



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

**Μελέτη μεταφοράς σήματος
ανιχνευτικών διατάξεων
στην Πυλαία Απεικόνιση
μέσω Θεωρίας Γραμμικών Συστημάτων**

ΣΠΥΡΙΔΩΝ-ΙΑΣΩΝ ΒΑΛΒΗΣ

Αριθμός Μητρώου: 19388126

Επιβλέπων Καθηγητής

Νεκτάριος Καλύβας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα 01/07/2022

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ο Επιβλέπων Καθηγητής

Νεκτάριος Καλύβας	Αικατερίνη Σκουρολιάκου	Χρήστος Μιχαήλ
Αναπληρωτής Καθηγητής	Αναπληρώτρια Καθηγήτρια	Επίκουρος Καθηγητής
[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]	[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]	[ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο υπογράφων Σπυρίδων-Ιάσων Βάλβης του Εμμανουήλ, με αριθμό μητρώου 19388126 φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:


«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ημερομηνία

01/07/2022

Ο Δηλών



Σπυρίδων-Ιάσων Βάλβης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, αρχικά αναφέρονται χρήσιμα στοιχεία από τη Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων, η οποία επιλέγεται ως κατάλληλο μέσο για τη μελέτη του μεταδιδόμενου σήματος μέσα από τις ανιχνευτικές διατάξεις στην Πυλαία Απεικόνιση. Επίσης, γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στην Ακτινοθεραπεία και ειδικότερα, στην Πυλαία Απεικόνιση.

Υστερα, περιγράφονται η δομή και οι αρχές λειτουργίας διαφόρων συστημάτων Πυλαίας Απεικόνισης. Η μελέτη επικεντρώνεται στα συστήματα AMFPI έμμεσης ανίχνευσης, στα οποία εφαρμόζεται η Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων για τη μελέτη του σήματος και του δημιουργούμενου θορύβου, δηλαδή τα μεγέθη που καθορίζουν την ποιότητα εικόνας.

Για αυτόν τον σκοπό, αρχικά το υπό εξέταση σύστημα εκφράζεται ως ένα σύνολο αλληλοδιαδοχικών σταδίων, έτσι ώστε να μπορεί να μελετηθεί με χρήση της Θεωρίας Γραμμικών Συστημάτων. Υστερα, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις τύπου Monte Carlo (MC) με το πακέτο λογισμικού PENELOPE, οι οποίες αφορούν τα πρώτα στάδια του συστήματος, δηλαδή τα στάδια του ανιχνευτή. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επεξεργάζονται κατάλληλα και υπολογίζονται η μέση τιμή του σήματος και το φάσμα ισχύος θορύβου (NPS) στην έξοδο του ανιχνευτή του συστήματος. Τα ίδια μεγέθη, υπολογίζονται διαδοχικά και στα επόμενα στάδια, μέχρι την έξοδο του συστήματος. Η εφαρμογή, αφορά τιμές συγκεκριμένης ενέργειας προσπίπτοντων φωτονίων X ίσες με 1, 2, 4 και 8 MeV και πάχη φωσφόρου του μετατροπέα 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm.

Όσον αφορά τη μέση τιμή του σήματος, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για δεδομένο πάχος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ του ανιχνευτή/μετατροπέα, η μέση τιμή του σήματος εξόδου του συστήματος αυξάνει με αύξηση της ενέργειας των προσπίπτοντων φωτονίων. Επίσης, για δεδομένη τιμή ενέργειας των προσπίπτοντων φωτονίων, η μέση τιμή του σήματος εξόδου του συστήματος αυξάνει με αύξηση του πάχους του φωσφόρου.

Όσον αφορά το φάσμα ισχύος θορύβου (NPS), τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για δεδομένο πάχος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ του ανιχνευτή/μετατροπέα, το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του συστήματος αυξάνει με αύξηση της ενέργειας των προσπίπτοντων φωτονίων. Επίσης, για δεδομένη τιμή ενέργειας των προσπίπτοντων φωτονίων, το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του συστήματος αυξάνει με αύξηση του πάχους του φωσφόρου. Ακόμα, επισημαίνεται ότι το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του συστήματος για δεδομένες διαστάσεις φωτοδιόδων, είναι ανάλογο του τετραγώνου των διαστάσεων των εικονοστοιχείων.

Επιπλέον, οι μεταβολές τόσο της μέσης τιμής σήματος εξόδου όσο και του φάσματος ισχύος του θορύβου εξόδου για τις χαμηλότερες τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1 MeV και 2 MeV που εξετάζονται, δεν είναι σημαντικές καθώς το πάχος του φωσφόρου αλλάζει.

Λέξεις Κλειδιά: *Ακτινοθεραπεία, Πυλαία Απεικόνιση, μετατροπείς ακτίνων X, Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων, AMFPI, έμμεση ανίχνευση*

ABSTRACT

In the present work, useful data from Linear Systems Theory are initially reported, while this theory is selected as a suitable mean for the study of signal transmission through the detection devices in the Portal Imaging. Also, there is a brief introduction to Radiotherapy and in particular, to the Portal Imaging.

Next, the structure and operating principles of various Portal Imaging systems are described. The study focuses on AMFPI indirect detection systems, to which the Linear Systems Theory is applied to study the signal and the noise generated, the quantities that determine the image quality.

For this purpose, such a system is initially expressed as a set of successive stages, so that it can be studied using Linear Systems Theory. Monte Carlo (MC) type simulations with PENELOPE simulation software package, which involve the first stages of the system, the detector stages. The simulation results are properly processed and the mean signal value and noise power spectrum (NPS) at the output of the system detector are calculated. The same quantities are calculated successively in the next stages, until the system output. The application concerns specific energy values of incident photons X equal to 1, 2, 4 and 8 MeV and phosphor thickness of the inverter 0.04, 0.06, 0.10 and 0.13 cm.

Regarding the average value of the signal, the results show that for a given thickness of phosphor $Gd_2O_2S:Tb$ of the detector / converter, the average value of the output signal of the system increases with increasing energy of the incident photons. Also, for a given energy value of the incident photons, the average value of the system output signal increases with increasing phosphor thickness.

Regarding the noise power spectrum (NPS), the results show that for a given $Gd_2O_2S:Tb$ phosphor thickness of the detector / inverter, the noise power spectrum at the system's output increases with increasing energy of the incident photons. Also, for a given energy value of the incident photons, the noise power spectrum at the system's output increases with increasing phosphor thickness. Furthermore, it is pointed out that the noise power spectrum at the output of the system for given dimensions of photodiodes, is proportional to the square of the dimensions of the pixels.

In addition, the changes in both the mean output signal value and the output noise power spectrum for the lower 1 MeV and 2 MeV incident photon energy values under consideration are not significant as the phosphor thickness changes.

Keywords: *Radiotherapy, Portal Imaging, X-rays' converters, Linear Systems Theory, AMFPI, indirect detection*

Ευχαριστίες:

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022 στο Τμήμα Μηχανικών Βιοϊατρικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (ΠΑΔΑ). Ολοκληρώθηκε υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή ΠΑΔΑ κ. Νεκτάριου Καλύβα, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για το φιλικό κλίμα συνεργασίας, την καθοδήγηση και τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε για τη μεταφορά της γνώσης.

Επίσης, ευχαριστώ και τα άλλα δύο μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΠΑΔΑ κα. Αικατερίνη Σκουρολιάκου και τον Επίκουρο Καθηγητή ΠΑΔΑ κ. Χρήστο Μιχαήλ για τη συμμετοχή τους στη διαδικασία.

Υπό μία διαφορετική έννοια, θέλω ακόμα να ευχαριστήσω την κόρη μου Φλώρα (δυόμισι ετών), η οποία από τον Ιανουάριο του 2020 που γεννήθηκε έως τώρα, κάνει μαύρη υπομονή βλέποντάς με καθημερινά να μοιράζω τον χρόνο μου σε εκείνη και τον υπολογιστή μου. Ευχαριστώ βεβαίως και τη γυναίκα μου Βασιλική, η οποία – συνάδελφός μου και εκείνη, Φυσικός – διαβάξει επίσης για δεύτερο βασικό πτυχίο δίνοντάς μου κουράγιο και έχει ομορφύνει τη ζωή μου με την παρουσία της και το υπέροχο προαναφερθέν πλασματάκι.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1. Προαπαιτούμενα στοιχεία από τη θεωρία	9
1.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων.....	9
1.2 Στοιχεία Ακτινοθεραπείας - Πυλαία Απεικόνιση και Ανιχνευτικές Διατάξεις .	11
2. Συστήματα πυλαίας απεικόνισης (EPID)	13
2.1 Συστήματα EPID βασιζόμενα σε κάμερα-καθρέπτη-φακό (Camera-Mirror-Lens-based EPID)	13
2.2 Συστήματα EPID σάρωσης μήτρας θαλάμου ιονισμού (Scanning matrix ionization chamber EPID).....	14
2.3 Συστήματα EPID ενεργού πίνακα απεικόνισης επίπεδης οθόνης (Active Matrix, Flat-Panel Imager - AMFPI EPID)	14
2.3.1 Συστήματα AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης.....	15
2.3.2 Θεωρητικό μοντέλο αλληλοδιαδοχικών διαδικασιών για σύστημα AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης	16
2.4 Υλικά και πάχη μετατροπέων των ακτίνων X στις EPID.....	18
3. Εφαρμογή: Μεταφορά σήματος σε σύστημα AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης..	20
3.1 Χρησιμοποιούμενο μοντέλο αλληλοδιαδοχικών διαδικασιών	20
3.2 Δεδομένα προσομοιώσεων και αρχική επεξεργασία τους.....	21
3.3 Υπολογισμός παραμέτρων στην έξοδο του μετατροπέα	23
3.3.1 Μέση τιμή M_A του σήματος εξόδου του μετατροπέα.....	23
3.3.2 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_A(u)$ στην έξοδο του μετατροπέα	27
3.4 Υπολογισμός παραμέτρων στην έξοδο του συστήματος.....	28
3.4.1 Μέση τιμή M_{OUT} του σήματος εξόδου του συστήματος	28
3.4.2 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{OUT}(u)$ στην έξοδο του συστήματος	29
3.4.2.1 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{B1}(u)$ στην έξοδο του σταδίου στοχαστικής ενίσχυσης B_1	29
3.4.2.2 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{B2}(u)$ στην έξοδο του σταδίου καθορισμένης ασάφειας B_2	30
3.4.2.3 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{B3}(u)$ στην έξοδο του σταδίου καθορισμένης ασάφειας B_3	31
4. Αποτελέσματα.....	32
4.1 Η μέση τιμή του σήματος M_{OUT} στην έξοδο του συστήματος	32
4.2 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{OUT}(u)$ στην έξοδο του συστήματος	33
5. Συμπεράσματα	40
Αναφορές - Πηγές.....	42
Παράρτημα 1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων αλληλεπίδρασης προσπίπτοντος φωτονίου με το στρώμα φωσφόρου.....	44
Παράρτημα 2: Αποτελέσματα για τη μέση τιμή σήματος M_A στην έξοδο του μετατροπέα.....	47
Παράρτημα 3: Υπολογισμός της παραμέτρου $L_k(u)$ στο MS Excel	48
Παράρτημα 4: Αποτελέσματα για το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_A(u)$ στην έξοδο του μετατροπέα.....	50
Παράρτημα 5: Αποτελέσματα για το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{B1}(u)$ στην έξοδο του σταδίου στοχαστικής ενίσχυσης B_1	55
Παράρτημα 6: Αποτελέσματα για το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{B2}(u)$ στην έξοδο του σταδίου καθορισμένης ασάφειας B_2	60

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η *Ακτινοθεραπεία* αποτελεί το σύνολο των θεραπευτικών μεθόδων που ακολουθούνται για τη θανάτωση καρκινικών κυττάρων μέσω ακτινοβολήσης με ιοντίζουσες ακτινοβολίες και έχει ρόλο όχι μόνο στα πρώτα στάδια της καρκινογένεσης αλλά ακόμα και αφού έχει αρχίσει να εξαπλώνεται. Θεωρείται γενικά η δεύτερη πιο αποτελεσματική θεραπεία καρκίνου (μετά από τις χειρουργικές επεμβάσεις), αλλά η επιτυχία των στόχων της ποικίλλει αναλόγως το περιστατικό που καλείται να αντιμετωπίσει.

Σε κάποιες περιπτώσεις, κατά τη διαδικασία της Ακτινοθεραπείας χρησιμοποιούνται *Ηλεκτρονικές Διατάξεις Πυλαίας Απεικόνισης (EPID)*. Αυτές, μετρούν την ένταση των ακτίνων X που διαπερνούν τον ασθενή κατά τη διάρκεια μιας συνεδρίας θεραπείας, αφού μετατρέπουν το σήμα ακτινοβολίας ηλεκτρονικά σε μια δισδιάστατη (2D) ψηφιακή ακτινογραφική εικόνα.

Οι εικόνες που προκύπτουν από την Πυλαία Απεικόνιση, μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση της θεραπείας ενός ασθενούς και για τον σχεδιασμό της συνέχειάς της έως ότου η θεραπεία ολοκληρωθεί. Η ποιότητα των εικόνων αυτών και συνεπώς, η εγκυρότητα και η ακρίβεια των συμπερασμάτων που εξάγονται από αυτές, εξαρτάται άμεσα από την αποτελεσματικότητα των διατάξεων ανίχνευσης και απεικόνισης.

Η παρούσα εργασία, έχει ως σκοπό τη μελέτη της μεταφοράς του διαγνωστικού σήματος από το σώμα του ασθενούς στα ανιχνευτικά τμήματα των ακτινοθεραπευτικών διατάξεων και από εκεί στα απεικονιστικά.

Για αυτόν τον σκοπό, χρησιμοποιείται η *Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων*, η οποία είναι κατάλληλη για τη μελέτη μετάδοσης σήματος μέσα από ένα σύνολο διατάξεων. Σύμφωνα με αυτήν, το σύστημα αντιμετωπίζεται σαν μία ακολουθία αλληλοδιαδοχικών διαδικασιών, οι οποίες διενεργούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Προκειμένου να είναι εφικτή η εφαρμογή της Θεωρίας Γραμμικών Συστημάτων, αρχικά αναφέρονται σημαντικά στοιχεία της που είναι άμεσα χρήσιμα, ενώ επίσης μελετούνται διατάξεις Πυλαίας Απεικόνισης ως προς τις δομές τους, τις αρχές λειτουργίας τους και τα υλικά των ανιχνευτών τους.

Έπειτα, η μελέτη επικεντρώνεται στα *συστήματα AMFPI έμμεσης ανίχνευσης*, στα οποία διενεργείται εφαρμογή της Θεωρίας Γραμμικών Συστημάτων για τη μελέτη του σήματος και του θορύβου που προκύπτει, δηλαδή τα μεγέθη που καθορίζουν την ποιότητα εικόνας.

Για αυτόν τον σκοπό, αρχικά το υπό εξέταση σύστημα εκφράζεται ως ένα σύνολο αλληλοδιαδοχικών σταδίων, έτσι ώστε να μπορεί να μελετηθεί με χρήση της Θεωρίας Γραμμικών Συστημάτων. Ύστερα, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις τύπου Monte Carlo (MC) σε κατάλληλο περιβάλλον λογισμικού (το οποίο λειτουργεί με χρήση αλγορίθμων που ονομάζονται Penelope) όσον αφορά το στάδιο μεταφοράς ενέργειας από δέσμη Πυλαίας Απεικόνισης στον ανιχνευτή του συστήματος. Τα δεδομένα των προσομοιώσεων επεξεργάζονται κατάλληλα και υπολογίζονται η μέση τιμή του σήματος και το φάσμα ισχύος θορύβου (NPS) στην έξοδο του σταδίου του ανιχνευτή του συστήματος. Τα μεγέθη αυτά μάλιστα, υπολογίζονται διαδοχικά και στα επόμενα στάδια, μέχρι την έξοδο του συστήματος.

Η συμπεριφορά του συστήματος, μελετάται για δεδομένο πάχος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ στον ανιχνευτή/μετατροπέα, μεταβάλλοντας την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου και αντίστροφα, για δεδομένη τιμή ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου, μεταβάλλοντας το πάχος του φωσφόρου του ανιχνευτή. Η εφαρμογή, αφορά τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου ακτίνων X ίσες με 1, 2, 4 και 8 MeV και πάχη φωσφόρου του μετατροπέα ίσα με 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm.

1. Προαπαιτούμενα στοιχεία από τη θεωρία

Στο τρέχον κεφάλαιο αναφέρονται κάποια χρήσιμα στοιχεία από τη θεωρία, τα οποία είναι προαπαιτούμενα προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι μέθοδοι που εφαρμόζονται στη συνέχεια της παρούσας εργασίας. Επίσης, προσφέρεται μία κατά το δυνατόν συνολική εικόνα της μελετούμενης πτυχής, αλλά και των αναγκών που ικανοποιεί η μελέτη σχετικά με αυτήν την πτυχή.

Τα στοιχεία αυτά, αφορούν καταρχήν μαθηματικές θεωρήσεις και φορμαλιστικούς χειρισμούς που σχετίζονται με τη Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων. Η αναφερόμενη Θεωρία, είναι ευρέως διαδεδομένη στη μελέτη μετάδοσης σήματος μέσω διαδοχικών καναλιών και τροποποίησης αυτού κατά τη διάδοσή του. Στη συγκεκριμένη εργασία, η Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων επιλέχθηκε ως κατάλληλο μέσο για τη μελέτη του μεταδιδόμενου σήματος μέσα από τις ανιχνευτικές διατάξεις στην Πυλαία Απεικόνιση η οποία διενεργείται κατά την Ακτινοθεραπεία.

Από την άλλη, τα αναφερόμενα στο παρόν κεφάλαιο στοιχεία σχετίζονται με τις εμπλεκόμενες φυσικές έννοιες και την πρακτική υπόσταση και αξία της Πυλαίας Απεικόνισης στην Ακτινοθεραπεία. Συμπεριλαμβάνεται μία γενική αναφορά στην Ακτινοθεραπεία και την Πυλαία Απεικόνιση, ενώ επίσης περιγράφονται ζητήματα γύρω από τα χρησιμοποιούμενα φάσματα και τις μεθόδους ανίχνευσης του σήματος.

1.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων

Η Θεωρία των Γραμμικών Συστημάτων, μπορεί να εφαρμοστεί για τη μελέτη του σήματος μετά τη διέλευσή του μέσα από ένα σύστημα ως προς την αρχική μορφή που αυτό είχε, δηλαδή της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος. Η μέθοδος μελέτης αυτή, αφορά επίσης και τον θόρυβο που αναπόφευκτα εισάγεται μέσα στο σύστημα.

Προκειμένου λοιπόν να μελετηθεί ένα απεικονιστικό σύστημα με χρήση αυτής της θεωρίας, αντιμετωπίζεται σαν μία ακολουθία αλληλοδιαδοχικών διαδικασιών, οι οποίες διενεργούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους, ενώ η καθεμία λαμβάνει στην είσοδό της την έξοδο της προηγούμενης και μεταδίδει το τροποποιημένο σήμα μέσω της εξόδου της στην επόμενη [1]. Τα συστήματα που μελετούνται με αυτήν την προσέγγιση, ονομάζονται *Αλληλοδιαδοχικά Γραμμικά Συστήματα (Cascaded Linear Systems)*.

Έτσι, αν θεωρηθεί ότι ένα γραμμικό σύστημα αποτελείται από N σε πλήθος αλληλοδιαδοχικές διαδικασίες, αυτό μπορεί να αποδοθεί σχηματικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1.

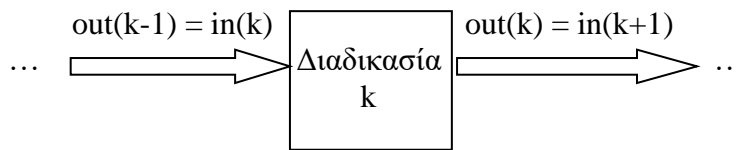


Εικόνα 1.1: Γραμμικό σύστημα που αποτελείται από N σε πλήθος αλληλοδιαδοχικές διαδικασίες.

Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, η μέση τιμή του εισαγόμενου στο σύστημα σήματος $M_{in}(u)$ όπου u η χωρική συχνότητα, είναι ταυτόχρονα η μέση τιμή του εισαγόμενου σήματος $M_{in(1)}(u)$ στη διαδικασία 1 και η μέση τιμή του εξαγόμενου από το σύστημα σήματος $M_{out}(u)$ ταυτίζεται με τη μέση τιμή του εξαγόμενου σήματος $M_{out(N)}(u)$ από τη διαδικασία N . Επίσης, το εισαγόμενο στο σύστημα φάσμα ισχύος

θορύβου $NPS_{in}(u)$ είναι παράλληλα το εισαγόμενο φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{in(1)}(u)$ στη διαδικασία 1 και το εξαγόμενο φάσμα ισχύος θορύβου από το σύστημα $NPS_{out}(u)$ δεν είναι άλλο από το εξαγόμενο φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{out(N)}(u)$ από τη διαδικασία N.

Όσον αφορά τις επιμέρους διαδικασίες, από τα προηγούμενα είναι σαφές ότι για καθεμία από αυτές ισχύει ότι κάθε εξεταζόμενη παράμετρος εισόδου του k σταδίου $in(k)$ ταυτίζεται με την παράμετρο εξόδου $out(k-1)$ του προηγούμενου. Επίσης, κάθε εξεταζόμενη παράμετρος εξόδου του k σταδίου $out(k)$ ταυτίζεται με την παράμετρο εισόδου $in(k+1)$ του επόμενου (Εικόνα 1.2). Επισημαίνεται ότι αυτά ισχύουν για $k = 1, \dots, N$ ενώ για $k=1$ το $in(1-1)$ σημαίνει αρχική είσοδος του γραμμικού συστήματος και για $k=N$ το $in(N+1)$ είναι η τελική έξοδος του.



