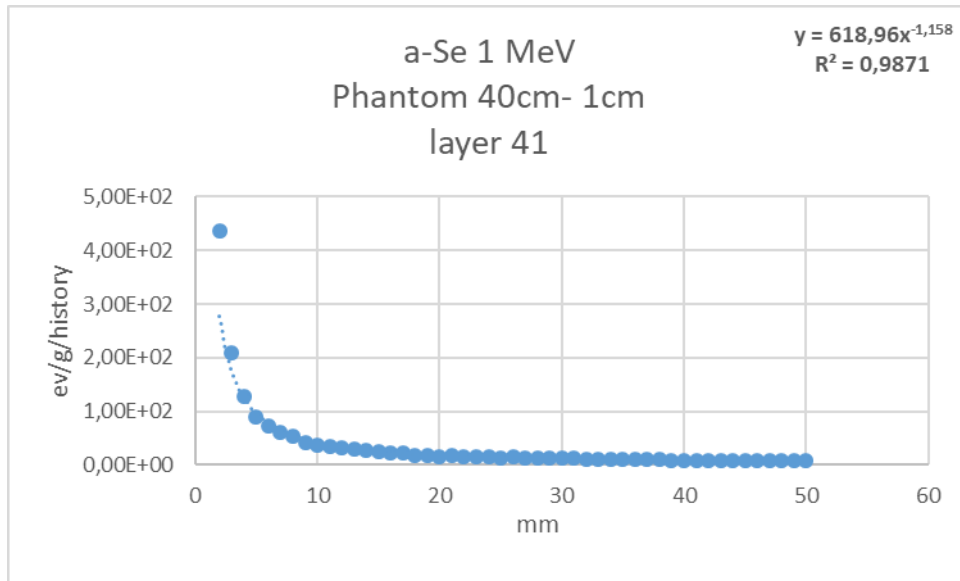




Εικόνα 223: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



Εικόνα 224: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

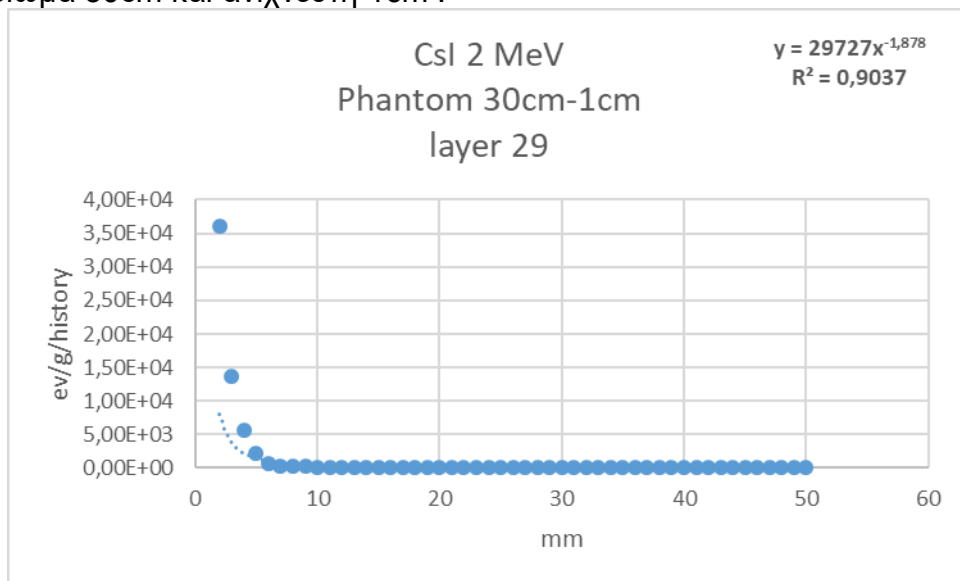


Εικόνα 225: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

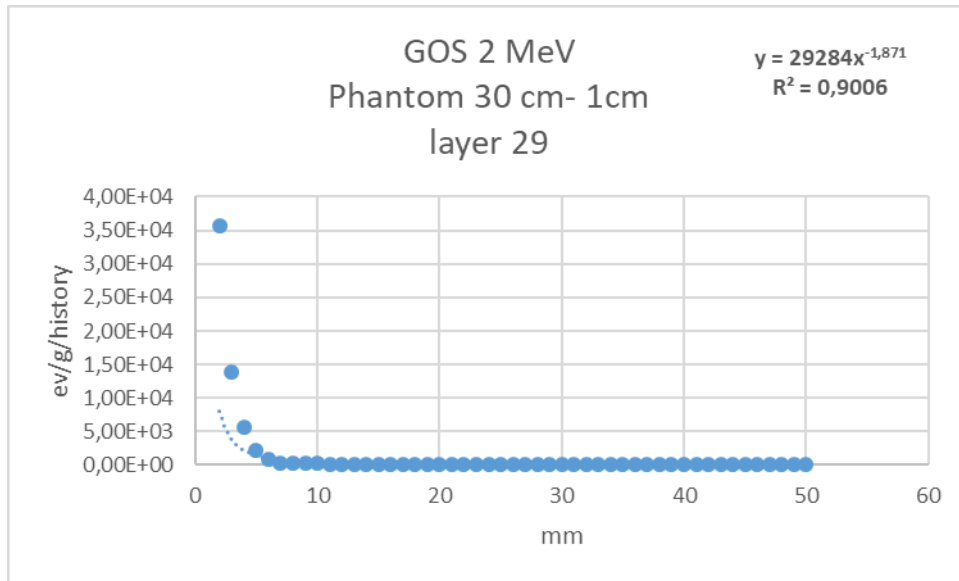
Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει συγκρίσιμες τιμές σε όλα τα υλικά. Το  $R^2$  πλησιάζει την μονάδα ( $> 0,98$ ) και για τις τρεις περιπτώσεις.

Ακολουθούν τα παραδείγματα για τις ενέργειες 2MeV :

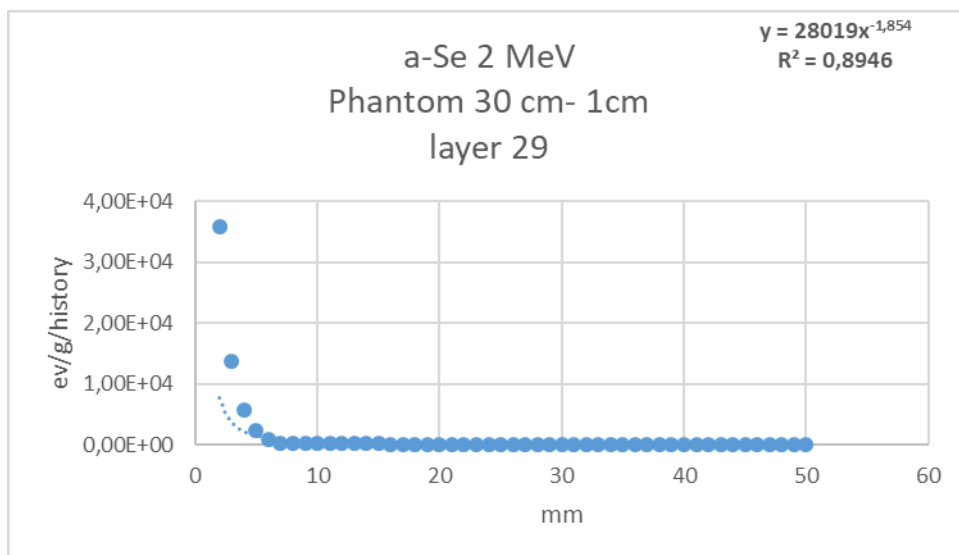
- Ομοίωμα 30cm και ανιχνευτή 1cm :



Εικόνα 226: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

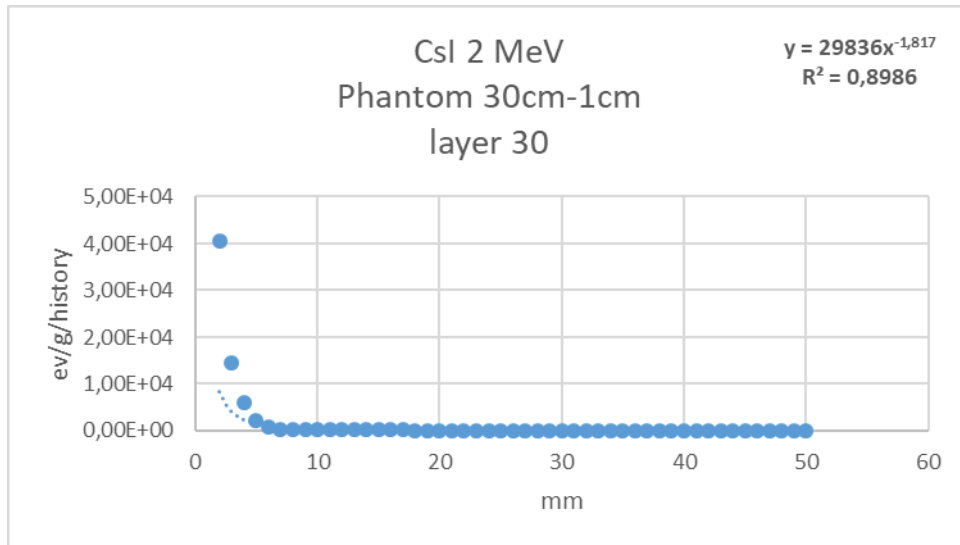


Εικόνα 227: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS .

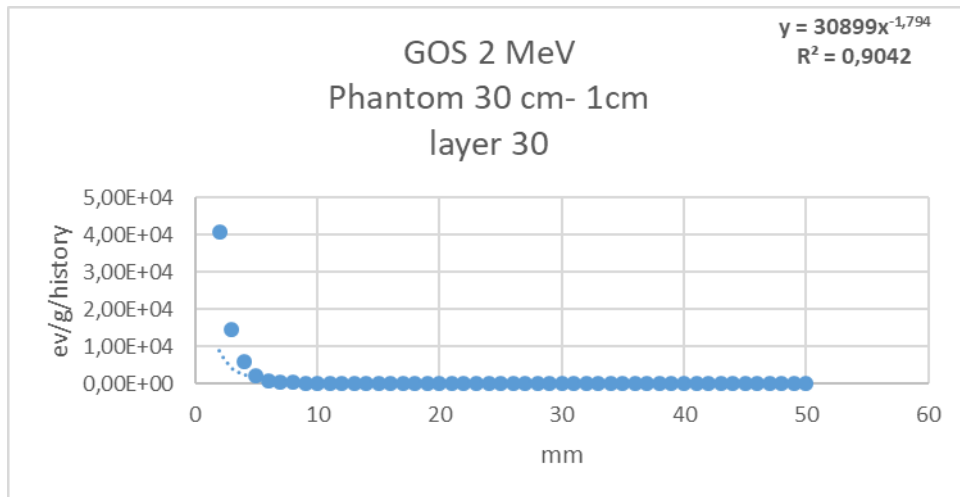


Εικόνα 228: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

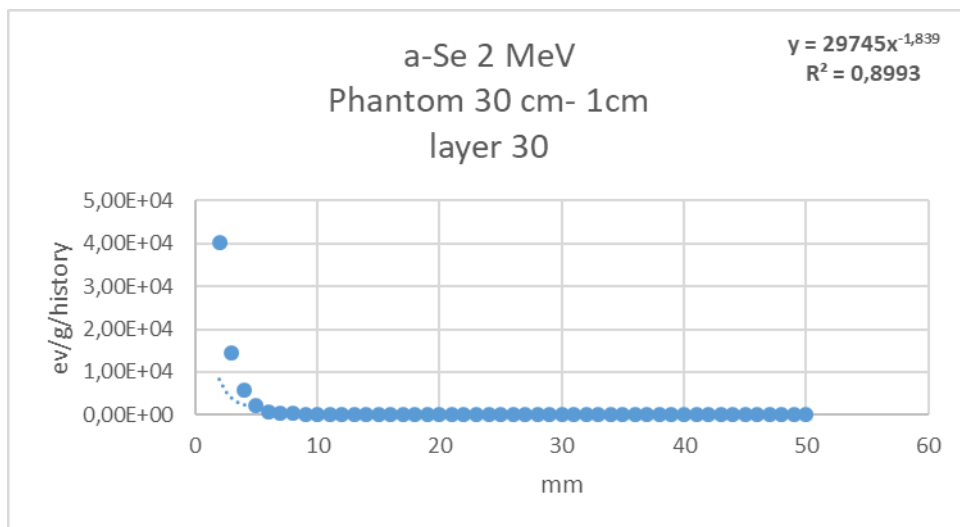
Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει συγκρίσιμες τιμές σε όλα τα υλικά. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές κοντά στην θέση 0 κυμαίνονται περίπου στο  $3,5 \times 10^4$  eV/g/history. Το  $R^2$  πλησιάζει την μονάδα σε όλα τα παραπάνω παραδείγματα.