Εικόνα 1.2: Επιμέρους διαδικασία υπ' αριθμόν k ενός γραμμικού συστήματος.

Κάθε επιμέρους διαδικασία λοιπόν, με βάση τις ακολουθούμενες μεθόδους της θεωρίας γραμμικών συστημάτων, ανήκει σε μία από τις ακόλουθες τρεις γενικές κατηγορίες [1]:

A) Στοχαστική «ενίσχυση» (stochastic “gain”): Το εξερχόμενο σήμα έχει γενικά διαφορετικό πλάτος ή/και μορφή σε σχέση με το εισερχόμενο στη διαδικασία. Η τιμή εξόδου ωστόσο, συχνά είναι μικρότερη της τιμής εισόδου στη διαδικασία, παρόλο που καλείται διαδικασία «ενίσχυσης». Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί και η διαδικασία απορρόφησης φωτονίων κατά την πρόσπτωσή τους σε ανιχνευτική διάταξη, όπου η αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με το υλικό του ανιχνευτή έχει ως αποτέλεσμα την απορρόφηση κάποιου ποσοστού του αρχικού πλήθους φωτονίων. Χαρακτηριστικά ενός σταδίου στοχαστικής ενίσχυσης, είναι η απολαβή g της διαδικασίας και η διακύμανσή της s^2 . Ακολουθώντας τους συμβολισμούς που έχουν εξηγηθεί παραπάνω, σε ένα στάδιο στοχαστικής ενίσχυσης ισχύουν τα εξής:

$$NPS_{out}(u) = g^2 NPS_{in}(u) + M_{in}(u) s^2 \quad (1.1)$$

$$M_{out}(u) = g M_{in}(u) \quad (1.2)$$

B) Στοχαστική ασάφεια: Σε ένα τέτοιο στάδιο δεν υπάρχει αλλαγή στο πλάτος ή τη μορφή του σήματος, παρά μόνο τυχαία μετατόπιση της θέσης των φορέων στον χώρο. Τέτοια είναι τα στάδια χωρικής διασποράς των δευτερογενών φορέων, ως προς το σημείο δημιουργίας τους. Δηλαδή, αν για παράδειγμα οι πρωτογενείς φορείς πληροφορίας είναι φωτόνια ακτίνων X ή γ , οι δευτερογενείς φορείς μπορούν να είναι οπτικά φωτόνια που δημιουργούνται μέσω σπινθηρισμών, ηλεκτρόνια κ.α. και τα στάδια στοχαστικής ασάφειας περιγράφουν τις τυχαίες χωρικές μετατοπίσεις που υφίστανται οι δευτερογενείς αυτοί φορείς. Χαρακτηριστικό ενός τέτοιου σταδίου είναι η *Συνάρτηση Μεταφοράς Διαμόρφωσης (Modulation Transfer Function – MTF)* και από μαθηματική άποψη ισχύουν τα ακόλουθα:

$$NPS_{out}(u) = [NPS_{in}(u) - M_{in}(u)] MTF^2(u) + M_{in}(u) \quad (1.3)$$

$$M_{out}(u) = M_{in}(u) \quad (1.4)$$

Γ) Καθορισμένη ασάφεια: Σε ένα τέτοιο στάδιο, όπως και στα προαναφερθέντα στάδια στοχαστικής ασάφειας, κατά κανόνα δεν υπάρχει μεταβολή του πλάτους ή της μορφής του σήματος, παρά μόνο μετατόπιση της θέσης των φορέων στον χώρο. Η διαφοροποίηση με τα στάδια στοχαστικής ασάφειας, είναι ότι στα στάδια καθορισμένης ασάφειας η αλλοίωση της θέσης δεν είναι τυχαία, αλλά εξαναγκασμένη. Πρακτικά, ένα τέτοιο στάδιο μπορεί να αφορά την ψηφιοποίηση του σήματος σε εικονοστοιχεία (pixel) συγκεκριμένων διαστάσεων ή τον εξαναγκασμένο περιορισμό στην κίνηση των φορέων του σήματος σε συγκεκριμένα χωρικά τμήματα με τρόπο που να εμποδίζεται η ελεύθερη διασπορά τους. Όπως οι διαδικασίες στοχαστικής ασάφειας, έτσι και οι διαδικασίες καθορισμένης ασάφειας χαρακτηρίζονται από συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης MTF. Σε αυτά τα στάδια, ισχύουν οι σχέσεις:

$$NPS_{out}(u) = NPS_{in}(u) MTF^2(u) \quad (1.5)$$

$$M_{out}(u) = M_{in}(u) \quad (1.6)$$

Οι περιγραφές των τριών κατηγοριών διαδικασιών των γραμμικών συστημάτων που αναφέρθηκαν, μαζί με τις αντίστοιχες μαθηματικές σχέσεις τους, θα αποτελέσουν χρήσιμα εργαλεία στη συνέχεια της παρούσας μελέτης.

1.2 Στοιχεία Ακτινοθεραπείας - Πυλαία Απεικόνιση και Ανιχνευτικές Διατάξεις

Ο όρος *Ακτινοθεραπεία (Radiotherapy)* αφορά τις θεραπευτικές μεθόδους που ακολουθούνται για τη θανάτωση καρκινικών κυττάρων μέσω ακτινοβολίας με ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Οι ακτινοθεραπευτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται είτε στα πρώτα στάδια της καρκινογένεσης είτε αφού έχει αρχίσει να εξαπλώνεται και μπορούν να εφαρμοστούν για τους εξής λόγους [2]:

- Για την προσπάθεια πλήρους θεραπείας του καρκίνου (θεραπευτική ακτινοθεραπεία).
- Για να γίνουν άλλες θεραπείες πιο αποτελεσματικές – για παράδειγμα, η Ακτινοθεραπεία μπορεί να συνδυαστεί με Χημειοθεραπεία ή να χρησιμοποιηθεί πριν από τη χειρουργική επέμβαση (νεο-επικουρική ακτινοθεραπεία).
- Για να μειωθεί ο κίνδυνος επανεμφάνισης του καρκίνου μετά από χειρουργική επέμβαση (επικουρική ακτινοθεραπεία).
- Για ανακούφιση από τα συμπτώματα εάν δεν είναι δυνατή η θεραπεία (ανακουφιστική ακτινοθεραπεία).

Η Ακτινοθεραπεία θεωρείται γενικά η δεύτερη πιο αποτελεσματική θεραπεία καρκίνου (μετά από τις χειρουργικές επεμβάσεις), αλλά η επιτυχία των στόχων της ποικίλλει αναλόγως το περιστατικό που καλείται να αντιμετωπιστεί.

Όσον αφορά τα είδη της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται στην Ακτινοθεραπεία, αυτά μπορεί να είναι φωτόνια ακτίνων X ή γ, ηλεκτρόνια, πρωτόνια και κάποια κατιόντα. Στις περιπτώσεις των ακτίνων X, κατά τη διαδικασία της Ακτινοθεραπείας συχνά χρησιμοποιούνται *Ηλεκτρονικές Διατάξεις Πυλαίας Απεικόνισης (Electronic Portal Imaging Devices – EPID)*. Αυτές, μετρούν την ένταση

των ακτίνων X που διαπερνούν τον ασθενή κατά τη διάρκεια μιας συνεδρίας θεραπείας [3], αφού μετατρέπουν το σήμα ακτινοβολίας ηλεκτρονικά σε μια δισδιάστατη (2D) ψηφιακή ακτινογραφική εικόνα.

Οι εικόνες που προκύπτουν από την Πυλαία Απεικόνιση, μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση της θεραπείας ενός ασθενούς και για τον σχεδιασμό της συνέχειάς της έως η θεραπεία να ολοκληρωθεί. Η ποιότητα των εικόνων αυτών και συνεπώς, η εγκυρότητα και η ακρίβεια των συμπερασμάτων που εξάγονται από αυτές, εξαρτάται άμεσα από την αποτελεσματικότητα των διατάξεων ανίχνευσης και απεικόνισης [4]. Σε κάθε περίπτωση, στην Πυλαία Απεικόνιση απαιτείται τα καταγραφόμενα γεωμετρικά και δοσιμετρικά δεδομένα να επαληθεύονται. Η γεωμετρική επαλήθευση απαιτεί τη σύγκριση της προκύπτουσας εικόνας με μια εικόνα αναφοράς. Η δοσιμετρική επαλήθευση από την άλλη, απαιτεί τη βαθμονόμηση της απεικονιστικής ως προς τη δόση.

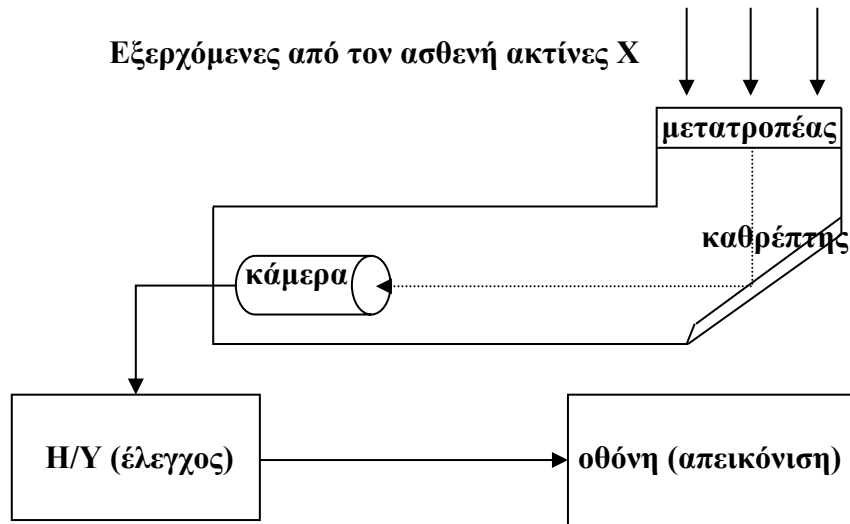
2. Συστήματα πυλαίας απεικόνισης (EPID)

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναφέρθηκαν κάποια βασικά χρήσιμα στοιχεία από τη θεωρία που αποτελούν μαθηματικά εργαλεία και αναγκαίες γενικές γνώσεις στο αντικείμενο της Ακτινοθεραπείας και της Πυλαίας Απεικόνισης.

Στη συνέχεια, μελετούνται διατάξεις Πυλαίας Απεικόνισης ως προς τις δομές τους, τις αρχές λειτουργίας τους και τα υλικά των ανιχνευτών τους [5].

2.1 Συστήματα EPID βασιζόμενα σε κάμερα-καθρέπτη-φακό (Camera–Mirror–Lens-based EPID)

Μία κατηγορία συστημάτων EPID, είναι και η κατηγορία εκείνων που βασίζονται σε κάμερα-καθρέπτη-φακό (*camera-mirror-lens-based EPID systems*). Η δομή τους, απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας συστήματος EPID που βασίζεται σε κάμερα-καθρέπτη-φακό.

Σε αυτά, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την πηγή ακτίνων X, αφού διέλθει από το σώμα του ασθενούς προσπίπτει σε έναν μετατροπέα ακτίνων X στο ορατό. Ο μετατροπέας ακτίνων X αποτελείται από μία επίπεδη μεταλλική πλάκα (από χαλκό, χάλυβα ή ορείχαλκο) πάχους 1-1.5 mm και μία στερεά οθόνη φωσφόρου γαδολινίου του οξυσουλφιδίου ($Gd_2O_2S:Tb$). Η μεταλλική πλάκα μετατρέπει ακτίνες X σε ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας κάποια από τα οποία διαφεύγουν στον φώσφορο, ενώ επίσης αποκόπτει τα δευτερογενώς παραγόμενα στο σώμα του ασθενούς φωτόνια χαμηλής ενέργειας, βελτιώνοντας την αντίθεση της εικόνας. Η οθόνη φωσφόρου, μετατρέπει κάποιο ποσοστό των φωτονίων ακτίνων X που έχουν περάσει από τη μεταλλική πλάκα, στο φάσμα του ορατού φωτός.

Το ορατό φως που εξέρχεται από τον φώσφορο, οδηγείται μέσω ενός καθρέπτη που σχηματίζει γωνία 45° σε σύστημα με φακό και κάμερα. Αυτή η αλλαγή κατεύθυνσης, είναι απαραίτητη προκειμένου να προστατευθούν τα ηλεκτρονικά συστήματα του φακού και της κάμερας από την άμεση έκθεση σε ακτινοβολία ακτίνων X. Σημειώνεται επίσης, ότι το υποσύστημα μετατροπέα-καθρέπτη-κάμερας-φακού είναι οπτικά μονωμένο από τον περιβάλλοντα χώρο, για αποφυγή θορύβου.

Το φωτεινό σήμα που λαμβάνεται από τον φακό και την κάμερα, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό και οδηγείται σε κατάλληλες ηλεκτρονικές διατάξεις και τελικά στην οθόνη απεικόνισης.

Αυτά τα συστήματα Πυλαίας Απεικόνισης, πλεονεκτούν ως προς τη δυνατότητα απεικόνισης ολόκληρου του πεδίου ακτινοβολήσης, την οποία μάλιστα εκτελούν ταυτόχρονα για όλα τα σημεία του πεδίου.

Ωστόσο, μειονεκτούν ως προς τον όγκο και το βάρος των εξαρτημάτων τους, καθώς και ως προς την ιδιαίτερα χαμηλή απόδοσή τους συνολικά στη μετατροπή των φωτονίων σε σήμα απεικονιστικής πληροφορίας.

2.2 Συστήματα EPID σάρωσης μήτρας θαλάμου ιονισμού (Scanning matrix ionization chamber EPID)

Μία άλλη κατηγορία συστημάτων EPID, είναι η κατηγορία *σάρωσης μήτρας θαλάμου ιονισμού* (Scanning matrix ionization chamber EPID systems). Σε αυτά, ο ανιχνευτής δεν είναι φώσφορος, αλλά μία μεγάλη μήτρα στοιχείων θαλάμου ιονισμού.

Κάθε θάλαμος ιονισμού, αποτελείται από δύο επίπεδα ηλεκτροδίων που απέχουν μεταξύ τους 0.8 mm σχηματίζοντας ένα κενό, το οποίο καλύπτεται με το ρευστό (2,2,4-τριμεθυλοπεντάνιο) που δρα ως μέσο ιονισμού όταν ο θάλαμος ακτινοβολείται. Τα δύο ηλεκτρόδια που περιβάλλουν το μέσο ιονισμού, διατηρούνται σε διαφορετικό δυναμικό μεταξύ τους, ώστε τα ιονισμένα άτομα και ηλεκτρόνια να επιταχύνονται προσανατολισμένα από το δημιουργούμενο ηλεκτρικό πεδίο και να δημιουργούν έτσι το πληροφοριακό απεικονιστικό σήμα. Σημειώνεται επίσης, ότι μια πλάκα πλαστοφερρίτη πάχους 1 mm τοποθετείται πάνω από τον θάλαμο ιονισμού και εξυπηρετεί τον ίδιο σκοπό με εκείνον της μεταλλικής πλάκας σε συστήματα που βασίζονται σε κάμερα-καθρέπτη-φακό. Τελικά, σχηματίζεται μία μήτρα 256 x 256 στοιχείων τα οποία καλύπτουν επιφάνεια ανίχνευσης διαστάσεων 32.5 cm x 32.5 cm.

Βασικά πλεονεκτήματα του σχεδιασμού των συστημάτων αυτών, είναι η φορητότητα του ανιχνευτή ο οποίος είναι πακεταρισμένος σαν βιντεοκασέτα και η απώλεια γεωμετρικών παραμορφώσεων στη δημιουργούμενη εικόνα.

Ωστόσο, υστερούν ως προς την έλλειψη ικανότητας ταυτόχρονης απεικόνισης όλου του ακτινοβολουμένου πεδίου.

2.3 Συστήματα EPID ενεργού πίνακα απεικόνισης επίπεδης οθόνης (Active Matrix, Flat-Panel Imager - AMFPI EPID)

Μία ακόμα κατηγορία συστημάτων EPID, είναι τα *Συστήματα EPID ενεργού πίνακα απεικόνισης επίπεδης οθόνης* (Active Matrix, Flat-Panel Imager - AMFPI EPID). Η τεχνολογία αυτή, διαθέτει συστοιχία που αποτελείται από γυάλινο υπόστρωμα πάχους 1 mm, πάνω στο οποίο τοποθετούνται ηλεκτρονικά κυκλώματα που έχουν τη μορφή λεπτής μεμβράνης. Κάθε εικονοστοιχείο (pixel) στην ενεργό συστοιχία-πίνακα, ενσωματώνει έναν διακόπτη μορφής λεπτής μεμβράνης ο οποίος συνδέεται με ηλεκτρονικό στοιχείο που εμφανίζει χωρητικότητα.

Τα εικονοστοιχεία οργανώνονται σε δισδιάστατο πλέγμα και οι διακόπτες τους ελέγχονται από μεταβολές δυναμικού γραμμών ελέγχου οι οποίες συνδέονται με όλους τους διακόπτες σε μία μόνο σειρά. Γενικά, οι διακόπτες διατηρούνται ανοικτοί, ώστε να μην άγουν και τα χωρητικά στοιχεία να φορτίζουν *άμεσα* ή *έμμεσα* κατά την πρόσπτωση ακτίνων X και την αλληλεπίδρασή τους με υπερκείμενο στρώμα μετατροπής των ακτίνων X, το οποίο είναι ενσωματωμένο στο χωρητικό στοιχείο κάθε εικονοστοιχείου. Η ανάγνωση των σημάτων απεικόνισης από τα στοιχεία που εμφανίζουν χωρητικότητα, πραγματοποιείται με κλείσιμο των διακοπών οι οποίοι έτσι καθίστανται αγωγιμοί. Η διαδικασία της ανάγνωσης διενεργείται κλείνοντας μία γραμμή διακοπών τη φορά για μέγιστη ανάλυση εικόνας ή κλείνοντας πολλαπλές γραμμές διακοπών κάθε φορά για λιγότερο απαιτητική ανάλυση εικόνας. Σε κάθε

περίπτωση, μετά την ανίχνευση τα στοιχεία χωρητικότητας είναι έτοιμα για νέα ανίχνευση και καταγραφή, με το κλείσιμο των διακοπών εκ νέου.

Οι διακόπτες των εικονοστοιχείων που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις των AMFPI EPID, είναι τρανζίστορ λεπτής μεμβράνης (Thin Film Transistors – TFT) κατασκευασμένα από υδρογονωμένο άμορφο πυρίτιο (a-Si:H). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν οι διακόπτες αυτοί είναι ανοικτοί, τα χωρητικά στοιχεία φορτίζουν άμεσα ή έμμεσα:

A) Έμμεση ανίχνευση: Ο μετατροπέας ακτίνων X περιλαμβάνει μεταλλική πλάκα και φώσφορο, με το στρώμα φωσφόρου/σπινθηριστή να αποτελείται από γαδολίνιο του οξυσουλφιδίου ($Gd_2O_2S:Tb$) ή από ιωδιούχο καίσιο με προσμίξεις θαλίου CsI(Tl) και να είναι τοποθετημένο ακριβώς πάνω από τον φωτοαισθητήρα, ολοκληρωμένο στη συστοιχία. Το στρώμα αυτό, το διαδέχεται ένα στρώμα φωτοαισθητήρα ενίσχυσης του ορατού φωτός που αποτελείται από άμορφο πυρίτιο a-Si.

B) Άμεση ανίχνευση: Ο μετατροπέας ακτίνων X αποτελείται από μεταλλική πλάκα και φωτοαισθητήρα, χωρίς τη μεσολάβηση στρώματος φωσφόρου. Ο φωτοαισθητήρας, όπως και στην περίπτωση της έμμεσης ανίχνευσης, συνήθως αποτελείται από άμορφο πυρίτιο a-Si και είναι ηλεκτρονικά συζευγμένος με διαφορετικό στοιχείο χωρητικότητας για κάθε εικονοστοιχείο.

Τα συστήματα AMFPI EPID παρουσιάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων: Φορητότητα ανιχνευτών, απεικόνιση μεγάλων πεδίων ακτινοβολίας (41 cm x 41 cm), υψηλή γραμμικότητα στη συμπεριφορά των εικονοστοιχείων – οπότε καταλληλότητα και για δοσιμετρικούς σκοπούς, ανθεκτικότητα των a-Si:H TFTs και των φωτοδίοδων στην ακτινοβολία ακτίνων X, πολύ υψηλή αποδοτικότητα και πολύ υψηλή ποιότητα εικόνας.

2.3.1 Συστήματα AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης

Τα συστήματα AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης βρίσκονται στο επίκεντρο ενδιαφέροντος της παρούσας μελέτης, καθώς το Κεφάλαιο 3 αποτελεί μία εκτεταμένη εφαρμογή της Θεωρίας Γραμμικών Συστημάτων σε τέτοια συστήματα.

Είναι λοιπόν χρήσιμο να υπάρξει μία πληρέστερη περιγραφή [6] των συστημάτων AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης. Αυτά, αποτελούνται από τέσσερα κύρια μέρη:

- Μία συστοιχία εικονοστοιχείων που ενσωματώνει TFT άμορφου πυριτίου και φωτοδίοδους
- Έναν μετατροπέα ακτίνων X τοποθετημένο απευθείας στην επιφάνεια της συστοιχίας
- Ένα σύστημα ηλεκτρονικών στοιχείων
- Έναν κεντρικό υπολογιστή

Η συστοιχία στην οποία βασίζονται οι διατάξεις απεικόνισης που εξετάζονται αποτελείται από 512x512 εικονοστοιχεία, τα οποία ενσωματώνουν φωτοδίοδους άμορφου πυριτίου (a-Si) και τρανζίστορ λεπτής μεμβράνης (TFT) που προσφέρουν ενεργή περιοχή 26 cm x 26 cm με βήμα 508 μm ανά εικονοστοιχείο. Ο παράγοντας πλήρωσης επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι φωτοδίοδοι είναι 0.83, που σημαίνει ότι καλύπτεται από φωτοδίοδους το 83% της συνολικής επιφάνειας που καταλαμβάνουν, ενώ το υπόλοιπο 17% περίπου αποτελεί επιφάνεια μεταξύ των φωτοδίοδων η οποία δεν μπορεί να παράγει σήμα. Σε αυτήν την συστοιχία, οι φωτοδίοδοι έχουν το ρόλο συλλογής και μετατροπής των φορέων που θα παράγουν σήμα, ενώ τα τρανζίστορ λειτουργούν ως διακόπτες που ενεργοποιούν και απενεργοποιούν την ανάγνωση του δημιουργούμενου σήματος από τα περιφερειακά ηλεκτρονικά.

Ο μετατροπέας ακτίνων X, αποτελείται από ένα στρώμα οθόνης φωσφόρου συνδεδεμένο με μία υπερκείμενη μεταλλική πλάκα χαλκού πάχους 1 mm. Το πάχος του φωσφόρου λαμβάνει διαφορετικές τιμές, από 34 mg/cm² έως 947 mg/cm² (92 μm έως 2580 μm). Η παρουσία της μεταλλικής πλάκας χρησιμεύει για τη μείωση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας κατά την απεικόνιση και για να μετατρέπεται μέρος των φωτονίων της ακτινοβολίας X σε ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας. Συνολικά, ο μετατροπέας δέχεται φωτόνια ακτίνων X και τα μετατρέπει σε ορατά φωτόνια, τα οποία προσπίπτουν στις φωτοδιόδους της συστοιχίας που προαναφέρθηκε. Η συστοιχία, μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρονικό, ώστε να είναι επεξεργάσιμο από κατάλληλο ηλεκτρονικό σύστημα.

Το σύστημα ηλεκτρονικών στοιχείων, ελέγχει τη λειτουργία της συστοιχίας και επεξεργάζεται τα αναλογικά δεδομένα των εικονοστοιχείων. Τα εικονοστοιχεία της συστοιχίας, διευθετούνται σε έναν δισδιάστατο πίνακα με γραμμές και στήλες. Οι επαφές από τις πύλες των TFT τρανζίστορ κάθε μίας γραμμής, συνδέονται όλες μαζί σε έναν κοινό αγωγίμο ακροδέκτη που ονομάζεται *γραμμή πύλης (gate line)*. Αντίστοιχα, οι επαφές των απαγωγών των TFT τρανζίστορ κάθε μίας στήλης συνδέονται στη *γραμμή δεδομένων (data line)*. Κατά τη δημιουργία εικόνας, το σήμα που έχει αρχικά δημιουργηθεί από την πρόσπτωση ακτίνων X στον μετατροπέα, ολοκληρώνεται στα χωρητικά ηλεκτρονικά στοιχεία των φωτοδίοδων (στις οποίες εφαρμόζεται ανάστροφη πόλωση -5 V), αφού τα TFT τρανζίστορ διατηρούνται μη αγωγίμα μέσω εφαρμογής αρνητικού δυναμικού (-8 V) σε όλες τις γραμμές πύλης. Η ανάγνωση του σήματος απεικόνισης, πραγματοποιείται κατά μία γραμμή εικονοστοιχείων τη φορά, κάνοντας τα TFT τρανζίστορ της γραμμής αγωγίμα μέσω εφαρμογής θετικού δυναμικού (+10 V) στην αντίστοιχη γραμμή πύλης. Το σήμα από τα εικονοστοιχεία, ολοκληρώνεται σε περιφερειακούς προενισχυτές οι οποίοι έχουν ευαισθησία ως προς το φορτίο. Τα αναλογικά σήματα των προενισχυτών αυτών, πολυπλέκονται και ψηφιοποιούνται σε βάθος 15 bit.

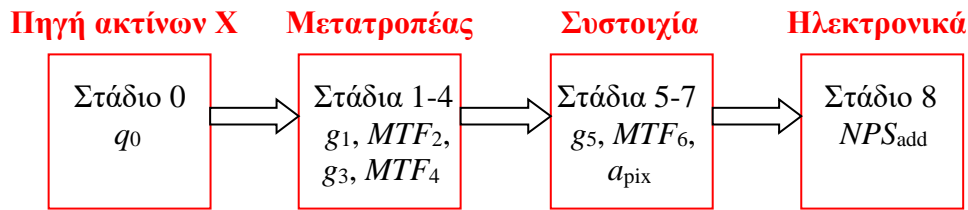
Ο κεντρικός υπολογιστής, ελέγχει τα ηλεκτρονικά στοιχεία και χειρίζεται τα ψηφιακά δεδομένα. Η ανάγνωση όλων ή ενός μέρους των γραμμών, αναφέρεται ως *κύκλος ανάγνωσης (readout cycle)* και οι αντίστοιχες πληροφορίες όταν αποθηκεύονται ονομάζονται *πλαίσιο δεδομένων (data frame)*. Οι πρώτοι περίπου 50 κύκλοι ανάγνωσης δεν αποθηκεύονται και καλούνται *εναρκτήριοι κύκλοι (initialization cycles)*. Στη συνέχεια, λαμβάνονται πλαίσια δεδομένων για τις μετρήσεις. Ο *χρόνος πλαισίου (frame time)*, ορίζεται ως το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς κύκλους ανάγνωσης και ποικίλλει, προκειμένου να καλύπτει διαφορετικούς κύκλους ακτινοβολήσης.

2.3.2 Θεωρητικό μοντέλο αλληλοδιαδοχικών διαδικασιών για σύστημα AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης

Ένα σύστημα AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης μπορεί να περιγραφεί από μαθηματική άποψη με αλληλοδιαδοχικά στάδια, χρησιμοποιώντας τη Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων, στοιχεία της οποίας παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 1.

Σύμφωνα με αυτήν την ανάλυση, το σύστημα απεικόνισης διακρίνεται σε διαδοχικά στάδια, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει μία φυσική διαδικασία με δικιά της ενίσχυση, δικό της θόρυβο και δικές της ιδιότητες διασποράς στον χώρο. Έτσι, κάθε στάδιο χαρακτηρίζεται από κέρδος g_i , διακύμανση κέρδους σ_i^2 και συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης $MTF_i(u)$, όπου u η χωρική συχνότητα. Αυτές οι χαρακτηριστικές παράμετροι, καθορίζουν και τις ιδιότητες μεταφοράς σήματος και θορύβου σε κάθε στάδιο.

Η Εικόνα 2.2 δείχνει ένα διάγραμμα των αλληλοδιαδοχικών οκτώ σταδίων των συστημάτων απεικόνισης AMFPI της παρούσας μελέτης, τα οποία ομαδοποιούνται σε τέσσερα μέρη:



Εικόνα 2.2: Διάγραμμα διαδοχής αλληλοδιαδοχικών ομαδοποιημένων σταδίων.

Εξηγήσεις για τα αλληλοδιαδοχικά στάδια, τις επιμέρους διαδικασίες και τις χαρακτηριστικές παραμέτρους των υπό μελέτη συστημάτων AMFPI, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Αλληλοδιαδοχικά στάδια, διαδικασίες και παράμετροι των συστημάτων AMFPI EPID έμμεσης αντίχτυσης.

α/α σταδίου	Περιγραφή διαδικασιών	Παράμετροι
0	Προσπίπτουσες ακτίνες X	q_0 : Προσπίπτουσα ροή
1	Αλληλεπίδραση ακτίνων X - μετατροπέα	g_1 : Αποδοτικότητα κβαντικής αντίχτυσης
2	Χωρική διασπορά δευτερογενούς ακτινοβολίας στον μετατροπέα	$MTF_2(u)$ δευτερογενούς ακτινοβολίας
3	Δημιουργία και εκπομπή φωτονίων στον μετατροπέα	g_3 : κβαντική απολαβή ϵ_3 : υπέρβαση Poisson
4	Χωρική διασπορά φωτονίων στον μετατροπέα	$MTF_4(u)$ οπτικών φωτονίων
5	Σύζευξη φωτονίων - φωτοδιόδου	g_5 : Αποδοτικότητα οπτικής σύζευξης
6	Ολοκλήρωση φωτονίων στη φωτοδίοδο	$MTF_6(u)$ φωτοδιόδου
7	Δειγματοληψία εικονοστοιχείων συστοιχίας	$MTF_7(u)$ εικονοστοιχείων, a_{pix} : βήμα εικονοστοιχείων
8	Ανάγνωση εικονοστοιχείων	$NPS_{add}(u)$: Προσθετικός ηλεκτρονικός θόρυβος

Αναλυτικότερα:

- Το στάδιο 0 αντιπροσωπεύει την εκπομπή φωτονίων X από την πηγή και χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη προσπίπτουσα ροή q_0 .
- Το στάδιο 1 αφορά την αλληλεπίδραση (κυρίως Compton) των ακτίνων X με τον μετατροπέα, η οποία χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη κβαντική αποδοτικότητα g_1 .
- Το στάδιο 2 αναπαριστά τη διαδικασία καθορισμού του σημείου όπου τα ηλεκτρόνια εναποθέτουν την ενέργειά τους και χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη $MTF_2(u)$.
- Το στάδιο 3 αντιπροσωπεύει τη δημιουργία οπτικών φωτονίων που εκπέμπει ο μετατροπέας με συγκεκριμένη κβαντική απολαβή g_3 και χαρακτηριστική υπέρβαση Poisson ϵ_3 .
- Το στάδιο 4 προβλέπει τη διασπορά των οπτικών φωτονίων που εκπέμπονται από τον μετατροπέα και χαρακτηρίζεται από δεδομένη $MTF_4(u)$.

- Το στάδιο 5, αντιπροσωπεύει τη σύζευξη οπτικών φωτονίων με τη φωτοδίοδο και χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη απολαβή g_5 .
- Το στάδιο 6, έχει το ρόλο ολοκλήρωσης των φωτονίων που περνούν μέσα από το οπτικό διάφραγμα φωτοδίοδων πλευράς a_{pd} και χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη $MTF_6(u)$.
- Το στάδιο 7 αντιπροσωπεύει τη δειγματοληψία του σήματος από κάθε εικονοστοιχείο και χαρακτηρίζεται από μία συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης η οποία εξαρτάται από τη διάσταση εικονοστοιχείων a_{pix} . Για την a_{pix} ισχύει $(a_{pd})^2 = (a_{pix})^2 \times (filling\ factor)$. Σε αυτήν τη σχέση, *filling factor* (παράγοντας πλήρωσης) είναι το ποσοστό της επιφάνειας του εικονοστοιχείου που καταλαμβάνει η φωτοδίοδος. Η διάσταση των εικονοστοιχείων λαμβάνεται $a_{pix} = 508 \mu m$ [6] και ο *filling factor* = 0.83 [6], οπότε τελικά $a_{pd}^2 = 214193 \mu m^2 = 0.21 mm^2$.
- Τέλος, το στάδιο 8 αφορά τη διαδικασία ανάγνωσης του σήματος απεικόνισης από τα ηλεκτρονικά, κατά την οποία προστίθεται ηλεκτρονικός θόρυβος ισχύος $NPS_{add}(u)$.

2.4 Υλικά και πάχη μετατροπέων των ακτίνων X στις EPID

Από όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2, προκύπτει ότι οι ανιχνευτές/μετατροπείς που ενσωματώνονται στις EPID ποικίλλουν, καθώς έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί πολλές διαφορετικές διατάξεις από τη στιγμή που πρωτοεμφανίστηκαν έως σήμερα.

Το πιο διαδεδομένο υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στους μετατροπείς των ακτίνων X στους ανιχνευτές της Πυλαίας Απεικόνισης σε συστήματα EPID βασιζόμενα σε κάμερα-καθρέπτη-φακό και σε συστήματα AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης, είναι το στερεό γαδολίνιο οξυσουλφιδίου ($Gd_2O_2S:Tb$) που δρα ως φώσφορος. Αυτό, λαμβάνει ακτίνες X και επανεκπέμπει ορατό φως, το οποίο ύστερα λαμβάνεται από κατάλληλη διάταξη, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και προβάλλεται σε οθόνη στους εξεταστές. Το πάχος του στρώματος φωσφόρου των συστημάτων αυτών, ποικίλλει. Έχουν υπάρξει εμπορικά οι τύποι Lanex Fine πάχους $34 mg/cm^2$, Lanex Regular πάχους $70 mg/cm^2$ και Lanex Fast B πάχους $133 mg/cm^2$ [6]. Επίσης, υπάρχουν στη βιβλιογραφία μελέτες για τα πάχη $222 mg/cm^2$, $273 mg/cm^2$, $358 mg/cm^2$, $404 mg/cm^2$, $721 mg/cm^2$ και $947 mg/cm^2$ [7]. Σημειώνεται επίσης, ότι η πυκνότητα του γαδολινίου του οξυσουλφιδίου ($Gd_2O_2S:Tb$) είναι $7.34 g/cm^3 = 7340 mg/cm^3$ [8]. Έτσι, αν με αυτή διαιρεθούν τα πάχη που έχουν δοθεί σε μονάδες μάζας ανά επιφάνεια, προκύπτει ότι τα πάχη των φωσφόρων που έχουν δοθεί αντιστοιχούν σε μονάδες μήκους περίπου στο διάστημα από $46 \mu m$ έως $1.3 mm$.

Για τον ίδιο σκοπό, ως φώσφορος δηλαδή, χρησιμοποιείται σε κάποια πιο σύγχρονα συστήματα AMFPI EPID το ιωδιούχο καίσιο με προσμίξεις θαλίου $CsI(Tl)$ πάχους στο διάστημα από $30 \mu m$ ($16 mg/cm^2$) έως $2000 \mu m$ ($900 mg/cm^2$) [9] το οποίο ακολουθείται από στάδιο οπτικής ενίσχυσης που περιλαμβάνει άμορφο πυρίτιο $a-Si$ πάχους $1 mm$. Σημειώνεται ότι έχουν προταθεί και άλλα υλικά για το στάδιο οπτικής ενίσχυσης (όπως ο ιωδιούχος μόλυβδος PbI_2 , ο ιωδιούχος υδράργυρος HgI_2 και το τελλουρίδιο του καδμίου $CdTe$). Επίσης, στην περίπτωση των AMFPI EPID με άμεση φόρτιση των ηλεκτρονικών στοιχείων χωρητικότητας, το στάδιο $CsI(Tl)$ παραλείπεται και υπάρχει μόνο το στάδιο άμορφου πυριτίου $a-Si$.

Ένα άλλο παράδειγμα υλικού το οποίο χρησιμοποιείται σε συστήματα EPID σάρωσης μήτρας θαλάμου ιονισμού, αποτελεί το υγρό 2,2,4-τριμεθυλοπεντάνιο. Αυτό, τοποθετείται στον χώρο πάχους $0.8 mm$ ανάμεσα σε δύο επίπεδα ηλεκτρόδια και

λειτουργεί ως ιονιζόμενο μέσο που μετατρέπει τις ακτίνες X σε ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια με τη σειρά τους, επιταχυνόμενα από ηλεκτρικό πεδίο δίνουν ηλεκτρικούς παλμούς.

Συγκεντρωτικά, στην τρέχουσα παράγραφο έχουν αναφερθεί οι συνδυασμοί υλικών των μετατροπέων ακτίνων X και παχών τους που αναγράφονται στον Πίνακα 2.2:

Πίνακας 2.2: Υλικά μετατροπέων και τα αντίστοιχα πάχη τους.

Υλικό μετατροπέα	Πάχος (mg/cm ²)	Πάχος (cm)
Gd ₂ O ₂ S:Tb	34	0.0046
Gd ₂ O ₂ S:Tb	70	0.0095
Gd ₂ O ₂ S:Tb	133	0.0181
Gd ₂ O ₂ S:Tb	222	0.0302
Gd ₂ O ₂ S:Tb	273	0.0372
Gd ₂ O ₂ S:Tb	358	0.0488
Gd ₂ O ₂ S:Tb	404	0.0550
Gd ₂ O ₂ S:Tb	721	0.0982
Gd ₂ O ₂ S:Tb	947	0.1290
CsI(Tl)	16	0.0030
CsI(Tl)	100	0.0200
CsI(Tl)	300	0.0600
CsI(Tl)	500	0.1000
CsI(Tl)	700	0.1400
CsI(Tl)	900	0.2000
a-Si	-	0.1000
2,2,4- τριμεθυλοπεντάνιο	-	0.0800

Σημειώνεται ότι στον Πίνακα 2.1 η τελευταία στήλη που εκφράζει το πάχος των υλικών σε cm, έχει συμπληρωθεί κατά προσέγγιση, εκτός από τις περιπτώσεις του άμορφου πυριτίου a-Si και του 2,2,4-τριμεθυλοπεντανίου.

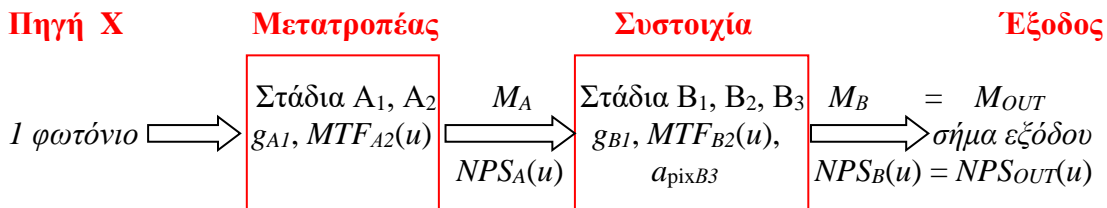
3. Εφαρμογή: Μεταφορά σήματος σε σύστημα AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης

Αφού περιγράφηκε η γενική δομή των συστημάτων AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης και αναφέρθηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας τους, στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται εφαρμογή της Θεωρίας Γραμμικών Συστημάτων στα συστήματα αυτά, με σκοπό τη μελέτη της δημιουργίας και μεταφοράς σήματος και θορύβου, μεγέθη τα οποία καθορίζουν την ποιότητα εικόνας.

Προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί, πρώτα περιγράφεται το απλοποιημένο χρησιμοποιούμενο μοντέλο αλληλοδιαδοχικών διαδικασιών που χρησιμοποιείται για τους σκοπούς της εφαρμογής της Θεωρίας Γραμμικών Συστημάτων. Ύστερα, διενεργούνται προσομοιώσεις τύπου Monte Carlo (MC) σε κατάλληλο περιβάλλον λογισμικού (που ονομάζεται Penelope) όσον αφορά το στάδιο μεταφοράς ενέργειας από μονοενεργειακή δέσμη Πυλαίας Απεικόνισης στον ανιχνευτή του συστήματος. Τα δεδομένα των προσομοιώσεων επεξεργάζονται κατάλληλα και υπολογίζονται αναλυτικά η μέση τιμή σήματος και το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του ανιχνευτή/μετατροπέα. Κατόπιν, υπολογίζονται οι μέσες τιμές σήματος και τα φάσματα ισχύος θορύβου σε κάθε επόμενο στάδιο του συστήματος και στην τελική έξοδο αυτού. Η θεωρητική μελέτη, αφορά ενέργειες **μονοενεργειακής** προσπίπτουσας δέσμης ακτίνων X ίσες με 1, 2, 4 και 8 MeV και πάχη φωσφόρου του μετατροπέα στο εύρος από 0.04 cm έως 0.13 cm.

3.1 Χρησιμοποιούμενο μοντέλο αλληλοδιαδοχικών διαδικασιών

Το διάγραμμα διαδοχής σταδίων της Εικόνας 2.2, μπορεί σε μία προσέγγιση να απλοποιηθεί περαιτέρω για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, στο ακόλουθο διάγραμμα της Εικόνας 3.1:



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα διαδοχής αλληλοδιαδοχικών ομαδοποιημένων σταδίων.

Στο απλοποιημένο διάγραμμα της Εικόνας 3.1, ένα φωτόνιο προσπίπτει στον μετατροπέα, ο οποίος εμπεριέχει δύο αλληλοδιαδοχικά στάδια (A₁ στοχαστικής ενίσχυσης και A₂ στοχαστικής ασάφειας), η έξοδος του μετατροπέα οδηγείται στη συστοιχία η οποία περιέχει τρία αλληλοδιαδοχικά στάδια (B₁ στοχαστικής ενίσχυσης, B₂ καθορισμένης ασάφειας και B₃ καθορισμένης ασάφειας) και η έξοδος της συστοιχίας θεωρείται η συνολική έξοδος του συστήματος.

Η επιλογή του σήματος εισόδου, το οποίο σύμφωνα με την Εικόνα 3.1 αποτελείται από ένα φωτόνιο, δεν είναι τυχαία αλλά σχετίζεται με το λογισμικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για τις προσομοιώσεις του σταδίου της απορρόφησης της ακτινοβολίας του μετατροπέα.

Πρέπει να τονιστεί ότι σε σχέση με τα στάδια που περιγράφονται στο θεωρητικό μέρος στην παράγραφο 2.3.2, έχουν γίνει οι εξής τροποποιήσεις:

- Το στάδιο χωρικής διασποράς δευτερογενούς ακτινοβολίας στον μετατροπέα έχει παρακαμφθεί, λόγω αδυναμίας εύρεσης δεδομένων για την αντίστοιχη MTF.
- Το στάδιο δημιουργίας και εκπομπής φωτονίων στον μετατροπέα θεωρείται διαδικασία Poisson, οπότε έχει αγνοηθεί η υπέρβαση Poisson.
- Κατά το στάδιο ανάγνωσης εικονοστοιχείων θεωρείται ότι ο ηλεκτρονικός θόρυβος που εισάγεται είναι αμελητέος, οπότε δεν υπάρχει το αντίστοιχο προσθετικό φάσμα ισχύος θορύβου.

Λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω υπόψη, ο Πίνακας 2.1 απλοποιείται στον ακόλουθο Πίνακα 3.1:

Πίνακας 3.1: Αλληλοδιαδοχικά στάδια, διαδικασίες και παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά την παρούσα μελέτη συστήματος AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης.

α/α σταδίου	Περιγραφή διαδικασιών	Παράμετροι
0	Προσπίπτουσες ακτίνες X	Ένα (1) προσπίπτον φωτόνιο
A ₁	Αλληλεπίδραση ακτίνων X - μετατροπέα και δημιουργία και εκπομπή φωτονίων στον μετατροπέα	Απολαβή μετατροπέα
A ₂	Χωρική διασπορά φωτονίων στον μετατροπέα	MTF _{A2} (u) μετατροπέα
B ₁	Σύζευξη φωτονίων - φωτοδιόδου	g _{B1} : Αποδοτικότητα οπτικής σύζευξης
B ₂	Ολοκλήρωση φωτονίων στη φωτοδίοδο	MTF _{B2} (u) φωτοδιόδου
B ₃	Δειγματοληψία εικονοστοιχείων συστοιχίας	MTF _{B3} (u) εικονοστοιχείων, βήμα εικονοστοιχείων a _{pix}

3.2 Δεδομένα προσομοιώσεων και αρχική επεξεργασία τους

Στη συνέχεια, παρατίθενται και επεξεργάζονται δεδομένα προσομοιώσεων, τα οποία αφορούν προσομοιώσεις πρόσπτωσης πλήθους ενός (1) φωτονίου στο στάδιο A του μετατροπέα και αλληλεπίδρασης με αυτόν. Αυτές οι προσομοιώσεις, πραγματοποιούνται σε κατάλληλο λογισμικό, το οποίο εκτελεί μεγάλο πλήθος ψευδοτυχαίων δοκιμών τύπου *Monte Carlo* (MC) και εξάγει τα σχετικά αποτελέσματα. Το λογισμικό αυτό, χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο ευρέως διαδεδομένο στον χώρο, γνωστό με το όνομα *PENELOPE* [10, 11, 12, 13].

Τα αποτελέσματα των δοκιμών, για κάθε τιμή ενέργειας φωτονίου που εξετάζουμε και για κάθε τιμή πάχους του στρώματος φωσφόρου Gd₂O₂S:Tb, δίνουν (ύστερα από μία σχετική επεξεργασία μονάδων που περιγράφεται αμέσως μετά) τιμές βαθμίδας (ως προς την κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ακτίνων X) της απορροφούμενης δόσης dE/dx , συναρτήσε του βάθους x .

Οι μονάδες στις οποίες εξάγονται τα αποτελέσματα dE/dx από το διαθέσιμο λογισμικό, είναι keV/(g/cm²). Ωστόσο, για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας είναι πιο χρηστικό να έχουμε τα αποτελέσματα σε μονάδες keV/cm. Με την παραδοχή που έχει ήδη γίνει από το Κεφάλαιο 2 ότι η πυκνότητα του φωσφόρου Gd₂O₂S:Tb είναι $d = 7.34 \text{ g/cm}^3$ και $d = m/V = m/(Ax) = (m/A)/x$, όπου m η μάζα φωσφόρου που περικλείεται στο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο όγκου V , εμβαδού βάσης A και πάχους x , για $m = 1 \text{ g}$ και $A = 1 \text{ cm}^2$, τελικά προκύπτει η ακόλουθη σχέση που δίνει το πάχος x εκφρασμένο σε cm όταν είναι γνωστό το πάχος σε g/cm²:

$$x[\text{cm}] = \frac{1}{d} x \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right] = \frac{1}{7.34} x \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right] \cong 0.136 x \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right] \quad (3.1)$$

Η σχέση (3.1), μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να εκφραστούν τα αποτελέσματα της βαθμίδας της απορροφούμενης δόσης στον φώσφορο σε μονάδες keV/cm αντί για keV cm²/g, στις οποίες δίδονται από το λογισμικό τα αποτελέσματα των ψευδοτυχαίων προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo. Αυτό, μπορεί να γίνει ως εξής:

$$\frac{dE}{dx} \left[\frac{\text{keV}}{\text{g/cm}^2} \right] = \frac{dE[\text{keV}]}{dx \left[\text{g/cm}^2 \right]} = \frac{dE[\text{keV}]}{7.34 dx[\text{cm}]} \cong 0.136 \frac{dE}{dx} \left[\frac{\text{keV}}{\text{cm}} \right] \quad (3.2)$$

Από την (3.2), προκύπτει ότι:

$$\frac{dE}{dx} \left[\frac{\text{keV}}{\text{cm}} \right] = 7.34 \frac{dE}{dx} \left[\frac{\text{keV}}{\text{g/cm}^2} \right] \quad (3.3)$$

Η σχέση (3.3) χρησιμοποιείται για την απευθείας μετατροπή των μονάδων της βαθμίδας δόσης των προσομοιώσεων στις επιθυμητές μονάδες keV/cm.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων, είναι χρήσιμα για τη συνέχιση της μελέτης στα επόμενα στάδια, αλλά δεν αποτελούν τα τελικά αποτελέσματα της τελικής εξόδου του συστήματος. Συνεπώς, παρατίθενται για λόγους πληρότητας της εργασίας στο Παράρτημα 1.

Στα γραφήματα $dE/dx = f(x)$ που παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1, το εμβαδόν της επιφάνειας που περικλείεται από την καμπύλη και τον άξονα x είναι η συνολική ενέργεια που μεταφέρεται στον φώσφορο. Αυτή η ενεργεια, υπολογίζεται θεωρητικά ως το συνεχές ολοκλήρωμα:

$$E = \int_0^{x_{\max}} \frac{dE}{dx} dx \quad (3.4)$$

όπου x_{\max} είναι η μέγιστη τιμή της μεταβλητής ολοκλήρωσης x, δηλαδή το συνολικό πάχος του στρώματος φωσφόρου.

Η σχέση (3.4) πρέπει να διακριτοποιηθεί, καθώς τα δεδομένα των προσομοιώσεων αποτελούν ζεύγη συντεταγμένων και όχι αναλυτική συνάρτηση. Με διακριτοποίηση λοιπόν, η (3.4) μετατρέπεται στην ακόλουθη:

$$E = \sum_{k=1}^N \left(\frac{dE}{dx} \right)_k \Delta x_k \stackrel{\Delta x_k = \Delta x}{=} \sum_{k=1}^N \left(\frac{dE}{dx} \right)_k \Delta x = \Delta x \sum_{k=1}^N \left(\frac{dE}{dx} \right)_k \quad (3.5)$$

όπου $\Delta x_k = \Delta x = 0.001 \text{ cm} = 10 \text{ }\mu\text{m}$ το βήμα πάχους του στρώματος φωσφόρου που μεσολαβεί μεταξύ δύο οποιονδήποτε διαδοχικών τιμών πάχους του.

Η συνολική απορροφούμενη στον φώσφορο ενέργεια για τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV, και για πάχη φωσφόρου Gd₂O₂S:Tb 0.04,

0.06, 0.10 και 0.13 cm προκύπτει από τη σχέση (3.5) και δίνεται στο Παράρτημα 1, στον Πίνακα Π1.1.

3.3 Υπολογισμός παραμέτρων στην έξοδο του μετατροπέα

Σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνας 3.1, το γραμμικό σύστημα αποτελείται από 5 αλληλοδιαδοχικά στάδια, τα οποία έχουν χωριστεί σε δύο ομάδες: Τα δύο στάδια του μετατροπέα και τα τρία στάδια της συστοιχίας. Στην παράγραφο 3.3 λοιπόν, θα διενεργηθεί εξαγωγή αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη μέση τιμή του σήματος εξόδου M_A του μετατροπέα και το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_A(u)$ στην έξοδο του μετατροπέα. Αυτό, θα πραγματοποιηθεί μέσω αξιοποίησης των δεδομένων εξόδου των προσομοιώσεων, με κατάλληλη προσαρμογή στοιχείων θεωρίας από τη βιβλιογραφία στο μελετούμενο πρόβλημα.

3.3.1 Μέση τιμή M_A του σήματος εξόδου του μετατροπέα

Στη γενική περίπτωση της πολυενεργειακής προσπίπτουσας δέσμης ακτίνων X, στην έξοδο του στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$, η μέση τιμή σήματος μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [16]:

$$M_A = \int_0^{kV_p} \int_0^T w(E)\eta(E)q(x;E)G(E)\xi(x)MTF_{A_2}(u=0;x)dx dE \quad (3.6)$$

Στη σχέση (3.6) ισχύουν τα εξής:

- Τα μέγιστα των μεταβλητών ολοκλήρωσης είναι τα εξής: kV_p είναι η μέγιστη ενέργεια που επιταχύνει τα ηλεκτρόνια που παράγουν τις ακτίνες X οπότε και η μέγιστη ενέργεια των παραγόμενων φωτονίων ακτίνων X, ενώ T είναι το πάχος του φωσφόρου συνολικά.
- $w(E)$ είναι η ενεργειακή κατανομή της ροής φωτονίων (πλήθος φωτονίων ανά μονάδα ενέργειας).
- $\eta(E)$ είναι το ποσοστό των προσπίπτοντων φωτονίων τα οποία αλληλεπιδρούν με τον φώσφορο, το οποίο είναι συνάρτηση της ενέργειάς τους.
- $q(x;E)$ είναι το ποσοστό από τα αλληλεπιδρώντα φωτονία ενέργειας E , το οποίο αλληλεπιδρά με στρώμα του φωσφόρου που βρίσκεται σε βάθος x και έχει στοιχειώδες πάχος dx
 - Οπότε $w(E)\eta(E)q(x;E)$ είναι το ποσοστό της ροής φωτονίων που αλληλεπιδρά με στρώμα του φωσφόρου που έχει στοιχειώδες πάχος dx σε βάθος x
- $G(E)$ είναι το πλήθος παραγόμενων οπτικών φωτονίων για κάθε φωτόνιο ακτίνων X που αλληλεπιδρά με τον φώσφορο
- $\xi(x)$ είναι το ποσοστό των οπτικών φωτονίων από εκείνα που δημιουργούνται σε βάθος x , τα οποία φθάνουν στην έξοδο του φωσφόρου
- $MTF_{A_2}(u=0;x)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης για μηδενική χωρική συχνότητα, στρώματος του φωσφόρου που βρίσκεται σε βάθος x και έχει στοιχειώδες πάχος dx . Αντιπροσωπεύει τη διασπορά των φωτονίων καθώς αυτά οδεύουν προς την έξοδο του φωσφόρου.

Στην παρούσα εφαρμογή όμως, η δέσμη είναι μονοενεργειακή, οπότε δεν υπάρχει εξάρτηση από την ενέργεια και επομένως, ισχύει:

$$\int_0^{kV_p} w(E)\eta(E)q(x;E)dE = N\eta q(x) \quad (3.7)$$

όπου N το πλήθος προσπίπτοντων φωτονίων και μάλιστα στην περίπτωση της παρούσας εφαρμογής $N = 1$ φωτόνιο (με ενέργεια E_0).

Έτσι, η (3.6) λαμβάνοντας υπόψη την (3.7) γράφεται:

$$M_A = N\eta \int_0^T q(x)G\xi(x)MTF_{A_2}(u=0;x)dx \quad (3.8)$$

Η παράμετρος G που όπως προαναφέρθηκε δίνει το πλήθος παραγόμενων οπτικών φωτονίων για κάθε φωτόνιο ακτίνων X που αλληλεπιδρά με τον φώσφορο, μπορεί να εκφραστεί στην μονοενεργειακή παρούσα μελέτη ως εξής:

$$G = n_c \frac{E_0}{E_\lambda} \quad (3.9)$$

όπου n_c η ενδογενής αποδοτικότητα μετατροπής ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής παραγόμενης φωτεινής ενέργειας στον φώσφορο προς την ενέργεια ακτίνων X που αλληλεπιδρούν με αυτόν, E_0 η ενέργεια των φωτονίων της προσπίπτουσας δέσμης φωτονίων X που στις εξεταζόμενες περιπτώσεις λαμβάνει τιμές 1, 2, 4 και 8 MeV και E_λ η ενέργεια των παραγόμενων φωτονίων στο οπτικό φάσμα με μήκος κύματος $\lambda = 530$ nm [17] η οποία μέσω της σχέσης $E_\lambda = hc / \lambda$ ($h = 6.63 \times 10^{-34}$ m² kg/s η σταθερά του Planck και $c = 3 \times 10^8$ m/s η ταχύτητα του φωτός στο κενό) εκφράζεται σε eV και προκύπτει $E_\lambda = 2.33$ eV.

Έτσι, η (3.8) λόγω της (3.9) λαμβάνει τη μορφή:

$$M_A = N\eta \int_0^T q(x)n_c \frac{E_0}{E_\lambda} \xi(x)MTF_{A_2}(u=0;x)dx \quad (3.10)$$

Στην (3.10), το γινόμενο $G\xi(x)dx = n_c \frac{E_0}{E_\lambda} \xi(x)dx$ σύμφωνα με την ανάλυση

που έχει προηγηθεί, είναι το μέσο πλήθος ορατών φωτονίων που φθάνουν στην έξοδο του φωσφόρου, τα οποία παράγονται από ένα φωτόνιο ακτινοβολίας X που αλληλεπιδρά με στρώμα του φωσφόρου το οποίο βρίσκεται σε βάθος x και έχει απειροστό πάχος dx . Αν συμπεριληφθεί στο γινόμενο αυτό και η διασπορά των ορατών φωτονίων καθώς αυτά οδεύουν από το σημείο δημιουργίας τους προς την έξοδο του φωσφόρου, το γινόμενο περιλαμβάνει και τη συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης μηδενικής χωρικής συχνότητας $MTF_{A_2}(u=0,x)$ και μπορεί να τεθεί $\xi(x)MTF_{A_2}(u=0;x) \equiv L(u=0;x)$ οπότε η εξίσωση (3.10) ξαναγράφεται ως:

$$M_A = N\eta \int_0^T q(x)n_c \frac{E_0}{E_\lambda} L(u=0;x)dx \quad (3.11)$$

Στην (3.11) η $L(u,x)$ στη γενική περίπτωση δίνεται από την ακόλουθη σχέση [14]:

$$L(u, x) = \frac{\tau\rho_i [b(u) + \tau\rho_o] e^{b(u)x} + \tau\rho_i [b(u) - \tau\rho_o] e^{-b(u)x}}{[b(u) + \tau\rho_o][b(u) + \tau\rho_i] e^{b(u)T} - [b(u) - \tau\rho_o][b(u) - \tau\rho_i] e^{-b(u)T}} \quad (3.12)$$

Στη σχέση (3.12) ισχύουν τα εξής:

- Οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι το βάθος x (το οποίο στην παρούσα εργασία το μετράμε σε cm) και η χωρική συχνότητα u (την οποία μετράμε σε μονάδες κύκλων/cm). Στην παρούσα μελέτη, το βάθος x λαμβάνει τιμές από περίπου μηδέν έως το συνολικό πάχος φωσφόρου (δηλαδή 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm αναλόγως την προσομοίωση) και οι χωρικές συχνότητες u λαμβάνουν τιμές από περίπου μηδέν έως 10 κύκλους / mm = 10 κύκλους / (0.1 cm) = 100 κύκλους / cm [14].

- Η παράμετρος τ είναι συντελεστής σκέδασης και λαμβάνει στην εξεταζόμενη περίπτωση φωσφόρου την τιμή $\tau = 499.55 \text{ cm}^2/\text{g}$ [15].

- Η συνάρτηση $b(u)$ είναι οπτική παράμετρος που εξαρτάται από τη χωρική συχνότητα ως εξής [15]: $b(u) = \sqrt{\sigma^2 + 4\pi^2 (u/d)^2}$ όπου η παράμετρος σ είναι παράγοντας απορρόφησης με $\sigma = 30 \text{ cm}^2/\text{g}$ και $d = 7.34 \text{ g/cm}^3$ η πυκνότητα του φωσφόρου [15].

- Οι παράμετροι ρ_i και ρ_o είναι συντελεστές ανάκλασης στην αρχική και την τελική επιφάνεια του φωσφόρου, αντίστοιχα και λαμβάνουν τιμές $\rho_i = 0.25$ και $\rho_o = 0.80$ [15].

- Η παράμετρος T είναι το συνολικό πάχος του στρώματος φωσφόρου και στις εξεταζόμενες περιπτώσεις της παρούσας εργασίας, λαμβάνει τιμές 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm.

Ακόμα, όπως προαναφέρθηκε ο παράγοντας η είναι το ποσοστό των προσπίπτοντων φωτονίων τα οποία αλληλεπιδρούν με τον φώσφορο (και ως ποσοστό είναι καθαρός αριθμός). Στην προσέγγιση της παρούσας εργασίας όπου προσπίπτει ένα φωτόνιο, αν απορροφούταν όλη η ενέργεια του φωτονίου στον φώσφορο, θα μεταφερόταν ενέργεια E_0 . Όμως, στην πράξη η μεταφερόμενη στον φώσφορο ενέργεια ανά μονάδα πάχους είναι dE/dx . Έτσι, το ποσοστό της απορροφούμενης ενέργειας σε όλο το πάχος φωσφόρου T από τη συνολική προσπίπτουσα ενέργεια E_0 του φωτονίου ακτινοβολίας X , δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{\int_0^T (dE/dx) dx}{E_0} \quad (3.13)$$

Επίσης, σύμφωνα με τα παραπάνω η συνάρτηση $q(x)$ δίνει το ποσοστό από τη μεταφερόμενη ενέργεια ακτινοβολίας X , η οποία μεταφέρεται σε στρώμα φωσφόρου που βρίσκεται σε βάθος x και έχει απειροστό πάχος dx . Στην περίπτωση του ενός προσπίπτοντος φωτονίου που εξετάζεται στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, όλη η ενέργεια που μεταφέρεται στον φώσφορο στο συνολικό πάχος του φωσφόρου T ισούται με $\int_0^T (dE/dx) dx$, οπότε το ποσοστό αυτής που μεταφέρεται σε στρώμα

φωσφόρου το οποίο βρίσκεται σε βάθος x και έχει απειροστό πάχος dx δίνεται από τον ακόλουθο λόγο:

$$q(x) = \frac{dE/dx \, dx}{\int_0^T (dE/dx) \, dx} \quad (3.14)$$

Επισημαίνεται ότι η συνάρτηση $q(x)$ είναι ποσοστό και έτσι, είναι κάποιος καθαρός αριθμός ο οποίος μεταβάλλεται με το βάθος x .

Με αντικατάσταση των η και $q(x)$ από τις σχέσεις (3.13) και (3.14) αντίστοιχα στην (3.11), προκύπτει:

$$\begin{aligned} M_A &= N \frac{\int_0^T (dE/dt) \, dt}{E_0} \int_0^T \frac{(dE/dx) \, dx}{\int_0^T (dE/dt) \, dt} n_c \frac{E_0}{E_\lambda} L(u=0; x) \\ &= N \frac{\int_0^T (dE/dt) \, dt}{\int_0^T (dE/dt) \, dt} \int_0^T \frac{(dE/dx) \, dx}{E_0} n_c \frac{E_0}{E_\lambda} L(u=0; x) \\ &= N \int_0^T \frac{(dE/dx)}{E_0} n_c \frac{E_0}{E_\lambda} L(u=0; x) \, dx \end{aligned}$$

Οπότε τελικά, για τη μέση τιμή σήματος στην έξοδο του μετατροπέα ισχύει:

$$M_A = N n_c \frac{E_0}{E_\lambda} \int_0^T \frac{dE/dx}{E_0} L(u=0; x) \, dx \quad (3.15)$$

Από τις προσομοιώσεις όμως, δεν υπάρχουν διαθέσιμες οι τιμές των συναρτήσεων σε συνεχή πεδία ορισμού, αλλά σε διακριτά. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη διακριτοποίησης. Διακριτοποιώντας λοιπόν τη σχέση (3.15), καταλήγουμε ότι η μέση τιμή του σήματος στην έξοδο του μετατροπέα μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$M_A = N n_c \frac{E_0}{E_\lambda} \sum_k \frac{(dE/dx)_k}{E_0} L_k(u=0) \Delta x_k \quad (3.16)$$

Στην (3.16), το στοιχειώδες πάχος Δx_k στο οποίο έχει διαμεριστεί το συνολικό πάχος του φωσφόρου, είναι σταθερό και μάλιστα είναι $\Delta x_k = \Delta x = 0.001 \text{ cm}$. Έτσι, όπως και η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου E_0 , βγαίνει έξω από το άθροισμα και η (3.16) γράφεται απλούστερα ως ακολούθως:

$$M_A = \frac{N n_c \Delta x}{E_\lambda} \sum_k (dE/dx)_k L_k(u=0) \quad (3.17)$$

Στην (3.17), η άθροιση γίνεται σε όλες τις διαθέσιμες από τις προσομοιώσεις τιμές $\left(\frac{dE}{dx}\right)_k$ και η συνάρτηση $L_k(u)$ για καθεμία από αυτές προκύπτει από διακριτοποίηση της (3.12) εκφρασμένη για μηδενική χωρική συχνότητα ως εξής:

$$L_k(u=0) = \frac{\tau\rho_i [b(u) + \tau\rho_o] e^{b(u)x_k} + \tau\rho_i [b(u) - \tau\rho_o] e^{-b(u)x_k}}{\left[b(u) + \tau\rho_o \right] \left[b(u) + \tau\rho_i \right] e^{b(u)T} - \left[b(u) - \tau\rho_o \right] \left[b(u) - \tau\rho_i \right] e^{-b(u)T}} \Bigg|_{u=0} \quad (3.18)$$

όπου η συνάρτηση $L_k(u=0)$ υπολογίζεται για όλες τις διαθέσιμες από τις προσομοιώσεις τιμές x_k .