Εικόνα 229: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

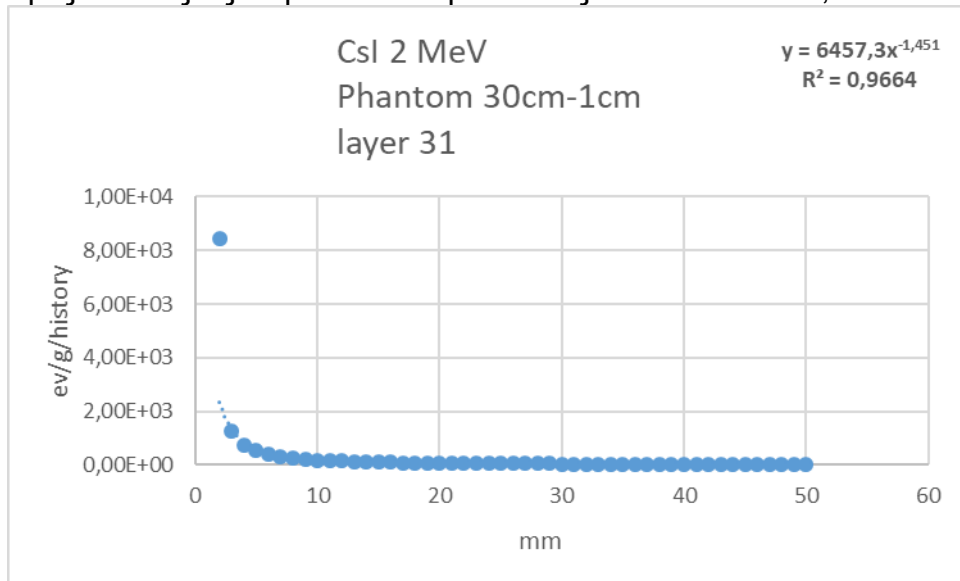


Εικόνα 230: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

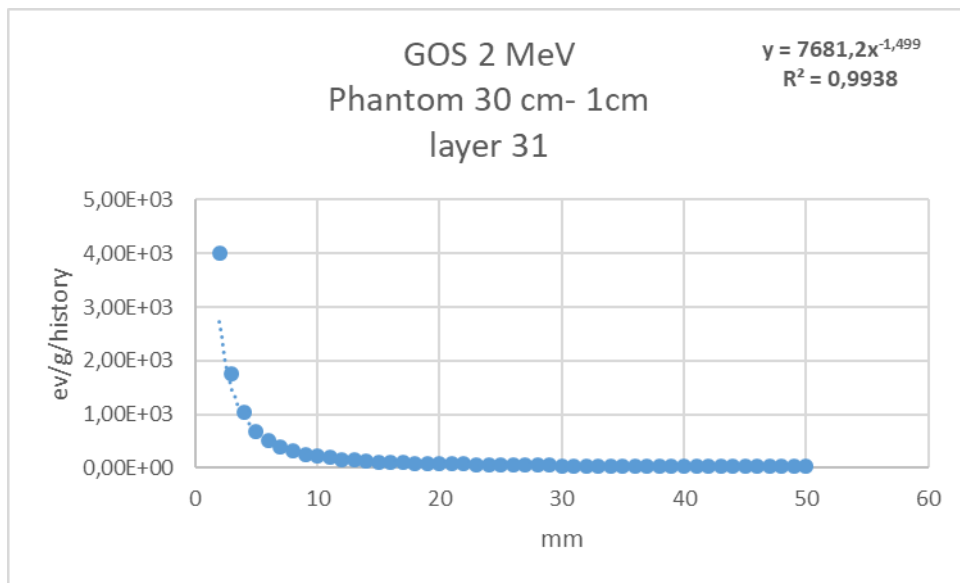


Εικόνα 231: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

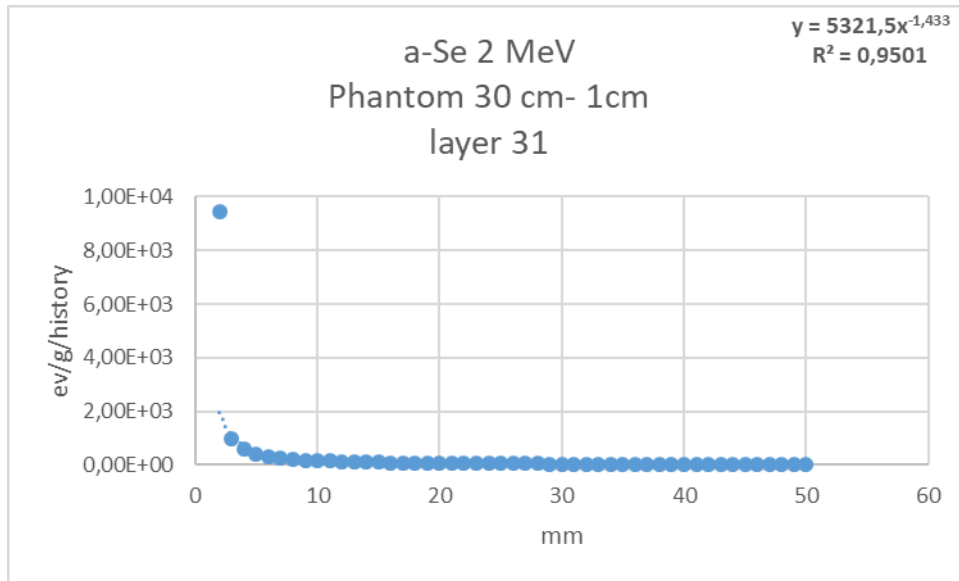
Στην περίπτωση αυτή, η κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο “μεταβατικό στάδιο” του ομοιώματος προς τον ανιχνευτή, έχει παρόμοιες τιμές σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις. Το  $R^2$  είναι  $> 0,89$ .



Εικόνα 232: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI .



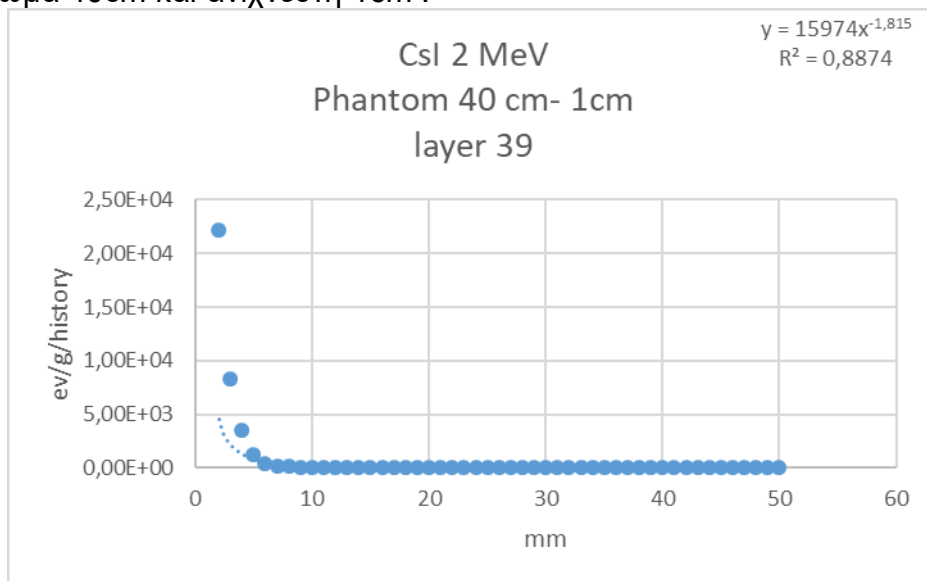
Εικόνα 233: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



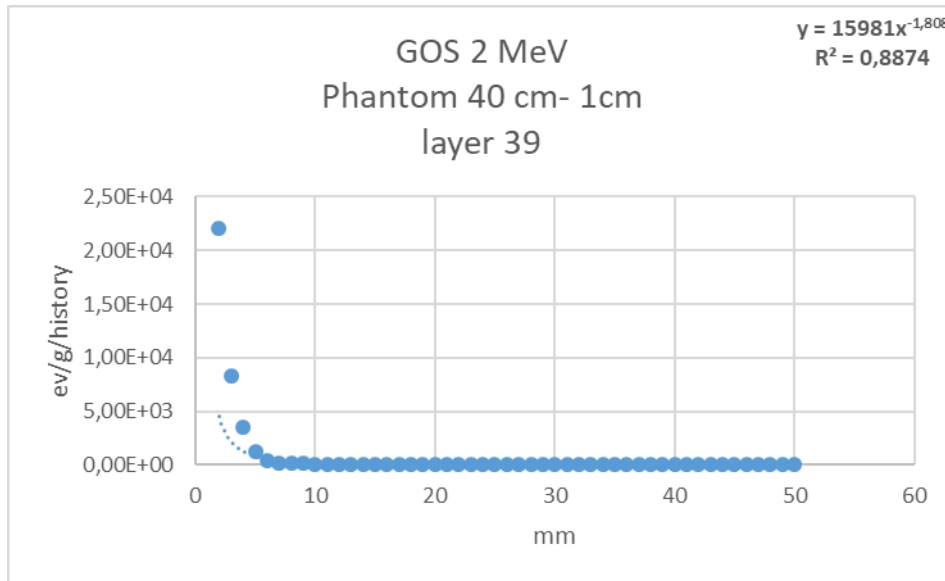
**Εικόνα 234:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Στα παραπάνω παραδείγματα το υλικό GOS παρουσιάζει ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές όσο αναφορά την κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές κοντά στην θέση 0 κυμαίνονται περίπου στο  $2 \times 10^3$  eV/g/history. Το  $R^2$  είναι 0,99 .