Η (3.18) με βάση τα παραπάνω γίνεται:

$$L_k(u=0) = \frac{\tau\rho_i [\sigma + \tau\rho_o] e^{\sigma x_k} + \tau\rho_i [\sigma - \tau\rho_o] e^{-\sigma x_k}}{\left[\sigma + \tau\rho_o \right] \left[\sigma + \tau\rho_i \right] e^{\sigma T} - \left[\sigma - \tau\rho_o \right] \left[\sigma - \tau\rho_i \right] e^{-\sigma T}} \quad (3.19)$$

Τελικά, η (3.17) μαζί με την έκφραση (3.19) δίνει το μέσο πλήθος φωτονίων στο ορατό φάσμα που προκύπτουν στην έξοδο του μετατροπέα λόγω ενός φωτονίου ακτινοβολίας X που προσπίπτει στην είσοδό του και το αποτέλεσμα είναι καθαρός αριθμός (αδιάστατος).

Αν και πρόκειται για ενδιάμεσο στάδιο και όχι για την τελική έξοδο του συστήματος, έχει ενδιαφέρον να ελεγχθούν οι αριθμητικές τιμές στις οποίες καταλήγουμε με εφαρμογή της παραπάνω ανάλυσης. Για αυτόν το λόγο, τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα 2.

3.3.2 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_A(u)$ στην έξοδο του μετατροπέα

Όσον αφορά το φάσμα ισχύος θορύβου (NPS) στη γενική περίπτωση της πολυενεργειακής προσπίπτουσας δέσμης ακτίνων X , στην έξοδο του στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$, μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [16]:

$$NPS_A(u) = \int_0^{kV_p T} \int_0^T w(E) \eta(E) q(x; E) \left[G(E) \xi(x) MTF_{A_2}(u; x) \right]^2 dx dE \quad (3.20)$$

όπου τα εμπλεκόμενα μεγέθη έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά στην παράγραφο 3.3.1.

Ακολουθώντας την ίδια πορεία με την παράγραφο 3.3.1 λοιπόν, προκύπτει το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του μετατροπέα για μονοενεργειακή δέσμη και για συνεχή πεδία ορισμού των εμπλεκόμενων συναρτήσεων:

$$NPS_A(u) = N \left(n_c \frac{E_0}{E_\lambda} \right)^2 \int_0^T \frac{dE}{E_0} \left[L(u; x) \right]^2 dx \quad (3.21)$$

Στην (3.21) η συνάρτηση $L(u; x)$ δίνεται από τη σχέση (3.12). Ύστερα από διακριτοποίηση, η (3.21) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$NPS_A(u) = N \left(n_c \frac{E_0}{E_\lambda} \right)^2 \sum_k \frac{(dE/dx)_k}{E_0} [L_k(u)]^2 \Delta x_k \quad (3.22)$$

Η σχέση (3.22), επειδή $\Delta x_k = \Delta x = 0.001$ cm μπορεί να γραφτεί πιο απλά ως εξής:

$$NPS_A(u) = \left(\frac{NE_0 n_c^2 \Delta x}{E_\lambda^2} \right) \sum_k (dE/dx)_k [L_k(u)]^2 \quad (3.23)$$

Τέλος, στη σχέση (3.23), η συνάρτηση $L(u;x)$ εκφράζεται όπως και στην (3.19), αλλά αυτή τη φορά στη γενική περίπτωση της χωρικής συχνότητας u :

$$L_k(u) = \frac{\tau \rho_i [b(u) + \tau \rho_o] e^{b(u)x_k} + \tau \rho_i [b(u) - \tau \rho_o] e^{-b(u)x_k}}{[b(u) + \tau \rho_o][b(u) + \tau \rho_i] e^{b(u)T} - [b(u) - \tau \rho_o][b(u) - \tau \rho_i] e^{-b(u)T}} \quad (3.24)$$

Τα επιμέρους μεγέθη της (3.24) έχουν ήδη αναλυθεί στην παράγραφο 3.3.1. Τελικά, η σχέση (3.23) μαζί με την (3.24) δίνουν το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του μετατροπέα, όταν στην είσοδό του διεγείρεται από ένα φωτόνιο ακτινοβολίας X .

Ωστόσο, η αριθμητική εφαρμογή της σχέσης (3.24) είναι σχετικά πολύπλοκη λόγω του γεγονότος ότι έχει δύο ανεξάρτητες μεταβλητές: Το βάθος x_k μέσα στον φώσφορο και τη χωρική συχνότητα u . Για αυτό, κρίνεται βοηθητικό για τον αναγνώστη να συμπεριληφθούν σχετικές εξηγήσεις με τα βήματα υπολογισμού αυτής της παραμέτρου στο MS Excel (Παράρτημα 3).

Επίσης, στο Παράρτημα 4 παρατίθενται τα αποτελέσματα για το φάσμα ισχύος θορύβου, σε καθεμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις συνολικού πάχους φωσφόρου και ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου.

3.4 Υπολογισμός παραμέτρων στην έξοδο του συστήματος

Ακολουθώντας και πάλι το διάγραμμα της Εικόνας 3.1, στο γραμμικό σύστημα μετά από τα δύο αλληλοδιαδοχικά στάδια του μετατροπέα, ακολουθούν τα τρία αλληλοδιαδοχικά στάδια της συστοιχίας. Στην παράγραφο 3.4 λοιπόν, θα διενεργηθεί εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων για τη μέση τιμή του σήματος εξόδου M_B της συστοιχίας και το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_B(u)$ στην έξοδο της συστοιχίας. Αυτές οι παράμετροι εξόδου, είναι και οι παράμετροι εξόδου του συστήματος, σύμφωνα με την προσέγγιση που περιγράφει το διάγραμμα της Εικόνας 3.1. Επισημαίνεται ότι, η είσοδος της συστοιχίας δέχεται τις τιμές M_A και $NPS_A(u)$ που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 3.3.

3.4.1 Μέση τιμή M_{OUT} του σήματος εξόδου του συστήματος

Σύμφωνα με την περιγραφή των σταδίων στην παράγραφο 3.1 και στον Πίνακα 3.1, όσον αφορά τα τρία αλληλοδιαδοχικά στάδια της συστοιχίας, από αυτά μόνο το Β1 που είναι στάδιο στοχαστικής ενίσχυσης επηρεάζει τη μέση τιμή του σήματος σύμφωνα με τη σχέση (1.2), μέσω της παραμέτρου αποδοτικότητας της οπτικής σύζευξης

φωτονίων-φωτοδίοδου g_{BI} . Τα στάδια B_2 και B_3 που είναι στάδια καθορισμένης ασάφειας, σύμφωνα με τη σχέση (1.6) αφήνουν τη μέση τιμή του σήματος αμετάβλητη.

Η παράμετρος g_{BI} αφορά στάδιο μετά τον μετατροπέα, όπου η προσπίπτουσα ακτινοβολία X έχει ήδη μετατραπεί σε ορατά φωτόνια. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τον συντελεστή αποδοτικότητας φασματικής σύζευξης φωτονίων – φωτοδίοδου και σε υποθετική ιδανική σύζευξη ισούται με τη μονάδα. Σε μία ρεαλιστική προσέγγιση, στην παρούσα μελέτη θεωρούμε $g_{BI} = 0.9$.

Χρησιμοποιώντας από το Κεφάλαιο 1 με τα προαπαιτούμενα στοιχεία από τη θεωρία αλληλοδιαδοχικών σταδίων τη σχέση (1.2) που δίνει τη μέση τιμή εξόδου σε στάδια στοχαστικής ενίσχυσης, καταλήγουμε για τη μέση τιμή του σήματος εξόδου της συστοιχίας, η οποία είναι και η συνολική έξοδος του συστήματος, στη σχέση:

$$M_{OUT} = g_{BI} M_A \quad (3.25)$$

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη σχέση (3.25), παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

3.4.2 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{OUT}(u)$ στην έξοδο του συστήματος

Ακολουθώντας τη λογική που περιγράφεται στα στοιχεία από τη Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων του Κεφαλαίου 1, και τα τρία αλληλοδιαδοχικά στάδια της συστοιχίας επιδρούν στην τελική διαμόρφωση του φάσματος ισχύος θορύβου $NPS_{OUT}(u)$ στην έξοδο του συστήματος. Πρόκειται για το στάδιο στοχαστικής ενίσχυσης B_1 (σύζευξη φωτονίων – φωτοδίοδου), το στάδιο καθορισμένης ασάφειας B_2 (ολοκλήρωση φωτονίων στη φωτοδίοδο) και το στάδιο καθορισμένης ασάφειας B_3 (δειγματοληψία εικονοστοιχείων συστοιχίας). Στην Παράγραφο 3.4.2, ύστερα από υπολογισμό των φασμάτων ισχύος θορύβου στις εξόδους των σταδίων B_1 και B_2 , τελικά υπολογίζεται συναρτήσει αυτών το φάσμα ισχύος θορύβου του σταδίου B_3 δηλαδή το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του συστήματος.

3.4.2.1 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{B1}(u)$ στην έξοδο του σταδίου στοχαστικής ενίσχυσης B_1

Ξεκινώντας από το στάδιο στοχαστικής ενίσχυσης B_1 (σύζευξη φωτονίων – φωτοδίοδου) το οποίο δέχεται το σήμα εξόδου του μετατροπέα στην είσοδό του, στην έξοδό του το φάσμα ισχύος θορύβου προκύπτει από την (1.1) ότι δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$NPS_{B1}(u) = g_{BI}^2 NPS_A(u) + M_A s^2 \quad (3.26)$$

Στη σχέση (3.26), $g_{BI} = 0.9$ είναι η αποδοτικότητα οπτικής σύζευξης φωτονίων-φωτοδίοδου, $NPS_A(u)$ είναι το φάσμα ισχύος θορύβου συναρτήσει της χωρικής συχνότητας στην έξοδο του μετατροπέα και έχει υπολογιστεί στην παράγραφο 3.3.2, M_A είναι η μέση τιμή του σήματος εξόδου του μετατροπέα και έχει υπολογιστεί στην παράγραφο 3.3.1 και τέλος, s^2 είναι η διακύμανση του θορύβου που παράγεται λόγω του ρεύματος σκότους στις φωτοδίοδους και δίνεται από την ακόλουθη σχέση [18]:

$$s^2 = \frac{I_d t_D}{q_e} \quad (3.27)$$

Στη σχέση (3.27), I_d είναι το ρεύμα σκότους που διαρρέει την φωτοδίοδο απουσία σήματος και είναι $I_d = J_d a_{pd}^2$ όπου J_d το μέτρο της επιφανειακής πυκνότητας ρεύματος σκότους και a_{pd}^2 το εμβαδόν επιφάνειας της φωτοδίοδου. Η πυκνότητα ρεύματος σκότους που διαρρέει τη φωτοδίοδο, τυπικά [18] έχει τιμή $J_d = 10^{-12}$ A/mm² και το εμβαδόν επιφάνειας της φωτοδίοδου σύμφωνα με την παράγραφο 2.3 είναι $a_{pd}^2 = 0.21$ mm², οπότε τελικά το ρεύμα σκότους είναι $I_d = 10^{-12}$ A/mm² 0.21 mm² = 2.1×10^{-13} A. Επίσης, q_e είναι το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου $q_e = 1.60 \times 10^{-19}$ C και t_D είναι ο (νεκρός) χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών αναγνώσεων του ανιχνευτή και μπορεί να θεωρηθεί $t_D = 33$ ms. Έτσι, τελικά η σχέση (3.27) με αριθμητική εφαρμογή δίνει $s^2 = 43312.50$.

Με βάση τις σχέσεις (3.26) και (3.27) μπορούν πλέον να υπολογιστούν για κάθε περίπτωση πάχους στρώματος φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm και για κάθε τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV οι καμπύλες του φάσματος ισχύος θορύβου στην έξοδο του σταδίου B₁ NPS_{B1} ως συναρτήσεις της χωρικής συχνότητας. Τα αποτελέσματα αυτά, καθώς δεν αφορούν την τελική έξοδο του συστήματος, δίνονται στο Παράρτημα 5.

3.4.2.2 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{B2}(u)$ στην έξοδο του σταδίου καθορισμένης ασάφειας B₂

Συνεχίζοντας με το στάδιο καθορισμένης ασάφειας B₂ (ολοκλήρωση φωτονίων στη φωτοδίοδο) το οποίο δέχεται το σήμα εξόδου του σταδίου στοχαστικής ενίσχυσης B₁ στην είσοδό του, στην έξοδό του το φάσμα ισχύος θορύβου προκύπτει από την (1.5) ότι δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$NPS_{B2}(u) = NPS_{B1}(u) MTF_{B2}^2(u) \quad (3.28)$$

Στη σχέση (3.28), $NPS_{B1}(u)$ είναι το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο που υπολογίστηκε στην παράγραφο 3.4.2.1 και $MTF_{B2}(u)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης του σταδίου B₂, η οποία δίνεται [14] από την ακόλουθη σχέση:

$$MTF_{B2}(u) = \text{sinc}(\pi a_{pd} u) \quad (3.29)$$

Στη σχέση (3.29) $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ είναι η γνωστή από τη Μαθηματική Ανάλυση συνάρτηση δειγματοληψίας, a_{pd} είναι η πλευρά της φωτοδίοδου η οποία θεωρείται ότι έχει τετραγωνικό σχήμα και σύμφωνα με την παράγραφο 2.3.2 προκύπτει ότι είναι $a_{pd} = \sqrt{a_{pd}^2} = \sqrt{0.21 \text{ mm}^2} \cong 0.46 \text{ mm} = 0.046 \text{ cm}$ και u η χωρική συχνότητα εκφρασμένη σε μονάδες κύκλων ανά cm.

Με βάση τα παραπάνω, από τις σχέσεις (3.28) και (3.29) μπορούν πλέον να υπολογιστούν για κάθε περίπτωση πάχους στρώματος φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και

0.13 cm και για κάθε τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV οι καμπύλες του φάσματος ισχύος θορύβου στην έξοδο του σταδίου B_2 NPS_{B_2} ως συναρτήσεις της χωρικής συχνότητας. Τα αποτελέσματα αυτά, καθώς δεν αφορούν την τελική έξοδο του συστήματος, παρατίθενται στο Παράρτημα 6.

3.4.2.3 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{B_3}(u)$ στην έξοδο του σταδίου καθορισμένης ασάφειας B_3

Συνεχίζοντας με το στάδιο καθορισμένης ασάφειας B_3 (δειγματοληψία εικονοστοιχείων συστοιχίας) το οποίο δέχεται το σήμα εξόδου του σταδίου καθορισμένης ασάφειας B_2 στην είσοδό του, στην έξοδό του το φάσμα ισχύος θορύβου προκύπτει από την (1.5) ότι δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$NPS_{B_3}(u) = NPS_{B_2}(u) MTF_{B_3}^2(u) \quad (3.30)$$

Στη σχέση (3.30), $NPS_{B_2}(u)$ είναι το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο που υπολογίστηκε στην παράγραφο 3.4.2.2 και $MTF_{B_3}(u)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης του σταδίου B_3 , η οποία αποδεικνύεται [18] ότι δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$MTF_{B_3}(u) = \frac{a_{pix}}{a_{pd}} \quad (3.31)$$

Στη σχέση (3.31) a_{pix} είναι η πλευρά του τετραγωνικού εικονοστοιχείου, η οποία όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3.2 είναι $a_{pix} \cong 0.51$ mm και a_{pd} είναι η πλευρά της τετραγωνικής επιφάνειας της φωτοδιόδου, η οποία όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 3.4.2.1 προκύπτει ότι είναι $a_{pd} \cong 0.46$ mm οπότε σύμφωνα με τη σχέση (3.31) είναι $MTF_{B_3}(u) = MTF_{B_3} = 1.11$, ίδια τιμή για οποιαδήποτε χωρική συχνότητα.

Αυτό, σημαίνει ότι σύμφωνα με τη σχέση (3.30) το $NPS_{B_3}(u)$ με δεδομένο το $NPS_{B_2}(u)$ υπολογίζεται απλά ως $NPS_{B_3}(u) = 1.11^2 NPS_{B_2}(u) = 1.23 NPS_{B_2}(u)$, ενώ επίσης σημειώνεται ότι το $NPS_{B_3}(u)$ είναι το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο της συστοιχίας $NPS_{B_3}(u) = NPS_{OUT}(u)$.

Με βάση τα παραπάνω, από τις σχέσεις (3.30) και (3.31) μπορούν πλέον να υπολογιστούν για κάθε περίπτωση πάχους στρώματος φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm και για κάθε τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV οι καμπύλες του φάσματος ισχύος θορύβου στην έξοδο της συστοιχίας NPS_{OUT} ως συναρτήσεις της χωρικής συχνότητας. Τα αποτελέσματα, καθώς πλέον σε αυτό το στάδιο αφορούν την τελική έξοδο του συστήματος, παρατίθενται στο Κεφάλαιο 4 το οποίο αφορά τα συνολικά αποτελέσματα της μελέτης.

4. Αποτελέσματα

Στο Κεφάλαιο 3, πραγματοποιήθηκε αναλυτική εφαρμογή της Θεωρίας Γραμμικών Συστημάτων σε σύστημα που περιγράφεται σύμφωνα με την αλληλοδιαδοχή σταδίων της Εικόνας 3.1. Στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιούνται οι αναλυτικές σχέσεις που υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 3, οι οποίες οδηγούν στα τελικά αριθμητικά αποτελέσματα για τη μέση τιμή του σήματος εξόδου και για το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του συστήματος. Ύστερα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά σε κατάλληλα διαγράμματα.

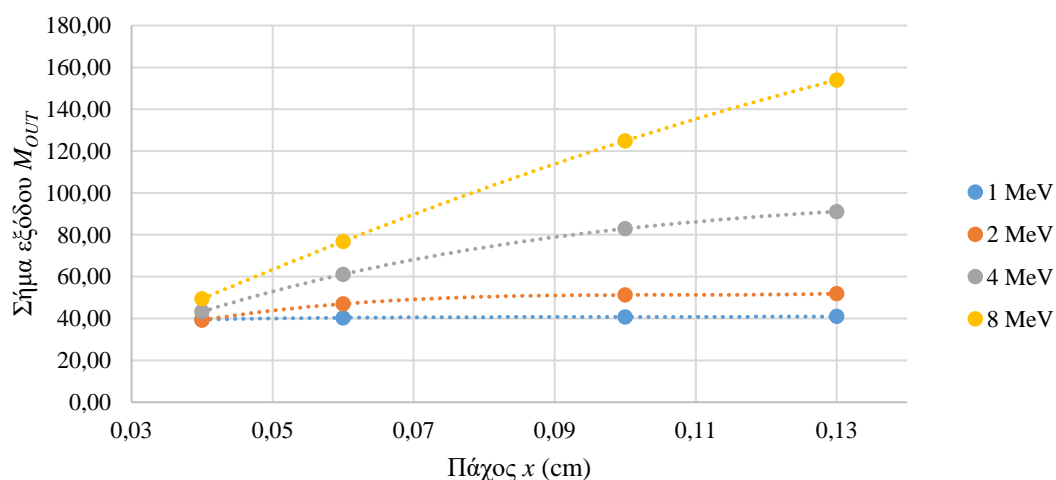
4.1 Η μέση τιμή του σήματος M_{out} στην έξοδο του συστήματος

Αν στη σχέση (3.25), εισαχθούν τα δεδομένα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επεξεργασία που αναλύεται στην παράγραφο 3.3.1 για το εισαγόμενο στο Β₁ στάδιο σήμα M_A , προκύπτει η μέση τιμή του σήματος εξόδου της συστοιχίας M_B η οποία είναι και η συνολική έξοδος του συστήματος M_{out} . Έτσι, συμπληρώνεται ο Πίνακας 4.1:

Πίνακας 4.1: Η μέση τιμή σήματος εξόδου του συστήματος, για προσπίπτον φωτόνιο ενέργειας 1, 2, 4 και 8 MeV, για διαφορετικά πάχη φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm.

x (cm)	1 MeV M_{out}	2 MeV M_{out}	4 MeV M_{out}	8 MeV M_{out}
0.04	39.56	39.18	43.30	49.41
0.06	40.36	47.01	61.11	76.84
0.10	40.75	51.25	82.93	124.90
0.13	40.99	51.86	91.14	153.94

Οι μέσες τιμές σήματος εξόδου του συστήματος ως συνάρτηση του πάχους του για τα διαφορετικά πάχη φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm που αναγράφονται στον Πίνακα 4.1, παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα στην Εικόνα 4.1 σε τέσσερις διαφορετικές καμπύλες, μία καμπύλη για καθμία από τις τιμές ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου ακτίνων X 1, 2, 4 και 8 MeV.



Εικόνα 4.1: Η μέση τιμή σήματος εξόδου του συστήματος ως συνάρτηση του πάχους φωσφόρου, για προσπίπτον φωτόνιο ενέργειας 1, 2, 4 και 8 MeV.