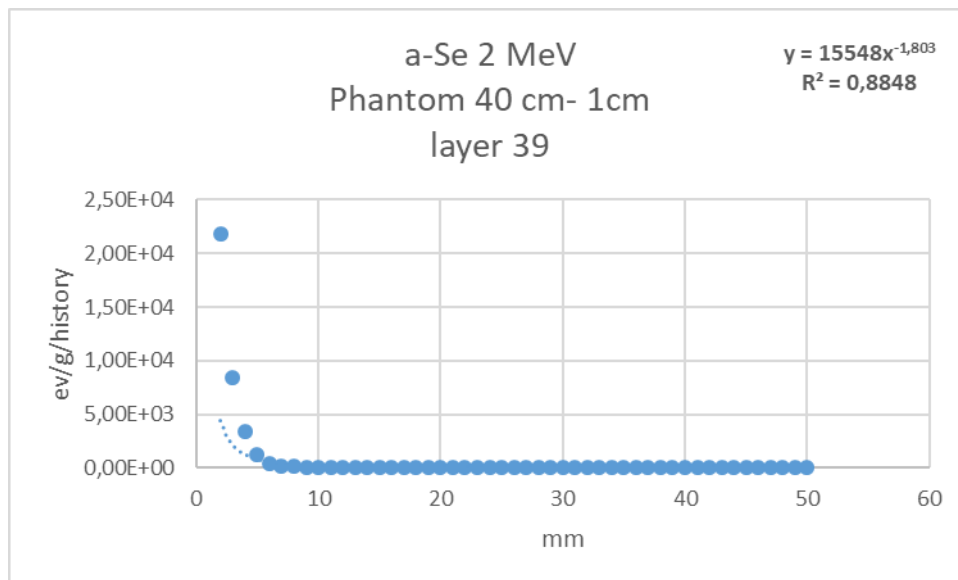
- Ομοίωμα 40cm και ανιχνευτή 1cm :



**Εικόνα 235:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

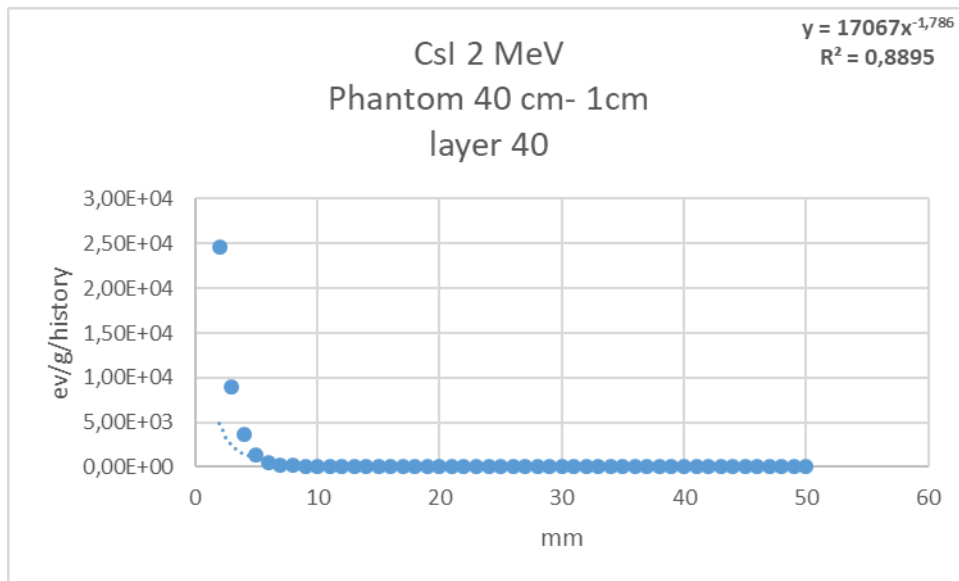


Εικόνα 236: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

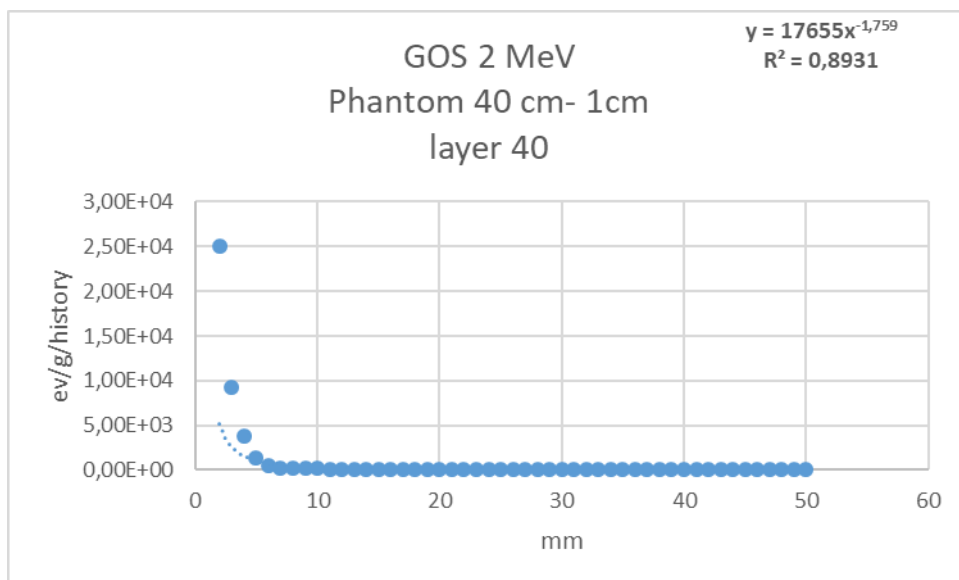


Εικόνα 237: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Στα παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι οι τιμές της κατανομής της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι συγκρίσιμη για όλα τα υλικά. Το  $R^2$  έχει ίδια τιμή σε όλες τις περιπτώσεις.

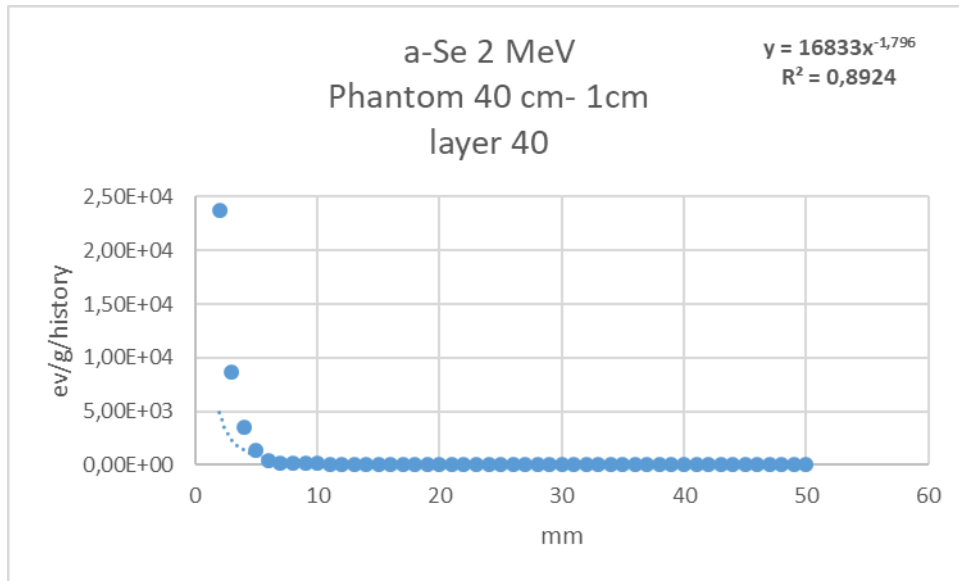


Εικόνα 238: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CSl.



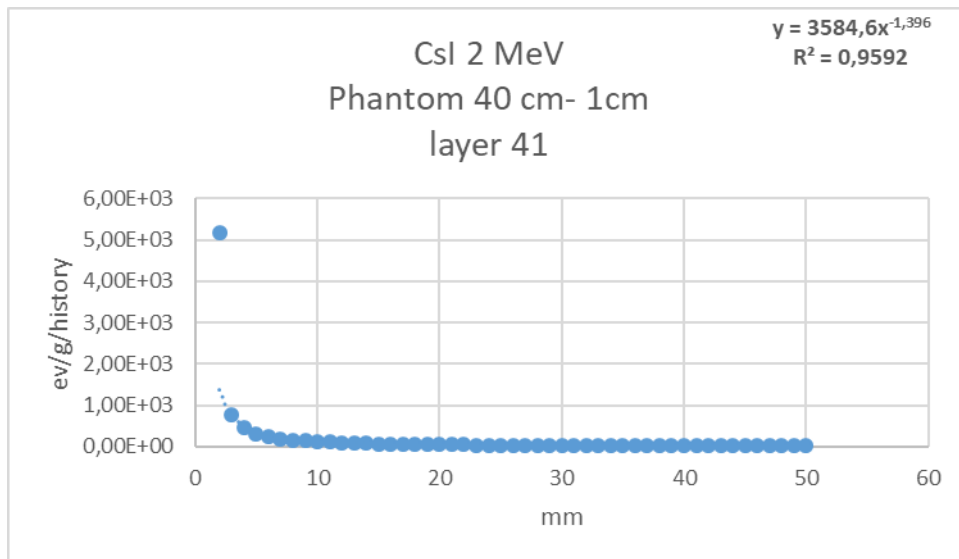
Εικόνα 239: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



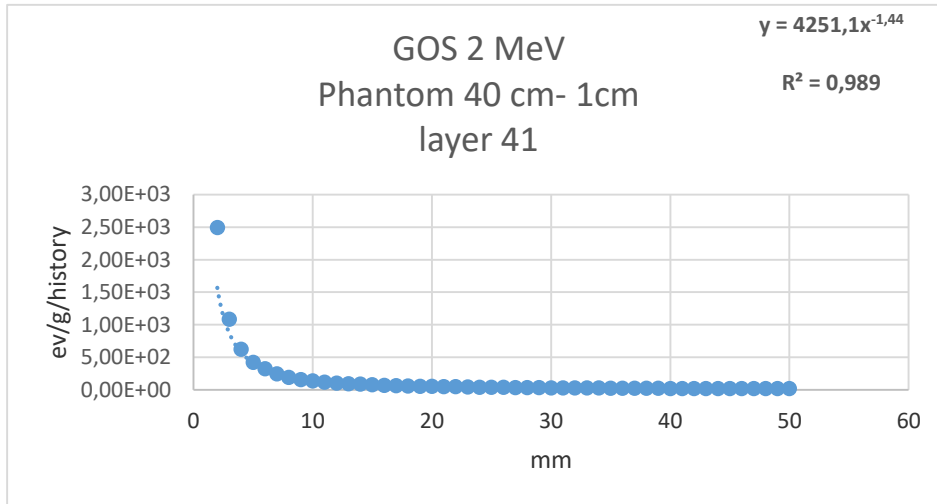


**Εικόνα 240:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

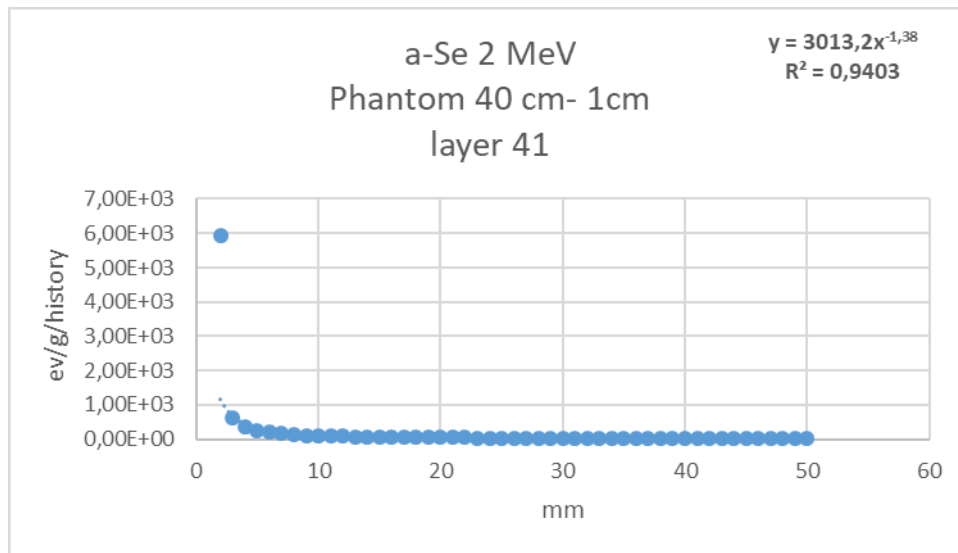
Το ίδιο ισχύει και στο “μεταβατικό στάδιο” του ομοίωματος προς τον ανιχνευτή. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές της κατανομής της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι συγκρίσιμη για όλα τα υλικά. Το  $R^2 > 0,88$  για τα παραπάνω παραδείγματα.



**Εικόνα 241:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



Εικόνα 242: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

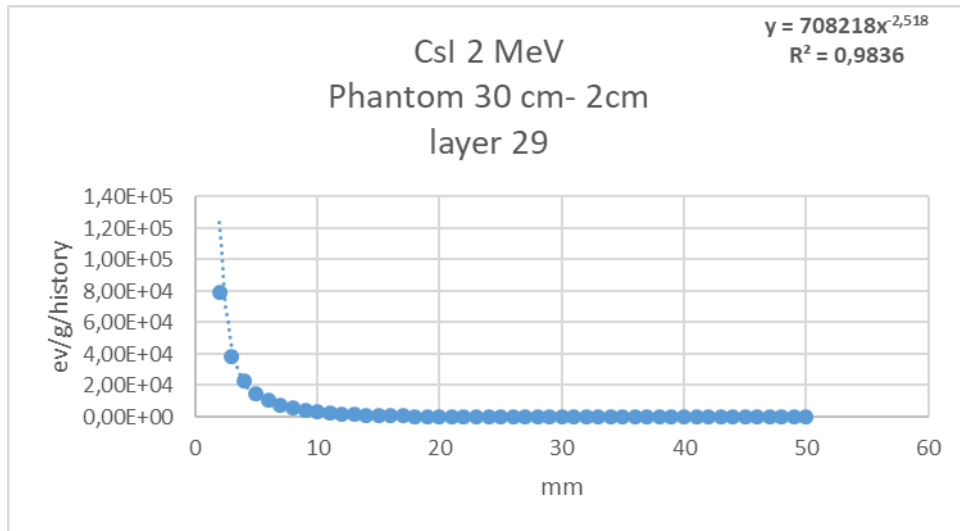


Εικόνα 243: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

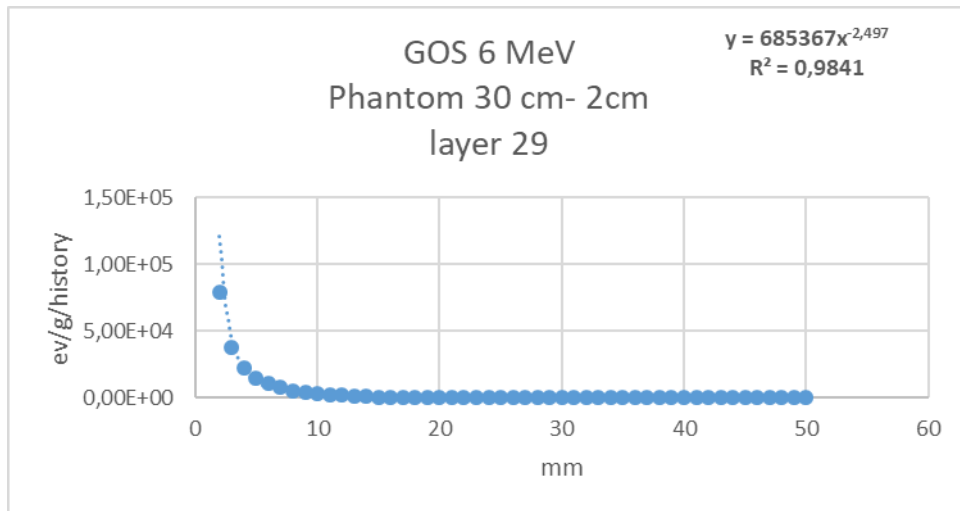
Στα παραπάνω γραφήματα το υλικό GOS παρουσιάζει ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές όσο αναφορά την κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή. Το  $R^2$  είναι 0,99 .

Εν συνεχεία ακολουθούν τα αποτελέσματα για την ενέργεια 6 MeV :

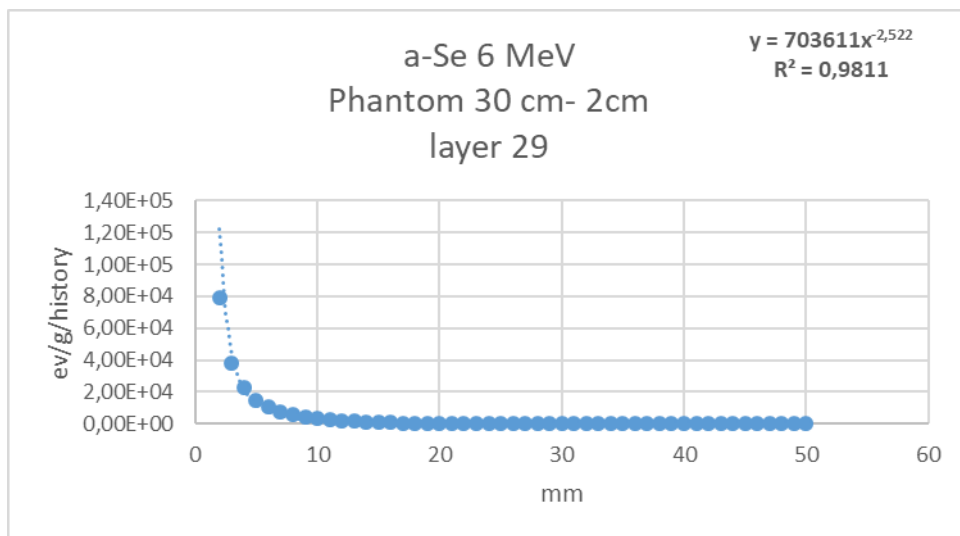
- Ομοίωμα 30cm και ανιχνευτή 2cm :



Εικόνα 244: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

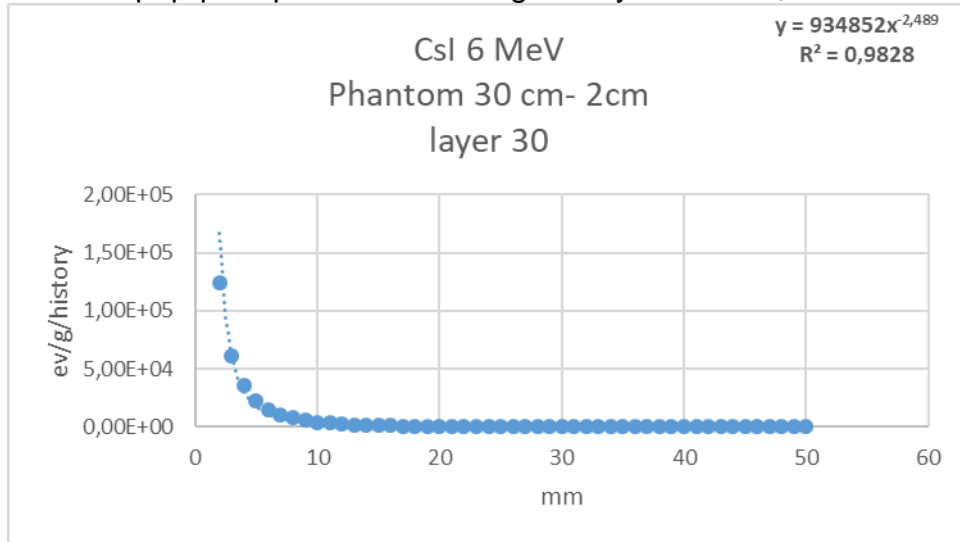


Εικόνα 245: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

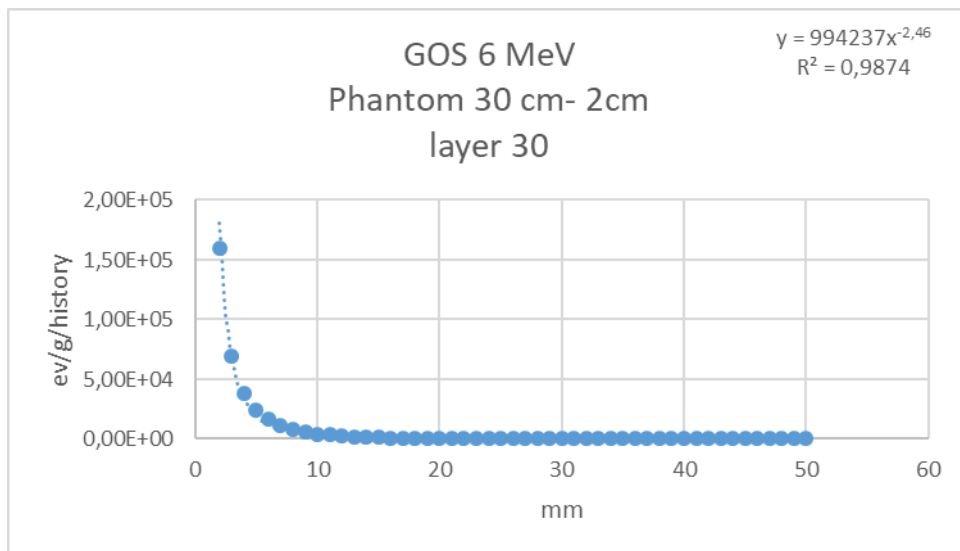


**Εικόνα 246:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

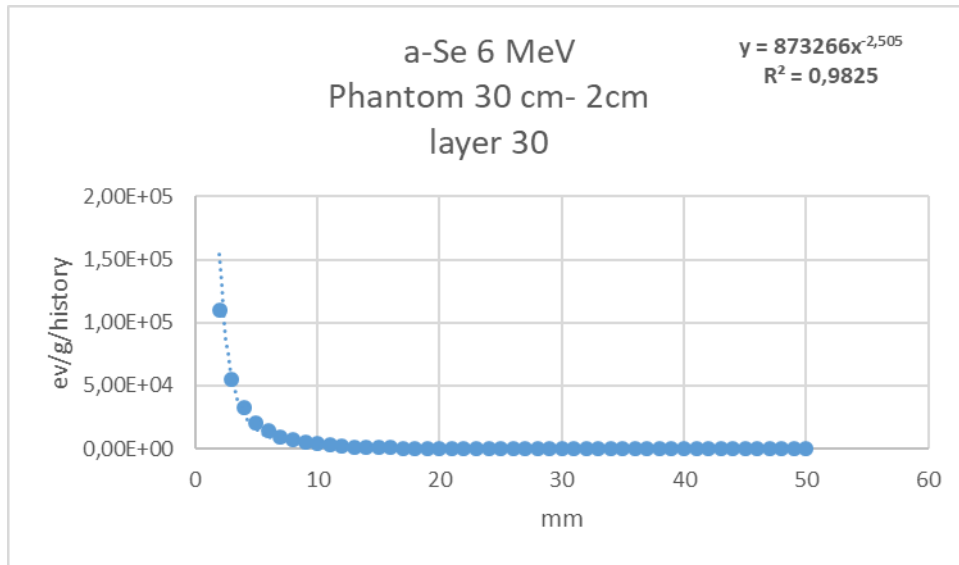
Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι η κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι ίδια. Οι τιμές είναι συγκρίσιμες για όλα τα παραπάνω υλικά. Μια ενδεικτική τιμή θεωρείται  $8 \times 10^4$  ev/g/history και  $R^2 = 0,98$ .