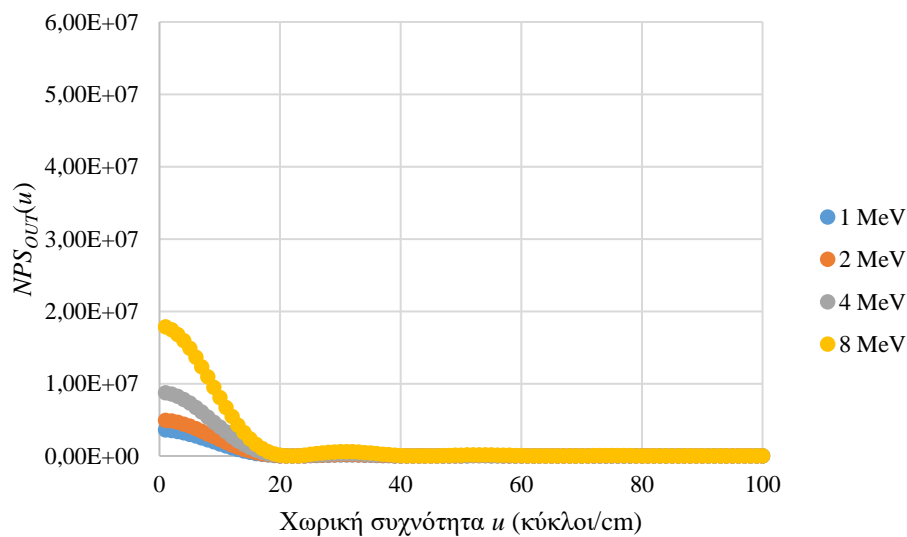
Επισημαίνεται, ότι για λόγους ευκολίας ανάγνωσης και ερμηνείας, έχουν προσαρμοστεί μέσω του λογισμικού MS Excel καμπύλες που ακολουθούν αυτόματα προσαρμοσμένες γραμμές τάσης, οι οποίες φαίνονται με διακεκομμένες γραμμές διαφορετικών χρωμάτων. Κάθε χρώμα, αφορά μία διαφορετική τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου από τις τιμές 1, 2, 4 και 8 MeV.

4.2 Το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{out}(u)$ στην έξοδο του συστήματος

Από τις σχέσεις (3.30) και (3.31) υπολογίζονται για κάθε περίπτωση πάχους στρώματος φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm και για κάθε τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV οι καμπύλες του φάσματος ισχύος θορύβου στην έξοδο της συστοιχίας NPS_{out} ως συναρτήσεις της χωρικής συχνότητας. Αυτές οι καμπύλες, αποδίδονται για λόγους ευκολίας σύγκρισης όλες στην ίδια κλίμακα, στα ακόλουθα διαγράμματα στις Εικόνες 4.2 – 4.9.

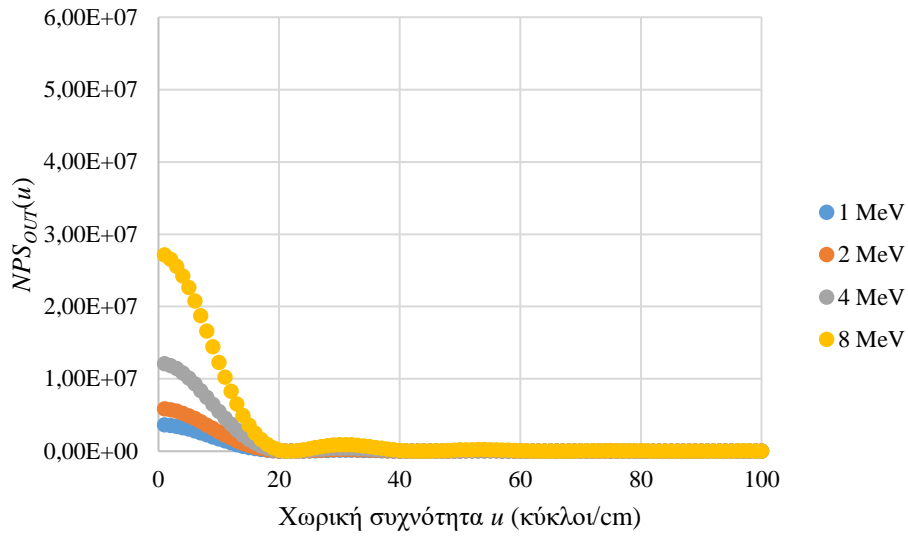
Α.) $NPS_{out}(u)$ για τις διαφορετικές τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου στο ίδιο διάγραμμα

Καθεμία από τις Εικόνες 4.2 – 4.5 παρουσιάζει στο ίδιο διάγραμμα, τις $NPS_{out}(u)$ για τις τέσσερις περιπτώσεις διαφορετικών τιμών ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου, κάθε φορά για ένα συγκεκριμένο πάχος στρώματος φωσφόρου από τα 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm.

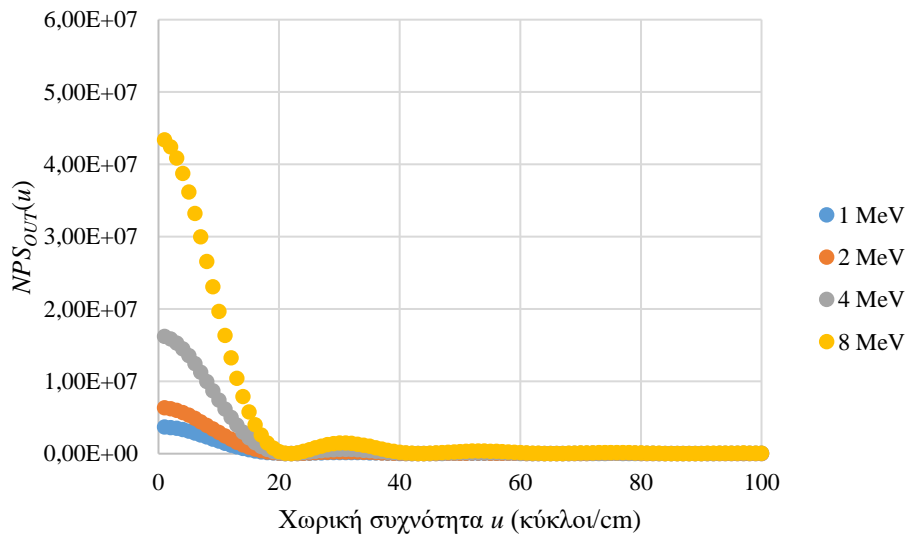


Εικόνα 4.2: Η NPS_{out} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_3:Tb$ 0.04 cm.

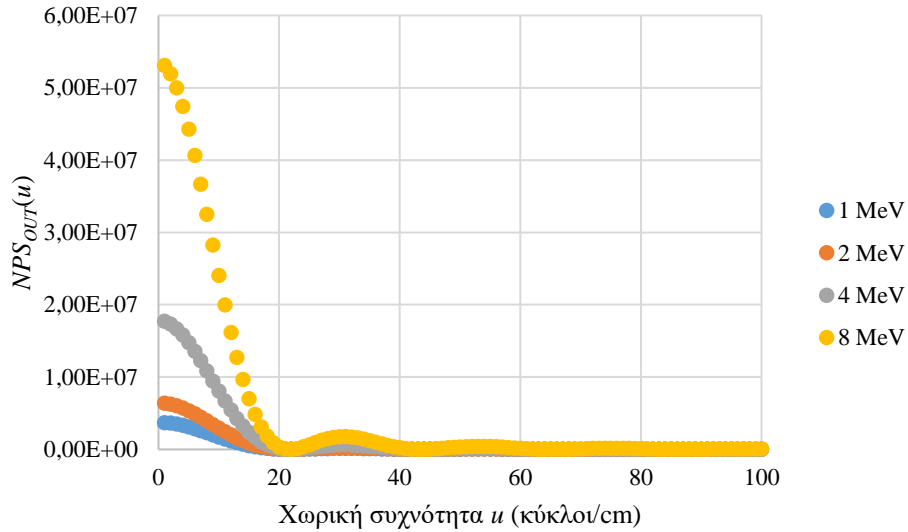
ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΠΥΛΑΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΣΩ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



Εικόνα 4.3: Η NPS_{OUT} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.06 cm.



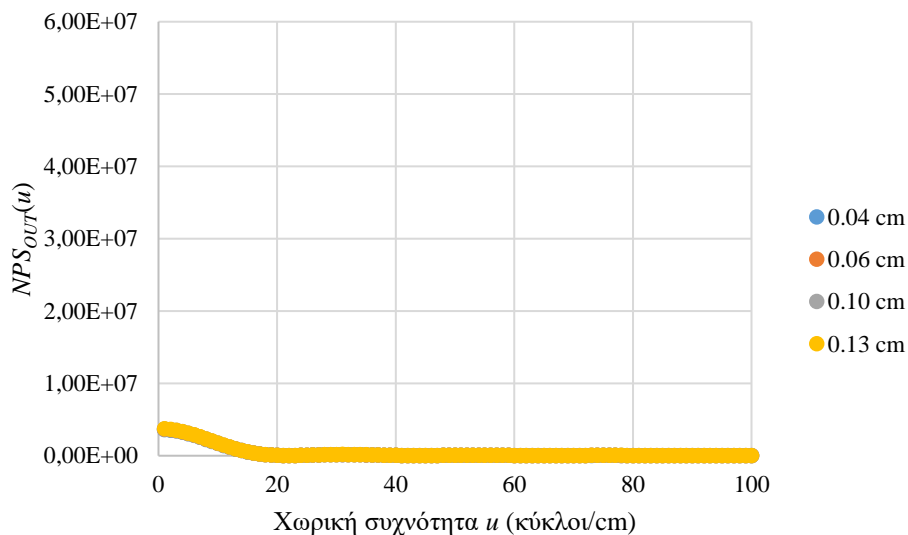
Εικόνα 4.4: Η NPS_{OUT} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.10 cm.



Εικόνα 4.5: Η NPS_{OUT} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.13 cm.

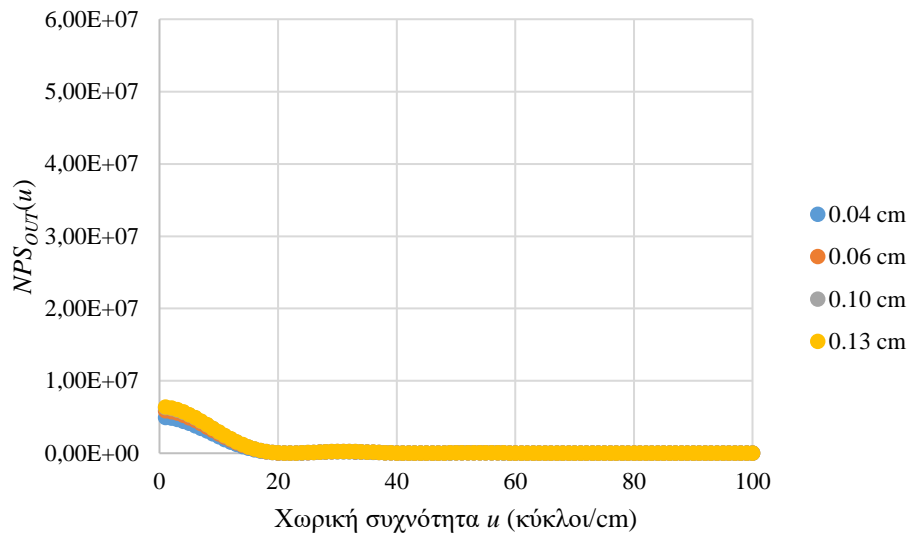
B.) $NPS_{OUT}(u)$ για τα διαφορετικά πάχη στρώματος φωσφόρου στο ίδιο διάγραμμα

Από διαφορετική σκοπιά, στις Εικόνες 4.6 – 4.9 παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα οι $NPS_{OUT}(u)$ για τις τέσσερις διαφορετικές τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου, κάθε φορά για μία συγκεκριμένη τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου από τις 1, 2, 4 και 8 MeV.

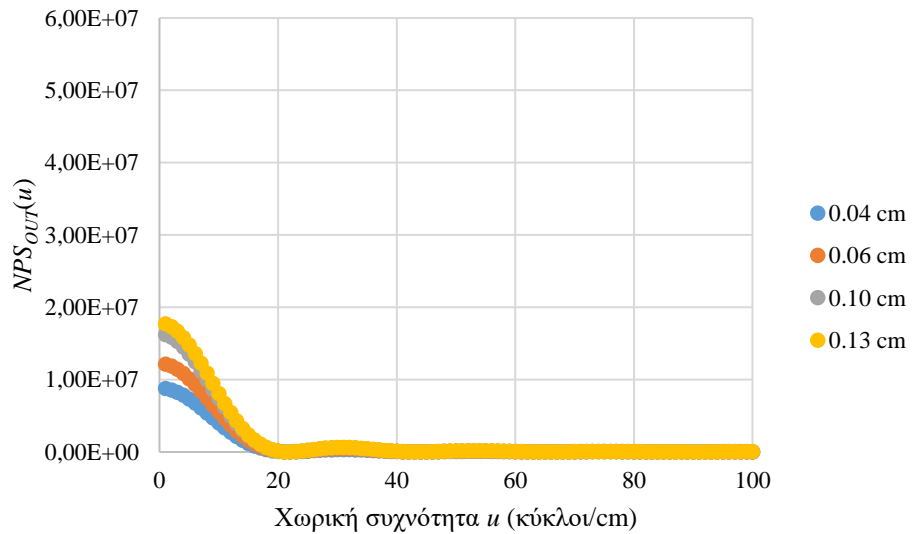


Εικόνα 4.6: Η NPS_{OUT} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 1 MeV.

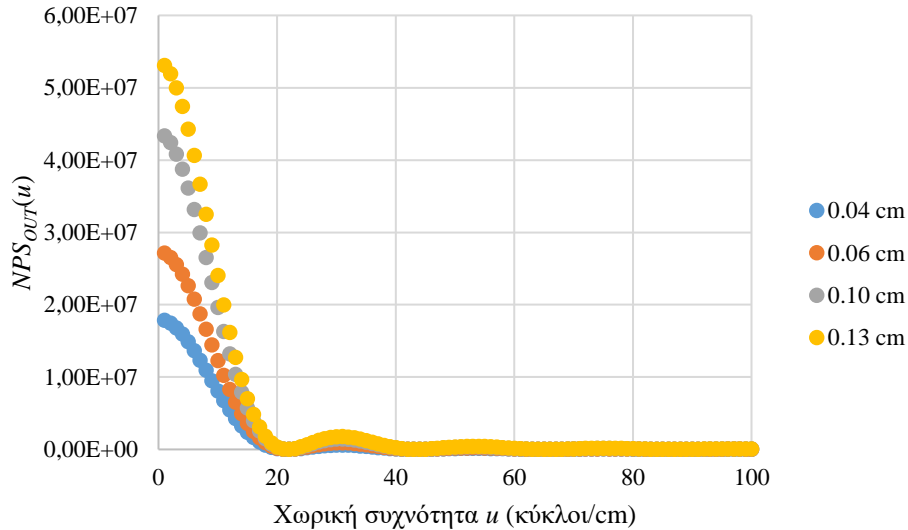
ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΠΥΛΑΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΣΩ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



Εικόνα 4.7: Η NPS_{OUT} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 2 MeV.



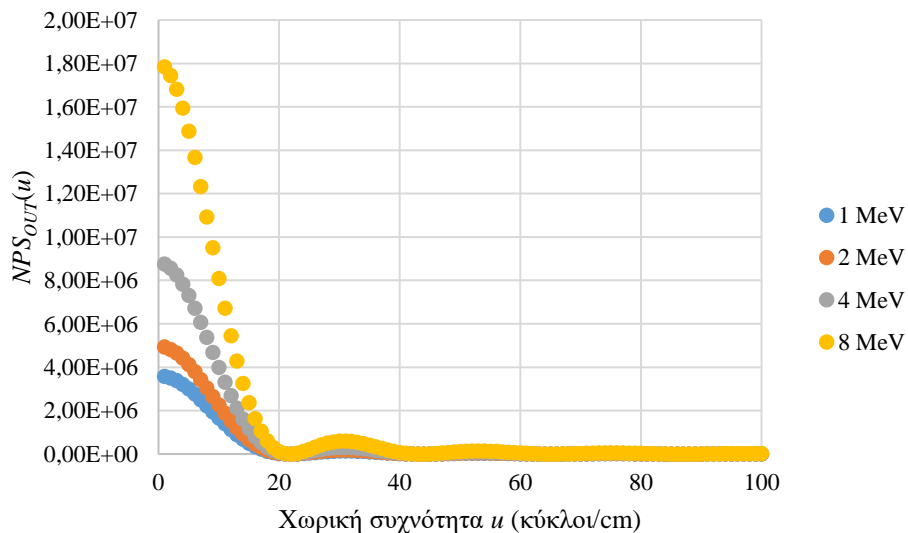
Εικόνα 4.8: Η NPS_{OUT} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 4 MeV.



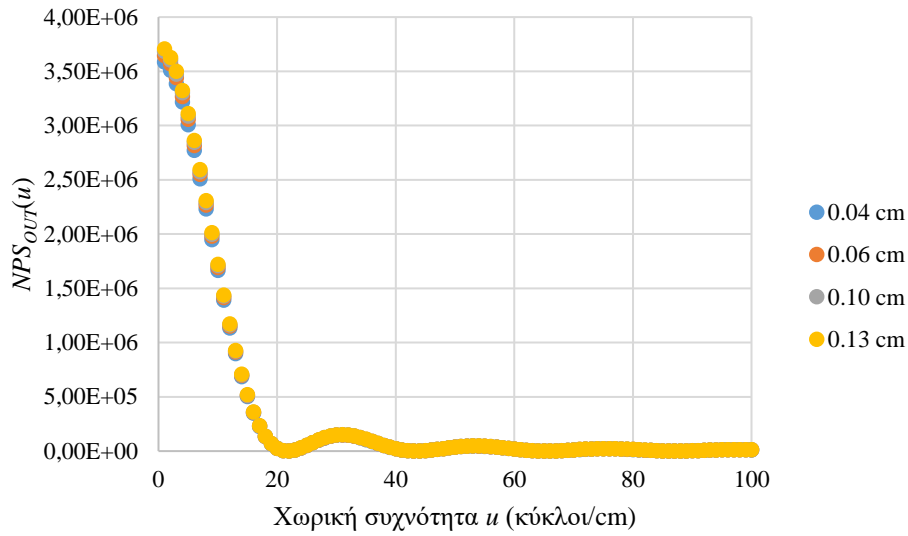
Εικόνα 4.9: Η NPS_{OUT} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 8 MeV.

Γ.) Διαγράμματα $NPS_{OUT}(u)$ για πάχος στρώματος φωσφόρου 0.04 cm και για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 1 meV σε ελεύθερη κλίμακα

Στην προσπάθεια που έγινε να αποδοθούν τα διαγράμματα του φάσματος ισχύος θορύβου στην έξοδο $NPS_{OUT}(u)$ όλα στην ίδια κλίμακα ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να συγκρίνονται άμεσα μεταξύ τους, τα διαγράμματα που αφορούν μικρά πάχη στρώματος φωσφόρου και τα διαγράμματα που αφορούν χαμηλές τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου, συμπιέστηκαν. Έτσι, είναι χρήσιμο για πάχος στρώματος φωσφόρου 0.04 cm και για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 1 MeV να αφηθεί ελεύθερη η επιλογή κλίμακας και να απεικονιστούν εκ νέου, ώστε να φανούν ενδεχόμενα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των καμπυλών, τα οποία με την προηγούμενη συμπίεση χάθηκαν. Οι περιπτώσεις αυτές φαίνονται στις Εικόνες 4.10 και 4.11:



Εικόνα 4.10: Η NPS_{OUT} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04 cm, σχεδιασμένη σε ελεύθερη κλίμακα.



Εικόνα 4.11: Η NPS_{OUT} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 1 MeV, σχεδιασμένη σε ελεύθερη κλίμακα.

Από την Εικόνα 4.10, προκύπτει ότι για πάχος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04 cm τα διαγράμματα φάσματος ισχύος θορύβου των διαφορετικών ενεργειών, έχουν ισχυρή σχετική διαφοροποίηση μεταξύ τους. Αντίθετα, από την Εικόνα 4.11 προκύπτει ότι για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 1 MeV, η μεταβολή στο πάχος αφήνει σχεδόν ανεπηρέαστο το αποτέλεσμα για το φάσμα ισχύος θορύβου.