**Εικόνα 247:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

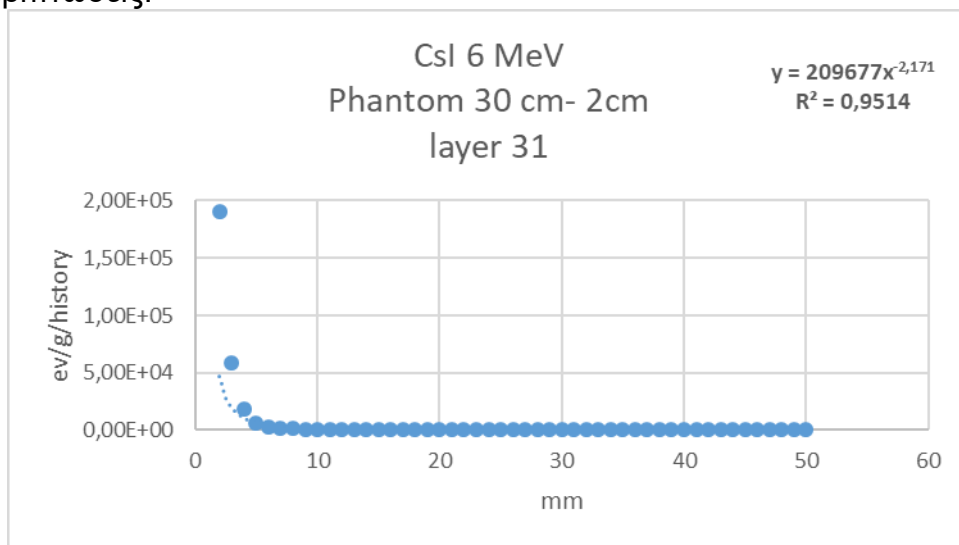


**Εικόνα 248:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

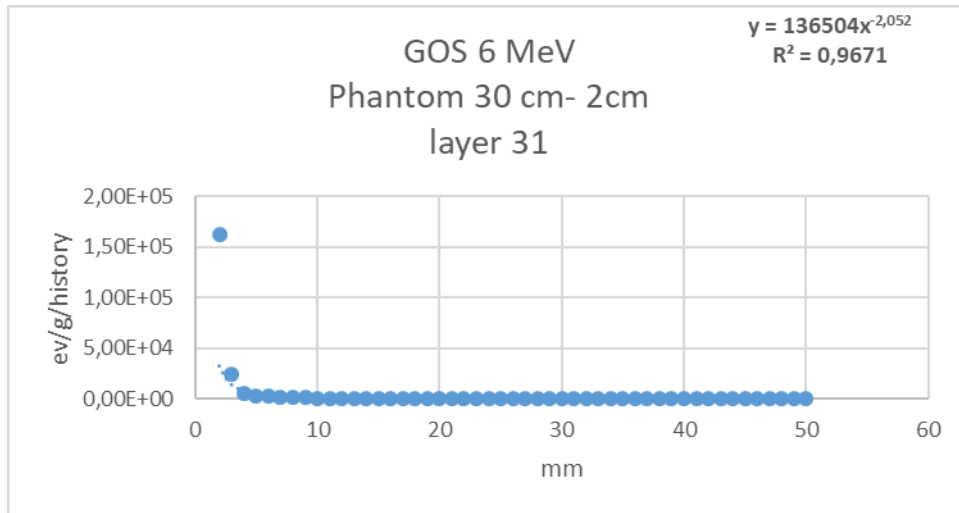


**Εικόνα 249:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

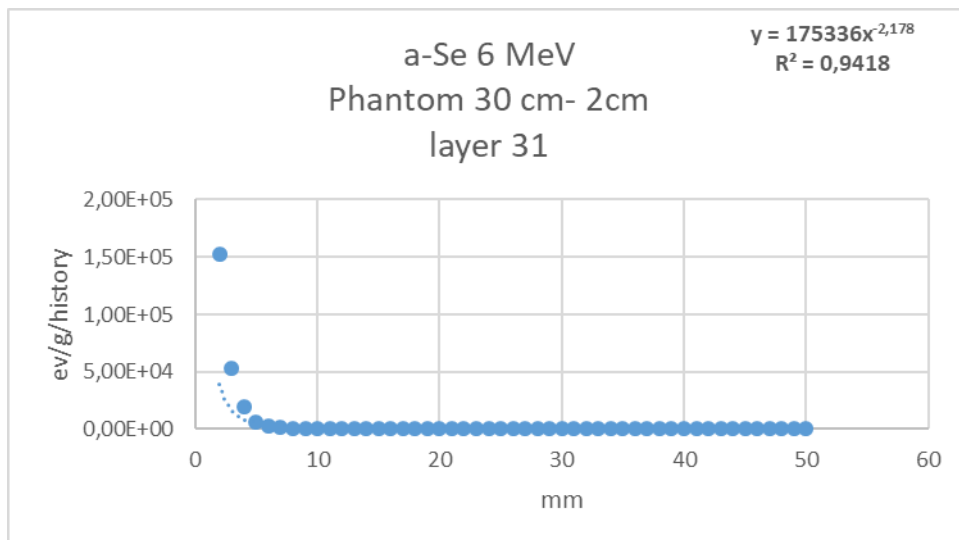
Σε αυτό το επίπεδο (layer 30) εξακολουθεί η κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας να είναι συγκρίσιμη για τα τρία υλικά. Το  $R^2$  είναι 0,98 σε όλες τις περιπτώσεις.



**Εικόνα 250:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

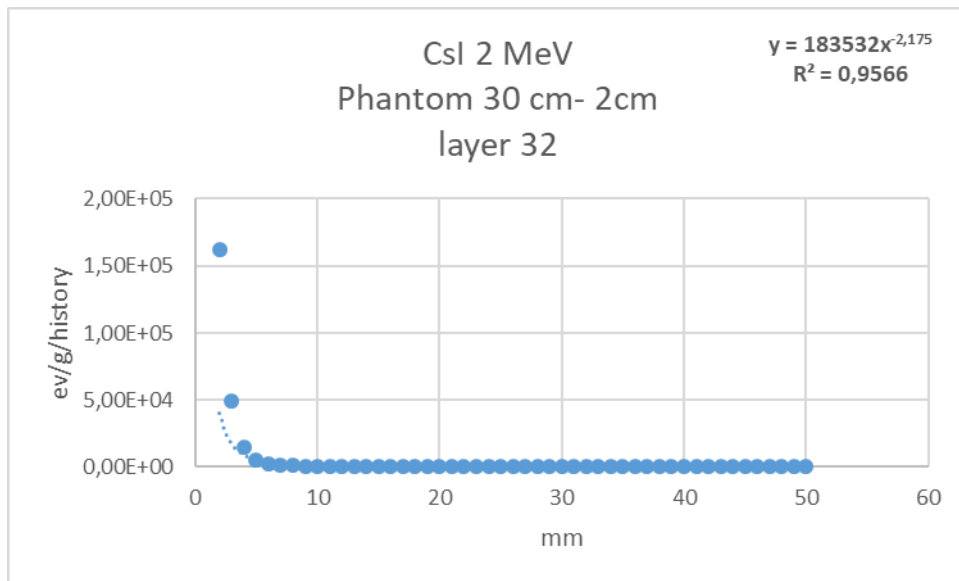


Εικόνα 251: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

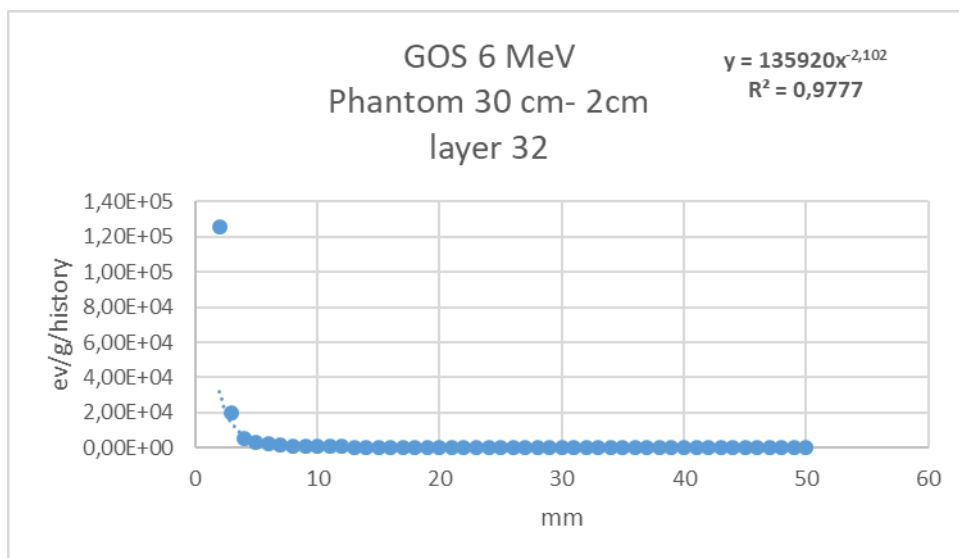


Εικόνα 252: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

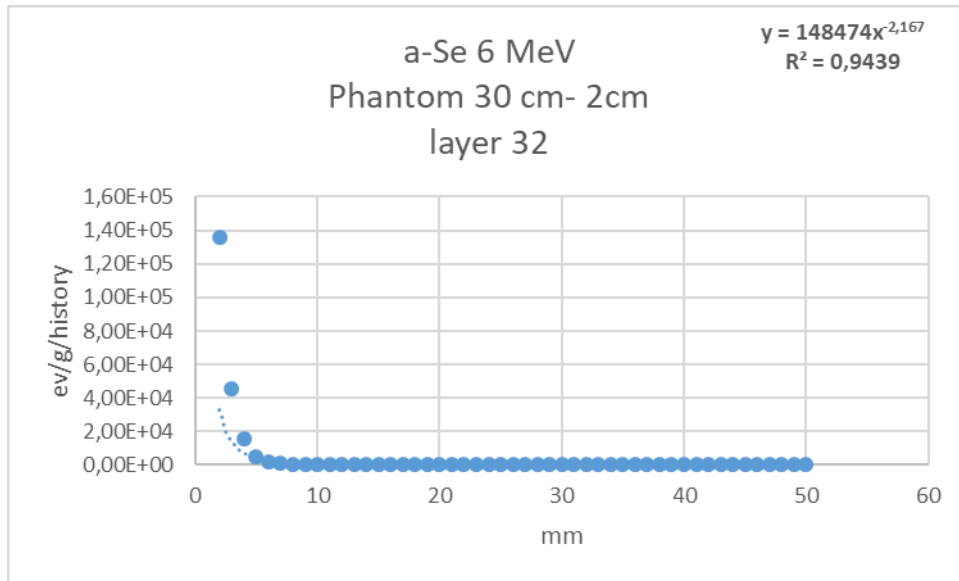
Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζονται μεγαλύτερες τιμές για το υλικό CsI όσο αναφορά την κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Μια ενδεικτική τιμή θεωρείται  $2 \times 10^5$  ev/g/history . Σε όλες τις περιπτώσεις το  $R^2$  κυμαίνεται από 0,94 έως 0,96 .



Εικόνα 253: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



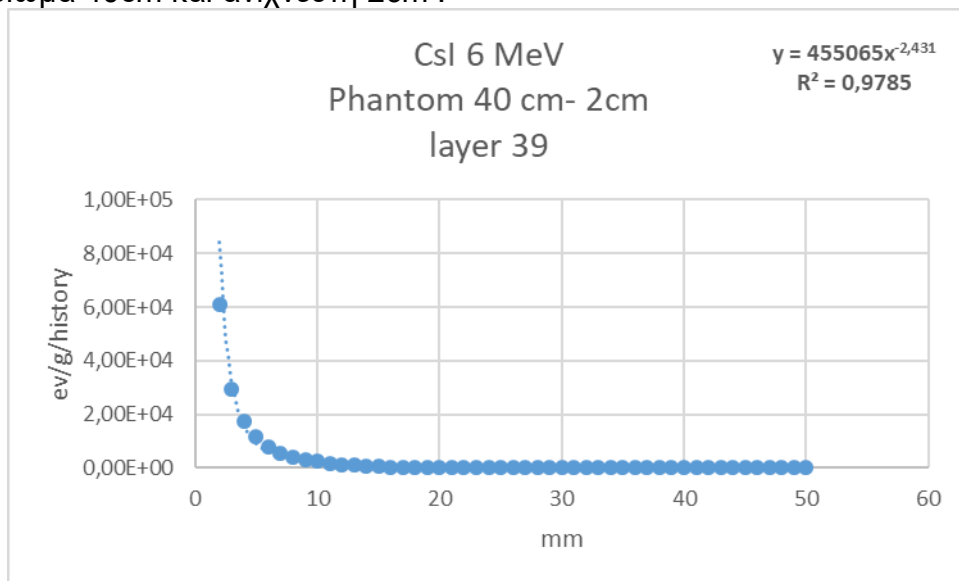
Εικόνα 254: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



**Εικόνα 255:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

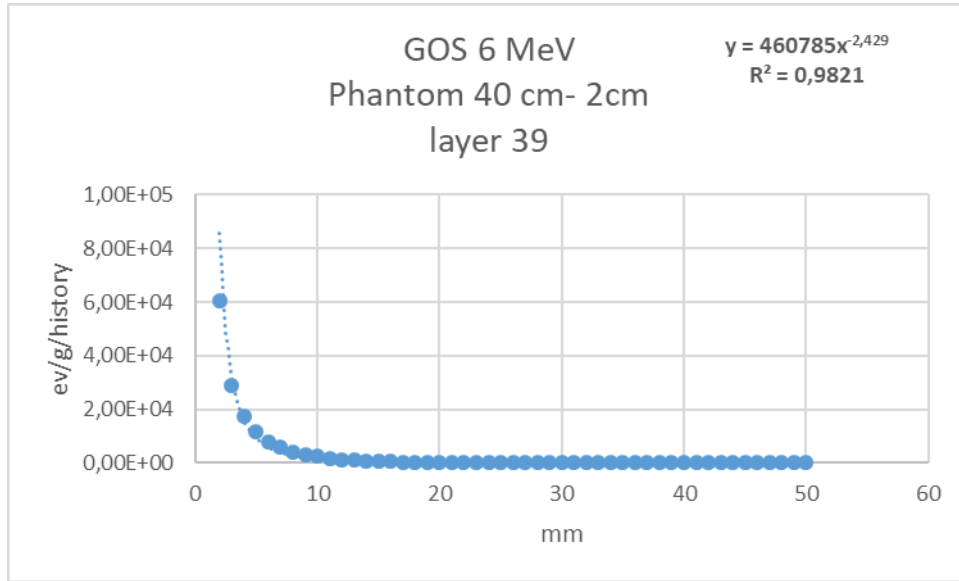
Και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται μεγαλύτερες τιμές για το υλικό CSI όσο αναφορά την κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Μια ενδεικτική τιμή θεωρείται  $1,50 \times 10^5$  ev/g/history. Σε όλες τις περιπτώσεις το  $R^2$  κυμαίνεται από 0,94 έως 0,97 .

- Ομοίωμα 40cm και ανιχνευτή 2cm :

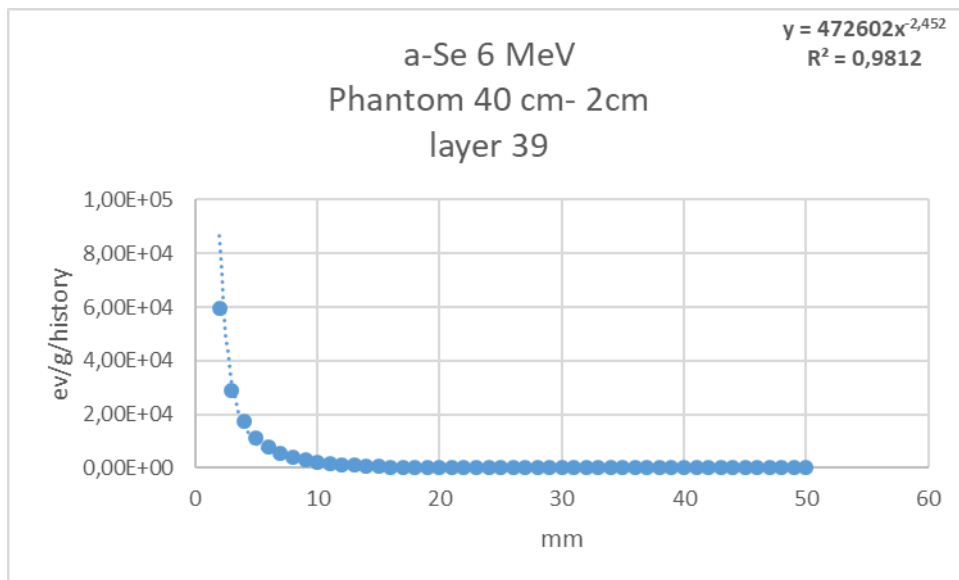


**Εικόνα 256:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



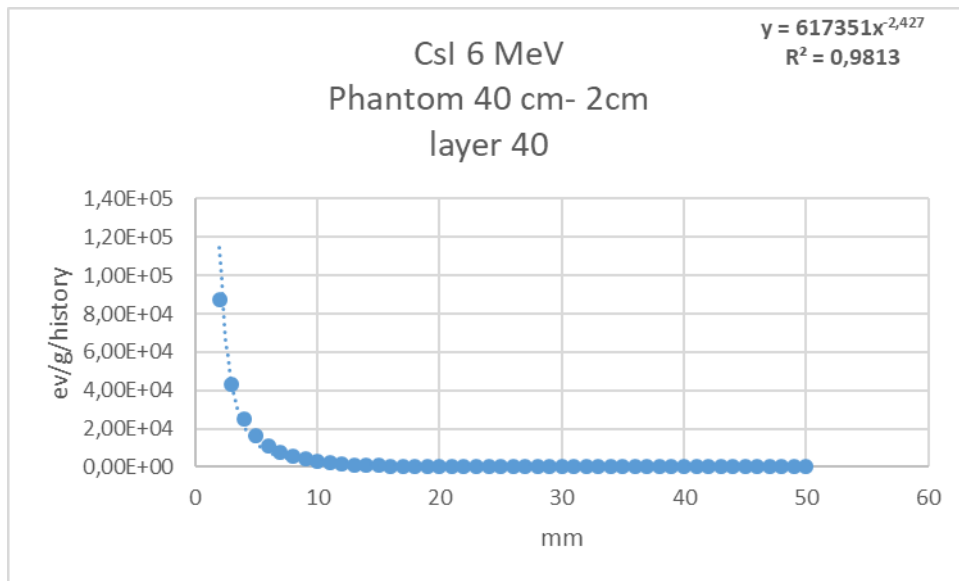


Εικόνα 257: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

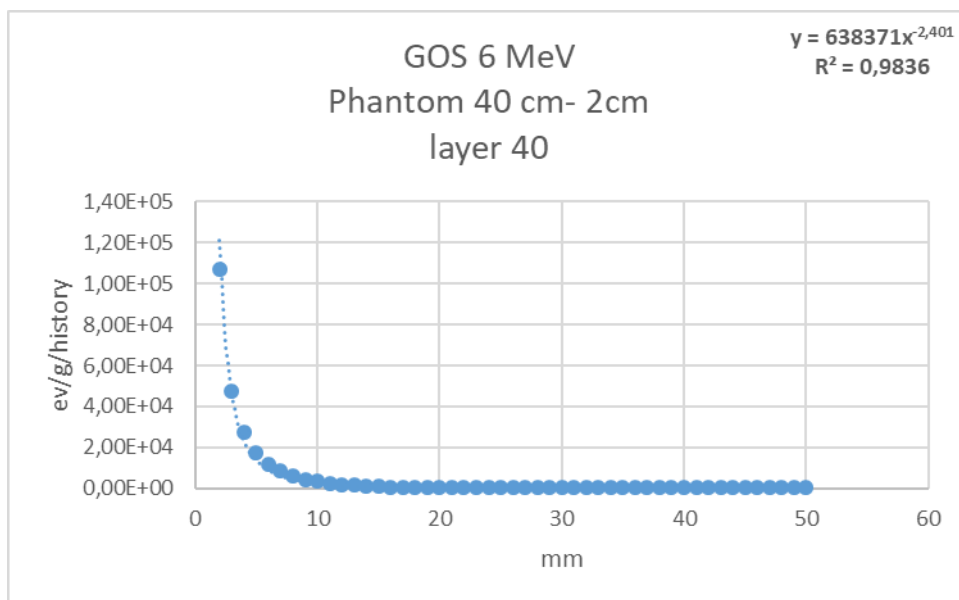


Εικόνα 258: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

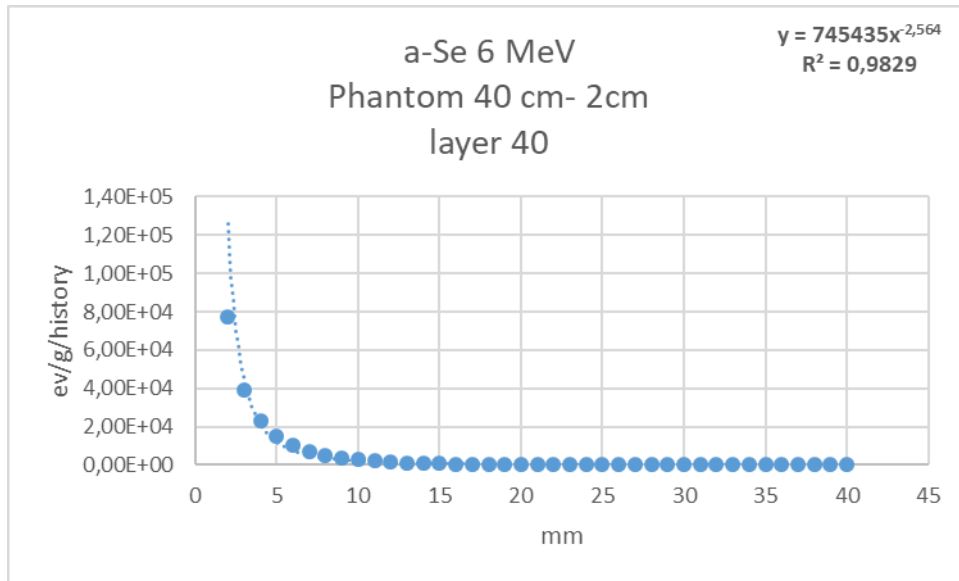
Παρατηρώντας τα τρία παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει συγκρίσιμες τιμές σε όλα τα υλικά. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές κοντά στην θέση 0 κυμαίνονται περίπου στο  $6 \times 10^4$  eV/g/history. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η σκεδαζόμενη μειώνεται μετά τα 10 mm. Το  $R^2$  σε όλες τις περιπτώσεις είναι  $>0,97$ .