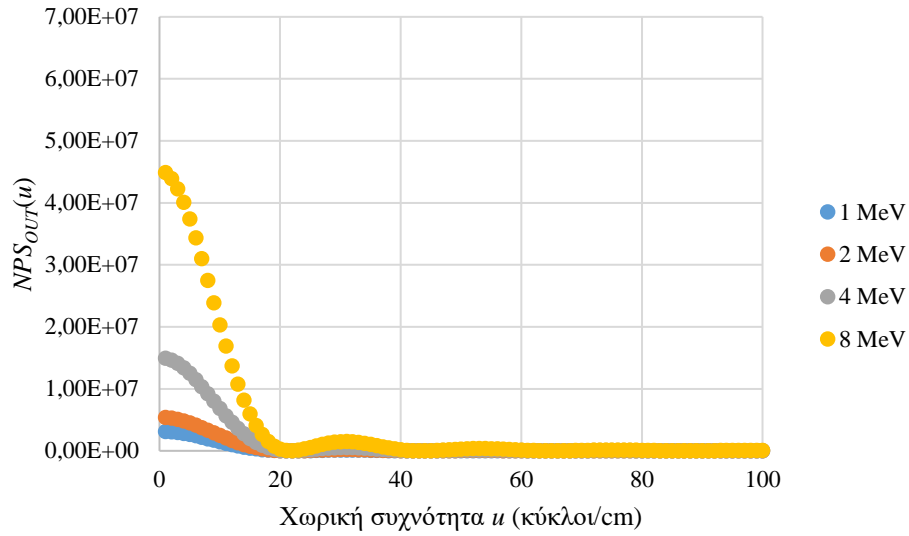
Δ.) Το φάσμα ισχύος θορύβου εξόδου $NPS_{OUT}(u)$ ως συνάρτηση των διαστάσεων των εικονοστοιχείων a_{pix}

Από τις σχέσεις (3.30) και (3.31) προκύπτει ότι το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του συστήματος για δεδομένες διαστάσεις φωτοδιόδων a_{pd} , είναι ανάλογο του τετραγώνου των διαστάσεων των εικονοστοιχείων a_{pix} :

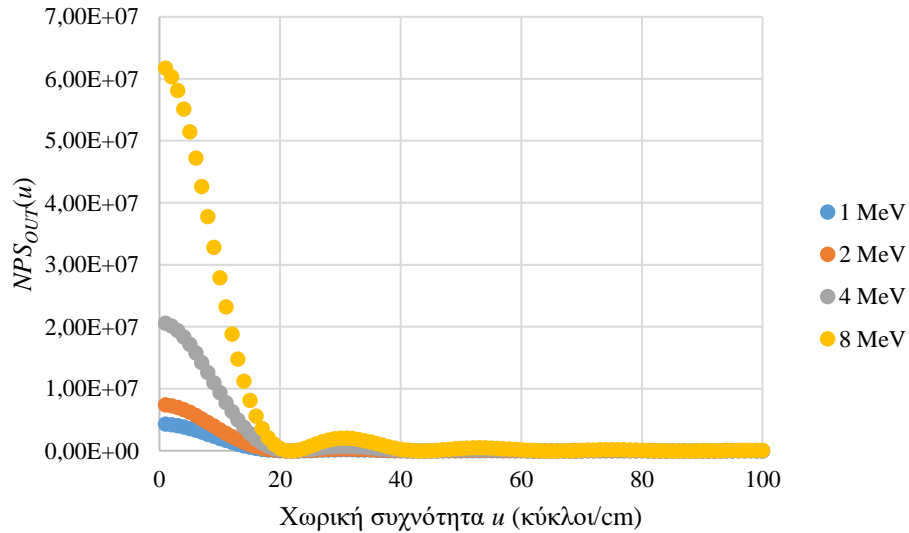
$$NPS_{B3}(u) = a_{pix}^2 NPS_{B2}(u) / a_{pd}^2 \quad (4.1)$$

Κρατώντας λοιπόν σταθερή τη διάσταση των φωτοδιόδων $a_{pd} = 0.46$ mm, μπορούμε να λάβουμε ενδεικτικά για την περίπτωση πάχους φωσφόρου 0.13 cm, εκτός της τιμής διαστάσεων εικονοστοιχείων $a_{pix} = 0.51$ mm που απεικονίστηκε στην Εικόνα 4.5, δύο επιπλέον διαγράμματα του φάσματος ισχύος θορύβου στην έξοδο του συστήματος $NPS_{OUT}(u)$ για $a_{pix} = 0.47$ mm και $a_{pix} = 0.55$ mm.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.12 και 4.13, στην ίδια κλίμακα μεταξύ τους, για ευκολία σύγκρισης.



Εικόνα 4.12: Η NPS_{OUT} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.13 cm, για μικρότερη διάσταση εικονοστοιχείου $a_{pix} = 0.47$ mm.



Εικόνα 4.13: Η NPS_{OUT} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.13 cm, για μεγαλύτερη διάσταση εικονοστοιχείου $a_{pix} = 0.55$ mm.

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, αρχικά αναφέρθηκαν χρήσιμα στοιχεία από τη Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων, η οποία επιλέχθηκε ως κατάλληλο μέσο για τη μελέτη του μεταδιδόμενου σήματος μέσα από τις ανιχνευτικές διατάξεις στην Πυλαία Απεικόνιση. Επίσης, έγινε μία σύντομη εισαγωγή στην Ακτινοθεραπεία και ειδικότερα, στην Πυλαία Απεικόνιση.

Ύστερα, περιγράφηκαν η δομή και οι αρχές λειτουργίας διαφόρων συστημάτων Πυλαίας Απεικόνισης. Η μελέτη επικεντρώθηκε στα συστήματα AMFPI έμμεσης ανίχνευσης, στα οποία εφαρμόστηκε η Θεωρία Γραμμικών Συστημάτων για τη μελέτη του σήματος και του δημιουργούμενου θορύβου, δηλαδή τα μεγέθη που καθορίζουν την ποιότητα εικόνας. Η μελέτη αυτή, αφορά όλα τα στάδια του συστήματος AMFPI EPID έμμεσης ανίχνευσης.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εφαρμογή αυτή, αρχικά το υπό εξέταση σύστημα εκφράστηκε ως ένα σύνολο αλληλοδιαδοχικών σταδίων, έτσι ώστε να μπορεί να μελετηθεί με χρήση της Θεωρίας Γραμμικών Συστημάτων. Ύστερα, έγιναν προσομοιώσεις τύπου Monte Carlo (MC) σε κατάλληλο περιβάλλον λογισμικού (το οποίο λειτουργεί με χρήση αλγορίθμων που ονομάζονται Penelope), όσον αφορά το στάδιο μεταφοράς ενέργειας από μονοενεργειακή δέσμη Πυλαίας Απεικόνισης στον ανιχνευτή του συστήματος.

Τα δεδομένα των προσομοιώσεων επεξεργάστηκαν κατάλληλα και υπολογίστηκε η μέση τιμή του σήματος και το φάσμα ισχύος θορύβου (NPS) στην έξοδο του σταδίου του ανιχνευτή/μετατροπέα του συστήματος. Τα μεγέθη αυτά μάλιστα, υπολογίστηκαν διαδοχικά και στα επόμενα στάδια, μέχρι την έξοδο του συστήματος. Η εφαρμογή, πραγματοποιήθηκε για τιμές ενέργειας προσπίπτοντων φωτονίων ακτίνων X ίσες με 1, 2, 4 και 8 MeV και πάχη φωσφόρου του μετατροπέα 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τα δύο προαναφερθέντα εξεταζόμενα μεγέθη είναι τα εξής:

A.) Μέση τιμή του σήματος εξόδου:

Όσον αφορά τη μέση τιμή του σήματος, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για δεδομένο πάχος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ του ανιχνευτή/μετατροπέα, η μέση τιμή του σήματος εξόδου του συστήματος αυξάνει με αύξηση της ενέργειας των προσπίπτοντων φωτονίων. Αυτό, για τιμές ενέργειας προσπίπτοντων φωτονίων μεγαλύτερες των 1.022 MeV είναι αναμενόμενο με βάση τη θεωρία: Η αλληλεπίδραση ακτινοβολίας-ύλης γίνεται στις υψηλές αυτές τιμές ενέργειας μέσω του φαινομένου της δίδυμης γένεσης περισσότερο και όχι τόσο μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου ή της σκέδασης Compton. Όμως, το φαινόμενο δίδυμης γένεσης είναι το μόνο του οποίου η πιθανότητα αλληλεπίδρασης ανά μονάδα διαδρομής της ακτινοβολίας, αυξάνει με την αύξηση της ενέργειας της ακτινοβολίας [19]. Η αύξηση αυτή, σημαίνει μεγαλύτερη μέση τιμή σήματος στην έξοδο του μετατροπέα και τελικά, στην τελική έξοδο του συστήματος.

Επίσης, για δεδομένη τιμή ενέργειας των προσπίπτοντων φωτονίων, η μέση τιμή του σήματος εξόδου του συστήματος αυξάνει με αύξηση του πάχους του φωσφόρου του μετατροπέα. Αυτό είναι απολύτως λογικό, αφού όσο περισσότερο διάστημα διανύσει η ακτινοβολία στην ύλη, τόσο πιο πιθανή είναι και η αλληλεπίδραση. Ωστόσο, οι διαφοροποιήσεις στη μέση τιμή του σήματος για τις χαμηλότερες εξεταζόμενες τιμές ενέργειας προσπίπτοντων φωτονίων 1 MeV και 2 MeV, δεν είναι τόσο σημαντικές με την αλλαγή του πάχους φωσφόρου.

B.) Φάσμα ισχύος θορύβου (NPS) στην έξοδο του συστήματος:

Όσον αφορά το φάσμα ισχύος θορύβου (NPS), τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για δεδομένο πάχος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ στον ανιχνευτή/μετατροπέα, το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του συστήματος αυξάνει με αύξηση της ενέργειας των προσπίπτοντων φωτονίων.

Επίσης, για δεδομένη τιμή ενέργειας των προσπίπτοντων φωτονίων, το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του συστήματος αυξάνει με αύξηση του πάχους του φωσφόρου. Ακόμα, σημειώνεται ότι οι διαφοροποιήσεις στο φάσμα ισχύος θορύβου για τις χαμηλότερες εξεταζόμενες τιμές ενέργειας προσπίπτοντων φωτονίων 1 MeV και 2 MeV, δεν είναι τόσο σημαντικές με την αλλαγή του πάχους φωσφόρου.

Σημειώνεται ακόμα, ότι το φάσμα ισχύος θορύβου στην έξοδο του συστήματος για δεδομένες διαστάσεις φωτοδιόδων, είναι ανάλογο του τετραγώνου των διαστάσεων (δηλαδή ανάλογο του εμβαδού επιφάνειας) των εικονοστοιχείων.

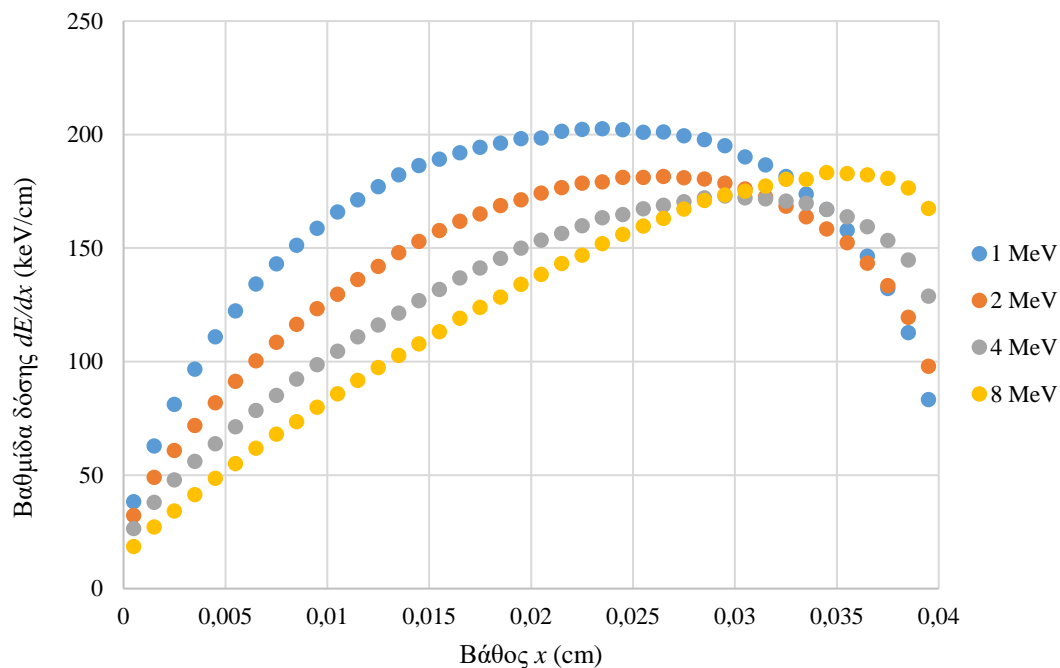
Αναφορές - Πηγές

- [1] Καλύβας Ν. (2020): “Σημειώσεις μαθήματος Επιστήμη Δημιουργίας Εικόνας”, *Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Μηχανικών Βιοϊατρικής*.
- [2] NHS (2020): “Radiotherapy - Overview”, *Crown*,
<https://www.nhs.uk/conditions/radiotherapy/what-happens/> [πρόσβαση 31/03/2022].
- [3] Wong J.W. (2013): “Electronic Portal Imaging Devices (EPID)”, *In: Brady L.W., Yaeger T.E. (eds) Encyclopedia of Radiation Oncology. Springer, Berlin, Heidelberg.*
doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-85516-3_33 [πρόσβαση 01/04/2022].
- [4] Langmack K.A. (2001): “Portal imaging”, *Br. J. Radiol.*, vol. 74 (885), pp 789-804.
doi: <https://doi.org/10.1259/bjr.74.885.740789> [πρόσβαση 01/04/2022].
- [5] Valais I. G., Xydias P. C. (2010): “Detectors for Imaging in Radiation Therapy”, *e-Journal of Science & Technology (e-JST)*, vol. 5 (2), pp 75-86.
http://ejst.uniwa.gr/issues/issue_15/Valais_15.pdf [πρόσβαση 02/04/2022].
- [6] El-Mohri Y., Jee K. W., Antonuk L. E., Maolinbay M. and Zhao Q. (2001): “Determination of the detective quantum efficiency of a prototype, megavoltage indirect detection, active matrix flat-panel imager”, *Med. Phys.*, vol. 28 (12), pp 2538-2550.
doi: <https://doi.org/10.1118/1.1413516> [πρόσβαση 06/04/2022].
- [7] Bissonnette J. P., Cunningham I. A. and Munro P. (1997): “Optimal phosphor thickness for portal imaging”, *Med. Phys.*, vol. 24 (6), pp 803-814.
doi: <https://doi.org/10.1118/1.598002> [πρόσβαση 06/04/2022].
- [8] Gorokhova E. I., Demidenko V. A., Mikhlin S.B., Rodnyi P.A., and van Eijk C.W.E. (2005): “Luminescence and scintillation properties of Gd₂O₂S:Tb,Ce ceramics”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52 (6), pp 3129-3132.
doi: <https://doi.org/10.1109/TNS.2005.862827> [πρόσβαση 06/04/2022].
- [9] Nagarkar V. V., Gupta T. K., Miller S.R., Klugerman Y., Squillante M. R., and Entine G. (1998): “Structured CsI(Tl) scintillators for X-ray imaging applications”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 45 (3), pp 492-496.
doi: <https://doi.org/10.1109/23.682433> [πρόσβαση 06/04/2022].
- [10] Salvat F. (2015): “PENELOPE: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport”, *OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France*.
- [11] Sempau J., Acosta E., Baró J., Fernández-Varea J. M. and Salvat F. (1997): “An algorithm for Monte Carlo simulation of coupled electron-photon transport”, *Nucl. Instrum. Meth. B*, vol. 132 (3), pp. 377-390.
doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(97\)00414-X](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(97)00414-X) [πρόσβαση 10/05/2022].
- [12] Baró J., Sempau J., Fernández-Varea J. M. and Salvat F. (1995): “PENELOPE: An algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter”, *Nucl. Instr. and Meth. B*, vol. 100 (1), pp. 31-46.
doi: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)00349-5](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)00349-5) [πρόσβαση 10/05/2022].
- [13] Sempau J., Badal A. and Brualla L. (2011): “A PENELOPE-based system for the automated Monte Carlo simulation of clinacs and voxelized geometries--application to far-from-axis fields”, *Med. Phys.*, vol. 38 (11), pp. 5887-5895.
doi: <https://doi.org/10.1118/1.3643029> [πρόσβαση 10/05/2022].
- [14] Michail C. M., Spyropoulou V. A., Fountos G. P., Kalyvas N. I., Valais I. G., Kandarakis I. S. and Panayiotakis G. S. (2011): “Experimental and Theoretical Evaluation of a High Resolution CMOS Based Detector Under X-Ray Imaging Conditions”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 58 (1), pp. 314-322.
doi: <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2094206> [πρόσβαση 12/05/2022].
- [15] Kandarakis I., Cavouras D., Panayiotakis G. S. and Nomicos C. D. (1997): “Evaluating x-ray detectors for radiographic applications: A comparison of ZnSCdS:Ag with Gd₂O₂S:Tb and Y₂O₂S:Tb screens”, *Phys. Med. Biol.*, vol. 42, pp. 1351-1373.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/> [πρόσβαση 12/05/2022].
- [16] Nishikawa R. M. and Yaffe Martin J (1990): “Model of the spatial-frequency-dependent detective quantum efficiency of phosphor screens”, *Medical Physics*, vol. 17 (5), pp. 894-904.
doi: <https://doi.org/10.1118/1.596583> [πρόσβαση 19/05/2022].
- [17] Michail C. M., Toutountzis A., Valais I., Seferis I., Georgousis M., Fountos G., Kandarakis I. and Panayiotakis G. S. (2010): “Luminescence Efficiency of Gd₂O₂S:Eu Powder Phosphors as X-ray to Light Converter”, *e-Journal of Science & Technology (e-JST)*, vol. 2 (5), pp 25-32.
http://ejst.uniwa.gr/issues/issue_15/Michail_15.pdf [πρόσβαση 12/05/2022].

- [18] Zhao W. and Rowlands J. A. (1997): “Digital radiology using active matrix readout of amorphous selenium: Theoretical analysis of detective quantum efficiency”, *Medical Physics*, vol. 24 (12), pp. 1819-1833. doi: <https://doi.org/10.1118/1.598097> [πρόσβαση 27/05/2022].
- [19] Γεωργίου Ε., Γιακουμάκης Ε., Δημητρίου Π., Καραϊσκος Π., Κόττου Σ., Λουίζη Α., Μαλαμίτση Ι. και Παπαγιάννης Π. (2008): “Ιατρική Φυσική: Διαγνωστικές και Θεραπευτικές Εφαρμογές των Ακτινοβολιών”, *Εκδόσεις Π. Χ. Πασχαλίδης, Αθήνα*.

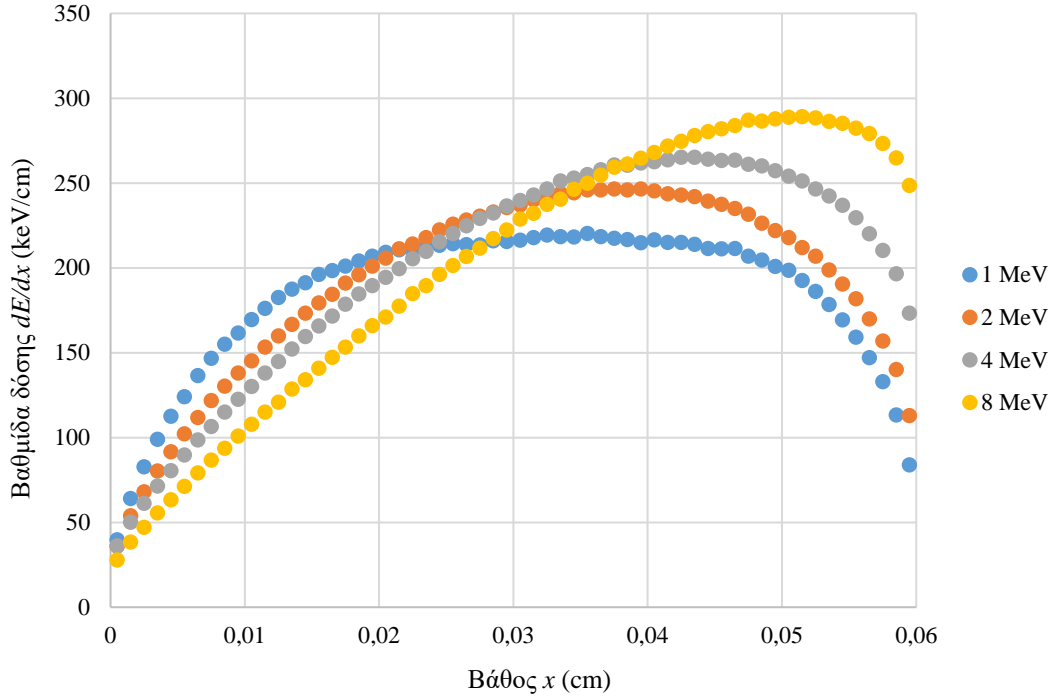
Παράρτημα 1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων αλληλεπίδρασης προσπίπτοντος φωτονίου με το στρώμα φωσφόρου

Ύστερα από την προσομοίωση Monte Carlo που πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο Penelope και την επεξεργασία που εφαρμόστηκε σε λογισμικό επεξεργασίας υπολογιστικών φύλλων (χρησιμοποιήθηκε το Microsoft Excel), προέκυψαν από 16 δοκιμές αποτελέσματα που ομαδοποιήθηκαν σε 4 κατηγορίες, μία για κάθε πάχος στρώματος φωσφόρου. Σε κάθε κατηγορία πάχους φωσφόρου από τα πάχη 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm, συγχωνεύθηκαν τα αποτελέσματα για τις 4 διαφορετικές τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη, δηλαδή 1, 2, 4 και 8 MeV. Τα αποτελέσματα αυτά, αποδόθηκαν στα διαγράμματα που παρουσιάζονται στις Εικόνες Π1.1, Π1.2, Π1.3 και Π1.4:

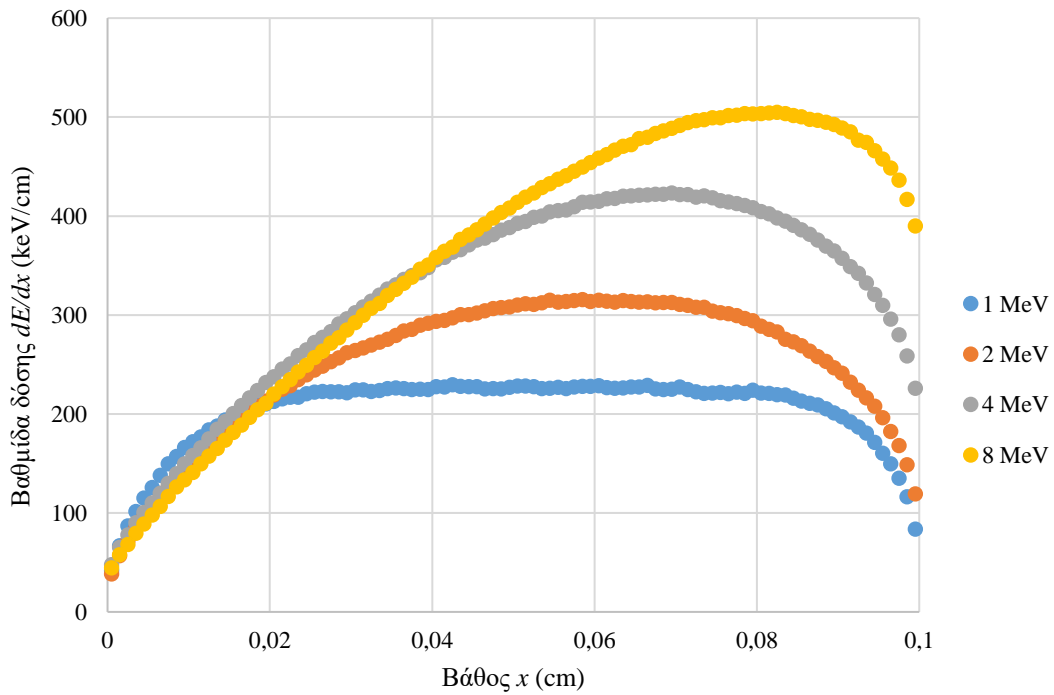


Εικόνα Π1.1: Βαθμίδα δόσης μεταφερόμενης στον φώσφορο $Gd_2O_3:S:Tb$ πάχους 0.04 cm, για διαφορετικές τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου ίσες με 1, 2, 4 και 8 MeV.