Εικόνα 259: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

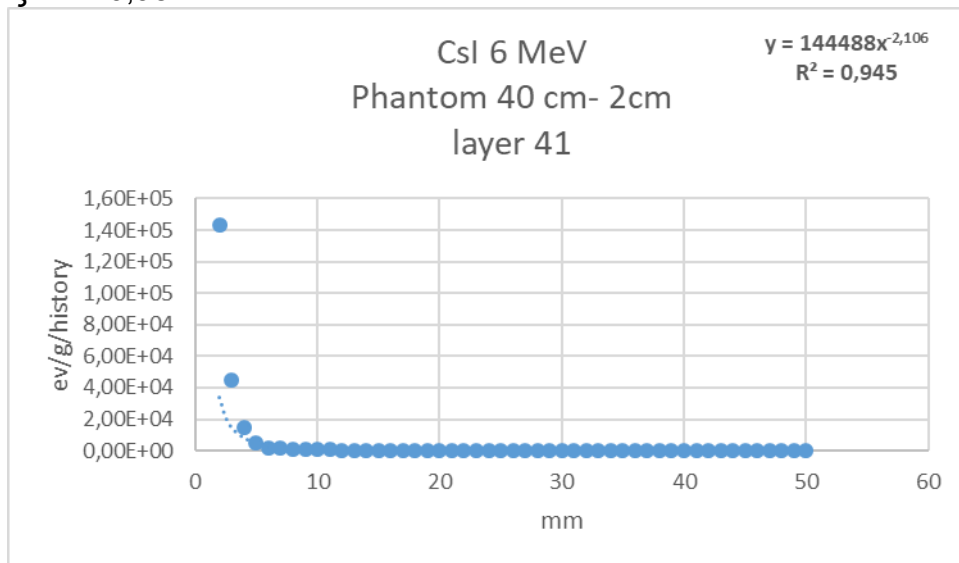


Εικόνα 260: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

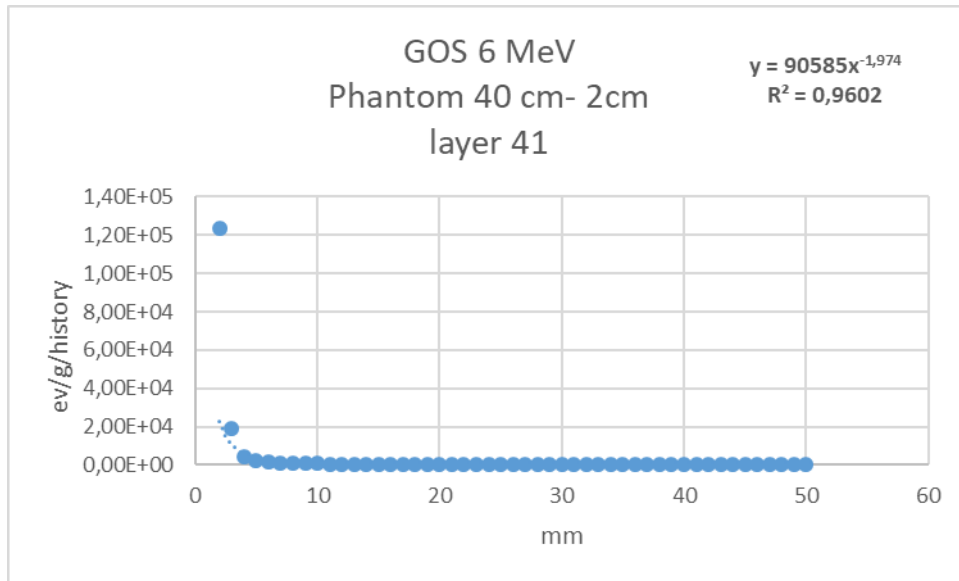


**Εικόνα 261:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

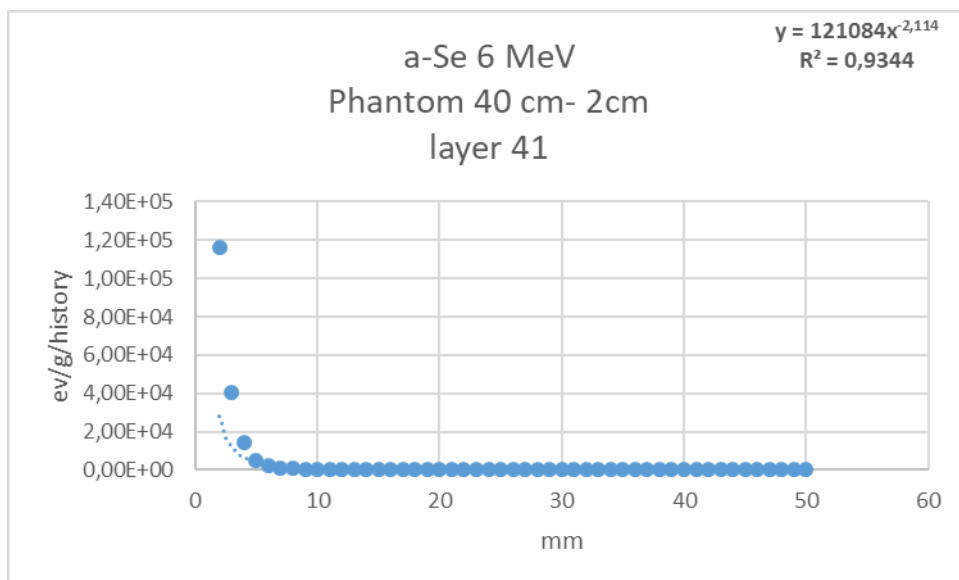
Παρατηρούμε ότι η κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για το υλικό GOS. Μια ενδεικτική τιμή θεωρείται  $1 \times 10^5$  eV/g/history. Η σκεδαζόμενη πρακτικά μειώνεται μετά τα 10 mm. Το  $R^2$  σε όλες τις περιπτώσεις είναι 0,98.



**Εικόνα 262:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.

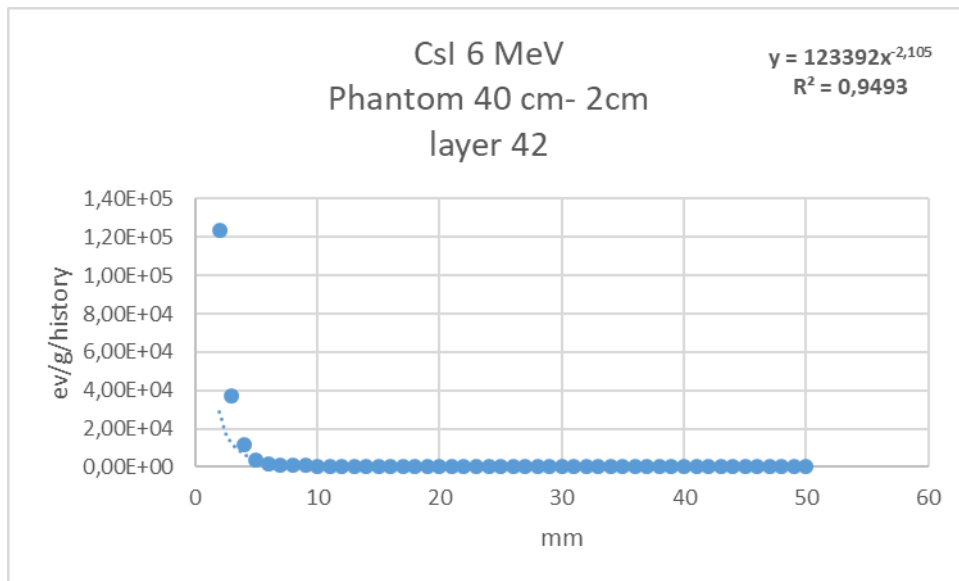


Εικόνα 263: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.

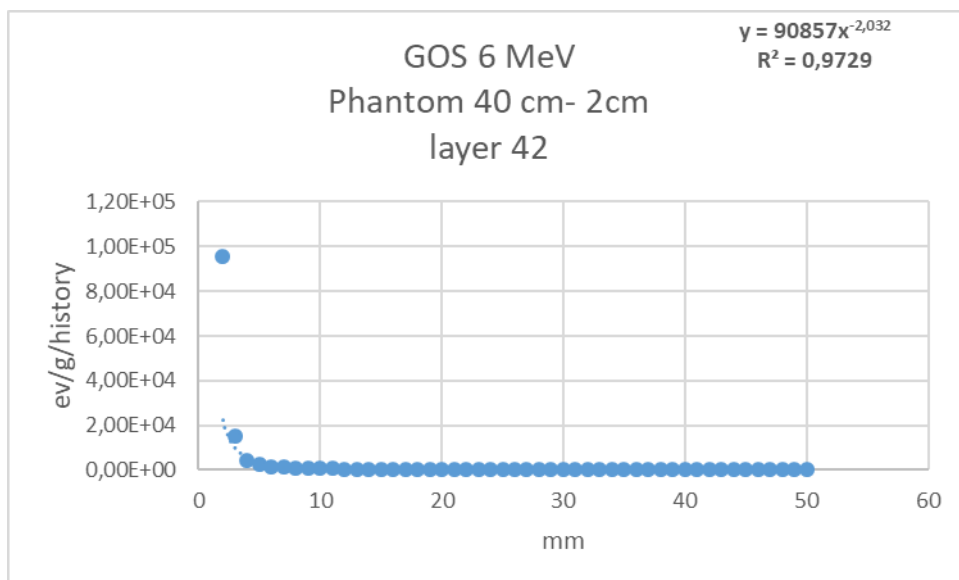


Εικόνα 264: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

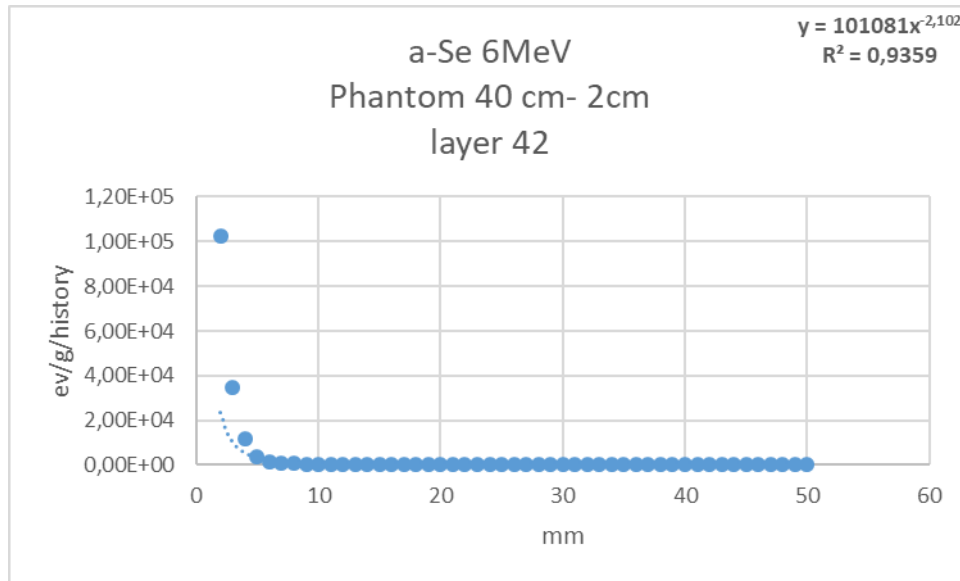
Στο επίπεδο αυτό , το υλικό CsI παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές όσο αναφορά την σκεδαζόμενη ακτινοβολία, με ενδεικτική τιμή κοντά στην θέση 0 να είναι  $1,40 \times 10^5$  eV/g/history. Το  $R^2$  κυμαίνεται από 0,93 έως 0,96 σε όλα τα παραπάνω παραδείγματα.



Εικόνα 265: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό CsI.



Εικόνα 266: Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό GOS.



**Εικόνα 267:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων για την κατανομή της ενέργειας προσομοιώνοντας το υλικό a-Se.

Στα τρία παραπάνω γραφήματα η κατανομή της δόσης από την σκεδαζόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια του ανιχνευτή παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές το υλικό CsI. Μια ενδεικτική τιμή είναι  $1,20 \times 10^5$  eV/g/history. Η σκεδαζόμενη αρχίζει να μειώνεται αισθητά λίγο πριν τα 10 mm. Το  $R^2$  κυμαίνεται από 0,93 έως 0,97 για τα παραπάνω υλικά.

### 5.1.2 Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων

Όπως παρατηρήθηκε στα παραπάνω αποτελέσματα, στο επίπεδο 19 το οποίο ανήκει στο ομοίωμα, υπήρχε μια αβεβαιότητα όσο αναφορά την κατανομή της εναπόθεσης ενέργειας της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι για ενέργεια μικρότερη των 40 keV υπήρχε μεγαλύτερη απορρόφηση στο ομοίωμα με αποτέλεσμα ο αριθμός των φωτονίων που πρόσπιπταν τελικά στα υπό εξέταση στρώματα να έχει κακή στατιστική. Σε κάθε περίπτωση ο ανιχνευτής με το μεγαλύτερο ατομικό αριθμό παρουσίαζε καλύτερη στατιστική φωτονίων και καλύτερη σύμπτωση της καμπύλης προσαρμογής όπως διαπιστώθηκε από το  $R^2$ .

Είναι σημαντικό να τονίσουμε, ότι όσο μεγαλώνει η ενέργεια των φωτονίων, η σκεδαζόμενη ακτινοβολία μηδενίζεται σε μεγαλύτερη πλάγια απόσταση από τη κεντρική δέσμη. Επίσης, στα αποτελέσματα με τις ίδιες συνθήκες, δηλαδή ίδια ενέργεια και ίδιος ανιχνευτής, παρατηρήθηκε ότι όταν έχουμε μεγαλύτερο πάχος στο ομοίωμα τότε δημιουργείται μεγαλύτερη ανακρίβεια στα αποτελέσματα.

Στο “μεταβατικό στάδιο” του ομοιώματος προς τον ανιχνευτή για τις ενέργειες  $\leq 500$  keV, ο ανιχνευτής με μεγαλύτερο ατομικό αριθμό (Z) παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά (δηλαδή η σκεδαζόμενη ακτινοβολία ακολουθεί πιο ομαλά μαθηματικοποιημένη κατανομή), πιθανόν λόγω της μειωμένης πιθανότητας οπισθοσκέδασης [20].

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια, τόσο πιο μικρό είναι το  $R^2$ . Αυτό σημαίνει ότι για τις συνθήκες αυτές η κατανομή της σκεδαζόμενης δεν μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικό βαθμό, με τις χρονικές παραμέτρους και το σύνολο των επαναλήψεων που επιλέχθηκαν στον PenEasy.

### 5.1.3 Παραδείγματα σφαλμάτων

Παρακάτω ακολουθούν μερικά παραδείγματα παρουσιάζοντας το μέγιστο σφάλμα για τις ενέργειες: 20keV, 40keV, 120keV, 1MeV. Για την ενέργεια 20 keV στην προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε το μέγιστο σφάλμα ήταν  $3,50 \times 10^2$  στο 19 layer και για συνδυασμό 5cm phantom και υλικό CsI.

Για την ενέργεια 40 keV το μέγιστο σφάλμα υπολογίσθηκε ως  $1 \times 10^3$  στο 19 layer και για συνδυασμό 8cm phantom και υλικό GOS.

Για την ενέργεια 40 keV το μέγιστο σφάλμα ήταν  $5,40 \times 10^2$  στο 19 layer και για συνδυασμό 8cm phantom και υλικό a-Se.

Για την ενέργεια 120 keV κατά την προσομοίωση το μέγιστο σφάλμα ήταν  $7,10 \times 10^2$  στο 19 layer και για συνδυασμό 40cm phantom και υλικό CsI.

Για την ενέργεια 1MeV το μέγιστο σφάλμα ήταν  $1,50 \times 10^3$  στο 29 layer και για συνδυασμό 30cm phantom και υλικό CsI.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην μελέτη αυτή εφαρμόστηκε ο κώδικας Monte Carlo με χρήση του λογισμικού πακέτου Penelope σε συνθήκες ιατρικής απεικόνισης.

Πιο συγκεκριμένα, σκοπός της μελέτης αυτής ήταν να υπολογισθεί και να μαθηματικοποιηθεί το εύρος της διασποράς της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας για διαφορετικά πάχη ομοιώματος σε κάθε προσομοίωση και για τρία τυπικά υλικά ανιχνευτών. Σε κάθε προσομοίωση υπολογίσθηκε η βέλτιστη εξίσωση που περιγράφει την πλάγια διασπορά της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

Παρατηρήθηκε ότι σε συνθήκες μικρού ατομικού αριθμού του ανιχνευτή και ταυτόχρονα μεγάλου πάχους του ομοιώματος η στατιστική των φωτονίων στα επίπεδα (layer) πριν από τον ανιχνευτή ήταν "φτωχή", δηλαδή δεν παρουσίαζε ομοιομορφία και μπορούσε κανείς να παρατηρήσει την αστάθεια που διεπτόταν στο εύρος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Μια πιθανή βελτίωση των συγκεκριμένων περιπτώσεων στα επίπεδα πριν από τον ανιχνευτή, θα είναι η επανάληψη της προσομοίωσης με μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος.

Η συγκεκριμένη εργασία μπορεί να βελτιωθεί εάν υπολογίσουμε την σκεδαζόμενη ακτινοβολία για περισσότερες ενέργειες, διότι με αυτόν τον τρόπο θα έχουμε καλύτερη "εικόνα" όσο αναφορά την σκέδαση. Επιπλέον, με την χρήση του λογισμικού Penelope έχουμε την δυνατότητα να διαφοροποιήσουμε τον χρόνο προσομοίωσης, με αποτέλεσμα να έχουμε πιο αναλυτική κατάσταση της σκέδασης στις προσομοιώσεις.

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διόρθωση της ασάφειας που προκαλεί η σκεδαζόμενη ακτινοβολία σε ανιχνευτικές διατάξεις χωρίς αντιδιαχυτικό διάφραγμα [21].



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Focusing cup	Κοιλότητα εστίασης
Tube housing	Περίβλημα
Energy intergrating	Ενεργειακή ολοκλήρωση
Photon counting	Απαρίθμηση φωτονίων
Storage phosphors	Φώσφοροι αποθήκευσης
Computed radiography	Υπολογιστική ακτινογραφία
Computed tomography	Αξονική τομογραφία
Antiscatter grid	Αντιδιαχυτικό διάφραγμα
Spectral density	Φασματική πυκνότητα
K-fluorescence characteristic radiation	K-χαρακτηριστική ακτινοβολία φθορισμού
Probability distribution fuction	Συνάρτηση κατανομής της πιθανότητας
Taillies	Καταμετρητές
Variance	Διακύμανση
Scattering model	Μοντέλο διασκορπισμού
Bucky	Αντιδιαχυτικό διάφραγμα
Variance Reduction	Τεχνικές ελάττωσης της διασποράς

## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

PSD	POSITION SENSITIVE DETECTORS
CMOS	COMPLEMENTARY METAL OXIDE SEMICONDUCTOR
Pb	PLUMBUM
PDF	PROBABILITY DISTRIBUTION FUCTION
CBCT	CONE BEAM COMPUTED TOMOGRAPHY
CCD	CHARGE-COUPLED DEVICE
RNG	RANDOM NUMBER GENERATOR

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Ι.Κανδαράκης «Φυσική της ιατρικής απεικόνισης με ιοντίζουσες ακτινοβολίες» (Μέρος Α),Αθήνα 2016  
[2]eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/CHEM165/03-SAT\_nondestructive.pdf  
[3]Ελληνική επιτροπή ατομικής ενέργειας , «Μαθήματα ακτινοπροστασίας για χειριστές ιατρικών μηχανημάτων ιοντίζουσων ακτινοβολιών» Εργαστήριο Ιατρικής φυσικής, Ιατρική σχολή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, ,Αθήνα Ιούνιος 2011  
[4] [J. E. TURNER, 11. A. WRIGHT and R. N. HAMM Health and Safety Research Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831],1985  
[5] Δ.Μακρής, «Εφαρμογή του κώδικα Μόντε Κάρλο PENELOPE στην προσομοίωση κλινικών και φυσικών προβλημάτων ακτινοθεραπευτικής ογκολογίας».Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία,Πανεπιστήμιο Πατρών ,Τμήμα Φυσικής Ιατρικής,2013  
[6] P. Andreo, Monte Carlo techniques in medical radiation physics, Phys. Med. Biol. 36 (1991) 861–920  
[7] Konstantinidis, A., Liaparinos, P., Kalivas, N., Panayiotakis, G., Kandarakis, I. Investigation of two heavy element scintillators by Monte-Carlo methods (2009) Journal of Instrumentation, 4 (5), art. no. P05019  
[8] Liaparinos, P.F., Kandarakis, I.S. The Monte Carlo evaluation of noise and resolution properties of granular phosphor screens (2009) Physics in Medicine and Biology, 54 (4), pp. 859-874.  
[9] Liaparinos P., Kandarakis I., Cavouras D., Kalivas N., Delis H. and Panayiotakis G.: “Evaluation of high packing density powder X-ray screens by Monte Carlo methods” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 580, 427-429, 2007  
[10] Nikolopoulos D., Kalyvas N., Valais I., Argyriou X., Vlamakis E., Sevvos T. and Kandarakis I.: “A semi-empirical Monte Carlo based model of the Detector Optical Gain of Nuclear Imaging scintillators”, JINST, 7, P11021, 2012.  
[11] Spyrou, G., Tzanakos, G., Nikiforides, G., Panayiotakis, G. A Monte Carlo simulation model of mammographic imaging with x-ray sources of finite dimensions Physics in Medicine and Biology, 47(6), pp. 917-933, 2002  
[12] M. Koutalonis, M., Delis, H., Spyrou, G., L. Costaridou, Tzanakos, G., Panayiotakis, G., Monte Carlo studies on the influence of focal spot size and intensity distribution on spatial resolution in magnification mammography Physics in Medicine and Biology 53(5), pp. 1369-1384 2008  
[13] Καλαμαράς Δημήτρης « Αριθμητική Ανάλυση» Π.Μ.Σ. Μαθηματικού, 2001-02  
[14] F. Salvat, PENELOPE, A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France, 2015.  
[15]J. Sempau, E. Acosta, J. Baró, J. M. Fernández-Varea and F. Salvat, An algorithm for Monte Carlo simulation of coupled electron-photon transport, Nucl. Instrum. Meth. B 132 (1997) 377-390.  
[16]J. Baró, J. Sempau, J. M. Fernández-Varea and F. Salvat, PENELOPE: An algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter, Nucl. Instr. and Meth. B 100 (1995) 31-46.  
[17]J. Sempau, A. Badal and L. Brualla, A PENELOPE-based system for the automated Monte Carlo simulation of clinacs and voxelized geometries--application to far-from-axis fields, Med. Phys 38 (2011) 5887-5895.  
[18] A Badano & J Sempau, MANTIS: combined x-ray, electron and optical Monte Carlo simulations of indirect radiation imaging systems, Phys. Med. Biol. 51 (2006) 1545–1561.  
[19] Θεοδούλα Ν.Γράφα «Προγραμματίζοντας με FORTRAN 90» ,Εκδόσεις Τζιόλα,2013  
[20] J.H. Hubbel, Review of photon interaction cross section data in the medical and biological context, Phys. Med. Biol. 44 (1999) R1–R22  
[21]Sorapong Aootaphao, Saowapak S. Thongvigitmanee, Jartuwat Rajruangrabin, Chalinee Thanasupsombat, Tanapon Srivongsa, and Pairash Thajchayapong X-Ray Scatter Correction on Soft Tissue Images for Portable Cone Beam CT BioMed Research International Volume 2016, Article ID 3262795, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3262795>