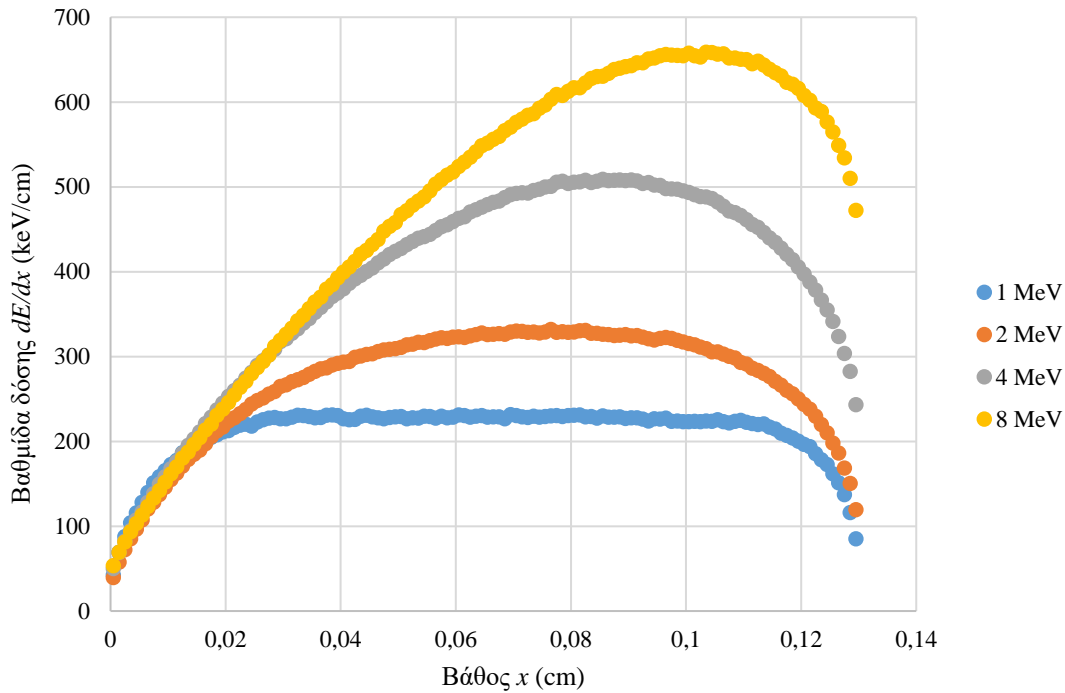
ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΠΥΛΑΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΣΩ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



Εικόνα Π1.2: Βαθμίδα δόσης μεταφερόμενης στον φώσφορο $Gd_2O_2S:Tb$ πάχους 0.06 cm, για διαφορετικές τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου ίσες με 1, 2, 4 και 8 MeV.



Εικόνα Π1.3: Βαθμίδα δόσης μεταφερόμενης στον φώσφορο $Gd_2O_2S:Tb$ πάχους 0.10 cm, για διαφορετικές τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου ίσες με 1, 2, 4 και 8 MeV.



Εικόνα Π1.4: Βαθμίδα δόσης μεταφερόμενης στον φώσφορο $Gd_2O_2S:Tb$ πάχους 0.13 cm , για διαφορετικές τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου ίσες με $1, 2, 4$ και 8 MeV .

Εφαρμόζοντας τις προσαρμογές μονάδων που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 3.2, από τις καμπύλες των προσομοιώσεων προκύπτουν από τη σχέση (3.5) αποτελέσματα για τη συνολική απορροφούμενη ενέργεια στον φώσφορο σε μονάδες ενέργειας keV. Αυτές, δίνονται στον συγκεντρωτικό Πίνακα Π1.1:

Πίνακας Π1.1: Συνολική απορροφούμενη ενέργεια στον φώσφορο για τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου $1, 2, 4$ και 8 MeV , για διαφορετικά πάχη φωσφόρου $0.04, 0.06, 0.10$ και 0.13 cm , όπως προέκυψαν από τις δοκιμές τύπου Monte Carlo και την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων τους.

Πάχος φωσφόρου x (cm)	1 MeV Απορροφούμενη E (keV)	2 MeV Απορροφούμενη E (keV)	4 MeV Απορροφούμενη E (keV)	8 MeV Απορροφούμενη E (keV)
0.04	6.48	5.65	5.19	4.97
0.06	11.01	11.50	12.03	12.08
0.10	20.26	24.95	31.99	35.88
0.13	27.27	35.09	50.36	61.46

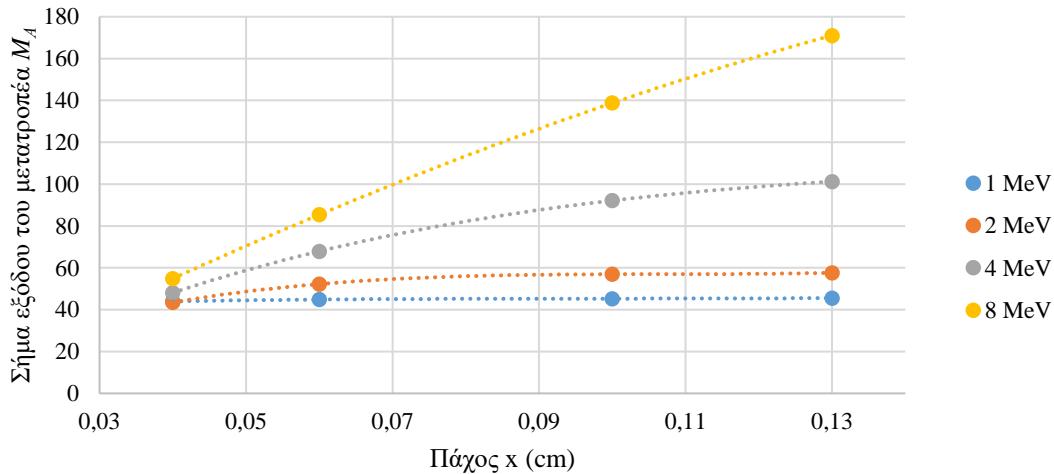
Παράρτημα 2: Αποτελέσματα για τη μέση τιμή σήματος M_A στην έξοδο του μετατροπέα

Έτσι, με τη βοήθεια των δύο σχέσεων (3.17) και (3.19), προκύπτει ο ακόλουθος Πίνακας Π2.1, ο οποίος δίνει τη μέση τιμή σήματος εξόδου του μετατροπέα, για προσπίπτον φωτόνιο ενέργειας 1, 2, 4 και 8 MeV, για διαφορετικά πάχη φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm.

Πίνακας Π2.1: Η μέση τιμή σήματος εξόδου του μετατροπέα, για προσπίπτον φωτόνιο ενέργειας 1, 2, 4 και 8 MeV, για διαφορετικά πάχη φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm.

x (cm)	1 MeV M_A	2 MeV M_A	4 MeV M_A	8 MeV M_A
0.04	43.96	43.53	48.11	54.90
0.06	44.84	52.53	67.90	85.38
0.10	45.28	56.94	92.14	138.78
0.13	45.54	57.62	101.27	171.04

Οι μέσες τιμές σήματος εξόδου του μετατροπέα ως συνάρτηση του πάχους του για τα διαφορετικά πάχη φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm που αναγράφονται στον Πίνακα Π2.1, παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα στην Εικόνα Π2.1 σε τέσσερις διαφορετικές καμπύλες, μία καμπύλη για καθεμία από τις τιμές ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου ακτίνων X 1, 2, 4 και 8 MeV.



Εικόνα Π2.1: Η μέση τιμή σήματος εξόδου του μετατροπέα ως συνάρτηση του πάχους φωσφόρου, για προσπίπτον φωτόνιο ενέργειας 1, 2, 4 και 8 MeV.

Επισημαίνεται ότι οι συντεταγμένες που υπάρχουν διαθέσιμες για κάθε περίπτωση ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου είναι μόνο τέσσερις, δηλαδή για τέσσερα διαφορετικά πάχη. Ωστόσο, στην Εικόνα Π2.1, για λόγους ευκολίας ανάγνωσης και ερμηνείας, έχουν προσαρμοστεί κατάλληλα καμπύλες με διακεκομμένες γραμμές διαφορετικών χρωμάτων η καθεμία, οι οποίες υποδεικνύουν τις αναμενόμενες τιμές σήματος εξόδου του μετατροπέα και για τα ενδιάμεσα πάχη στρώματος φωσφόρου.

Παράρτημα 3: Υπολογισμός της παραμέτρου $L_k(u)$ στο MS Excel

Σύμφωνα με τη σχέση (3.24), η παράμετρος $L_k(u)$ είναι:

$$L_k(u) = \frac{\tau\rho_i [b(u) + \tau\rho_o] e^{b(u)x_k} + \tau\rho_i [b(u) - \tau\rho_o] e^{-b(u)x_k}}{[b(u) + \tau\rho_o][b(u) + \tau\rho_i] e^{b(u)T} - [b(u) - \tau\rho_o][b(u) - \tau\rho_i] e^{-b(u)T}} \quad (\text{Π3.1})$$

Πρόκειται λοιπόν για μία συνάρτηση με δύο ανεξάρτητες μεταβλητές: Το βάθος x_k μέσα στον φώσφορο και τη χωρική συχνότητα u .

Για τον υπολογισμό της για όλα τα ζεύγη τιμών των δύο ανεξάρτητων μεταβλητών, φτιάχνουμε στο MS Excel έναν πίνακα, ο οποίος στην οριζόντια διάσταση έχει τον άξοντα αριθμό k και το βάθος x_k και στην κάθετη διάσταση έχει τη χωρική συχνότητα u και τη συνάρτησή της $b(u)$, τμήμα του οποίου δείχνει η Εικόνα Π3.1 (σημειώνεται ότι ο πίνακας ολόκληρος είναι πολύ μεγαλύτερων διαστάσεων, αλλά η λογική είναι ακριβώς η ίδια):

		k	1	2	3	4	5
		xk	0,0005	0,0015	0,0025	0,0035	0,0045
u	b	dE/dx	38,174606	62,7683	81,15104	96,68542	110,9302
1	220,28962		4,155E-05	9,29E-05	0,000149	0,000212	0,000285
2	220,55828		4,114E-05	9,2E-05	0,000147	0,00021	0,000283
3	221,00531		4,047E-05	9,05E-05	0,000145	0,000207	0,000278
4	221,62963		3,956E-05	8,85E-05	0,000142	0,000202	0,000272
5	222,42977		3,841E-05	8,59E-05	0,000138	0,000196	0,000265
6	223,40381		3,707E-05	8,29E-05	0,000133	0,00019	0,000256
7	224,54951		3,554E-05	7,95E-05	0,000128	0,000182	0,000246
8	225,86425		3,387E-05	7,58E-05	0,000122	0,000174	0,000235
9	227,34509		3,207E-05	7,18E-05	0,000115	0,000165	0,000223
10	228,98882		3,019E-05	6,76E-05	0,000109	0,000155	0,00021

Εικόνα Π3.1: Τμήμα φύλλου MS Excel που χρησιμοποιήθηκε για υπολογισμό της παραμέτρου $L_k(u)$.

Ξεκινάμε λοιπόν, υπολογίζοντας για κάθε χωρική συχνότητα u σε διπλανή της στήλη την παράμετρο $b(u)$ εύκολα και σημειώνουμε οριζόντια σε μία γραμμή κάτω από τη γραμμή αρίθμησης των μετρήσεων, για κάθε μέτρηση k το αντίστοιχο βάθος x_k .

Συνεχίζουμε, γραφοντας στο κελί $(k,u) = (1,1)$ τη συνάρτηση που δίνει την παράμετρο $L_k(u)$, σύμφωνα με τη σχέση (Π3.1).

Σε αυτήν την έκφραση της συνάρτησης, προσέχουμε στα σημεία όπου εμπλέκεται η παράμετρος $b(u)$ να βάλουμε μπροστά από την αρίθμηση των στηλών το σύμβολο \$, ώστε όταν «τραβήξουμε» το κελί δεξιά σε μία οριζόντια γραμμή για να πάρουν όλα τα κελιά μίας σειράς τη συνάρτηση, να εξακολουθήσει να παίρνει από τη στήλη που έχει τις τιμές της $b(u)$ και να μην διαβάσει από άλλη διπλανή στήλη και βγάλει λάθος αποτελέσματα. Έτσι, αν για παράδειγμα οι τιμές της $b(u)$ βρίσκονται στη στήλη B του φύλλου και η πρώτη της τιμή είναι στη γραμμή 4, όπου εμπλέκεται η παράμετρος $b(u)$, στην αρχική συνάρτηση θα γράψουμε \$B4 και έτσι, θα «κλειδώσουμε» τη στήλη B και στα διπλανά κελιά που θα εφαρμοστεί η συνάρτηση. Ωστόσο, δεν γράφουμε \$B\$4, διότι αυτό θα «κλειδώνει» και τη γραμμή 4, κάτι που δεν

θέλουμε να γίνει όταν «τραβήξουμε» τη συνάρτηση στα κάτω κελιά, μέχρι την τελευταία χωρική συχνότητα u .

Αντίστοιχα, στην έκφραση της συνάρτησης προσέχουμε στα σημεία όπου εμπλέκεται η παράμετρος k να βάλουμε μπροστά από την αρίθμηση των σειρών το σύμβολο \$, προκειμένου να «κλειδώσουμε» τη γραμμή αυτή όταν «τραβήξουμε» το κελί κάτω σε μία στήλη. Έτσι, αν οι τιμές k βρίσκονται στη γραμμή 2 του φύλλου και η πρώτη τιμή βρίσκεται στη στήλη D, θα γράψουμε στον τύπο της συνάρτησης D\$2 και έτσι, θα «κλειδώσουμε» τη σειρά 2 και στα κάτω κελιά που θα εφαρμοστεί η συνάρτηση.

Αφού περάσουμε λοιπόν τη συνάρτηση σωστά στο πρώτο κελί του πίνακα, έστω D4 σύμφωνα με τον πίνακα που φαίνεται στην Εικόνα Π3.1, «τραβάμε» από το κάτω δεξί μέρος του κελιού όπου ο κέρσορας γίνεται σταυρός, τον κέρσορα κάτω, μέχρι τη μέγιστη χωρική συχνότητα u . Ύστερα, όπως είναι σημαδεμένα όλα τα κελιά της στήλης D, «τραβάμε» πάλι τον κέρσορα τέρμα δεξιά, μέχρι το μέγιστο k . Ένας πίνακας που περιέχει τιμές της συνάρτησης $L_k(u)$ για όλα τα ζεύγη τιμών του πεδίου ορισμού της, είναι πλέον έτοιμος.

Σημειώνεται ότι, υπάρχουν και πολλές σταθερές παράμετροι, τις οποίες «κλειδώνουμε» με το σύμβολο \$ και πριν τη γραμμή όπου τις έχουμε σημειώσει και πριν τη στήλη. Δηλαδή, αν έχουμε σημειώσει μία σταθερά στο κελί A1, στη συνάρτηση σημειώνουμε \$A\$1 και έτσι, «κλειδώνουμε» όταν τραβήξουμε τον κέρσορα και στη στήλη A και στη γραμμή 1.

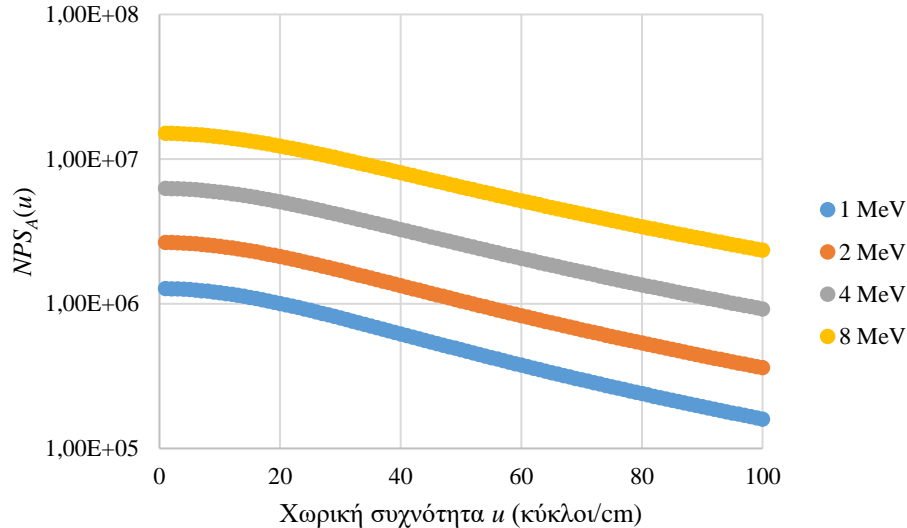
Επίσης, αφού υπολογίσαμε τη συνάρτηση $L_k(u)$, είναι χρήσιμο προκειμένου να υπολογίσουμε τα γινόμενα αυτής με τις τιμές $(dE/dx)_k$ να έχουμε κρατήσει όπως φαίνεται στην Εικόνα Π3.1 μία γραμμή οριζόντια με τις τιμές $(dE/dx)_k$ (φαίνεται κίτρινη). Προκειμένου να γίνει αυτό, αν έχουμε ήδη τα δεδομένα με τις τιμές $(dE/dx)_k$ σε στήλη αντί για γραμμή που θέλουμε, κάνουμε ειδική επικόλληση και επιλέγουμε «Transpose» με tick. Αυτή τη γραμμή, στο κελί που θα εκφράσουμε τη νέα συνάρτηση που θα περιέχει το γινόμενο με τα στοιχεία $L_k(u)$, θα την κλειδώσουμε κατά την ίδια λογική με το σύμβολο \$ μπροστά από τον αριθμό γραμμής, π.χ. αν είναι η γραμμή 3 και πρώτο στοιχείο είναι το D3, θα γράψουμε στη νέα συνάρτηση που υπολογίζουμε D\$3.

Παράρτημα 4: Αποτελέσματα για το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_A(u)$ στην έξοδο του μετατροπέα

Με βάση τις σχέσεις (3.23) και (3.24), υπολογίζονται για κάθε περίπτωση πάχους στρώματος φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm και για κάθε τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV οι καμπύλες NPS ως συναρτήσεις της χωρικής συχνότητας (χρησιμοποιήθηκε και πάλι το Microsoft Excel ως κατάλληλο λογισμικό) και αποδίδονται για λόγους ευκολίας σύγκρισης όλες στην ίδια κλίμακα, στις Εικόνες Π4.1 - Π4.8.

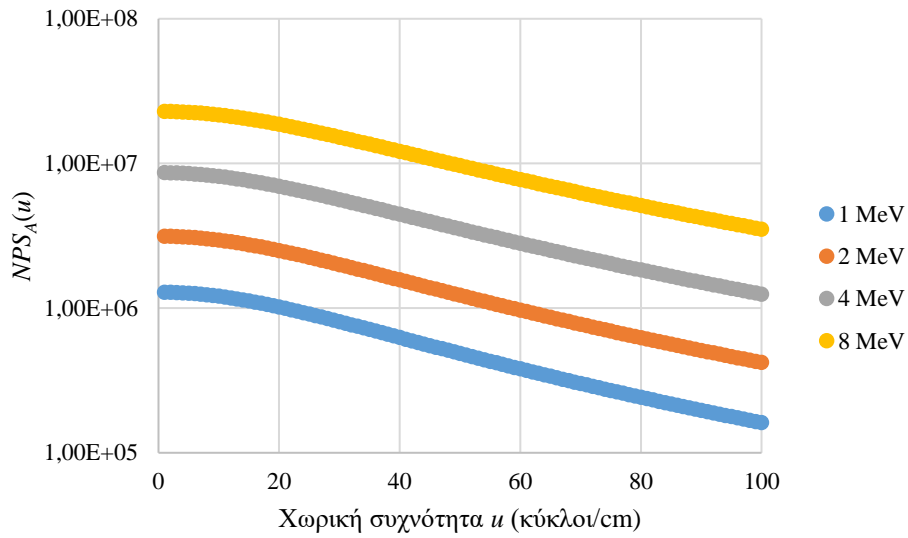
Α.) $NPS_A(u)$ για τις διαφορετικές τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου στο ίδιο διάγραμμα

Σημειώνεται ότι καθεμία από τις Εικόνες Π4.1 – Π4.4 παρουσιάζει στο ίδιο διάγραμμα, τις $NPS_A(u)$ για τις τέσσερις περιπτώσεις διαφορετικών τιμών ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου για ένα συγκεκριμένο πάχος στρώματος φωσφόρου από τα 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm.

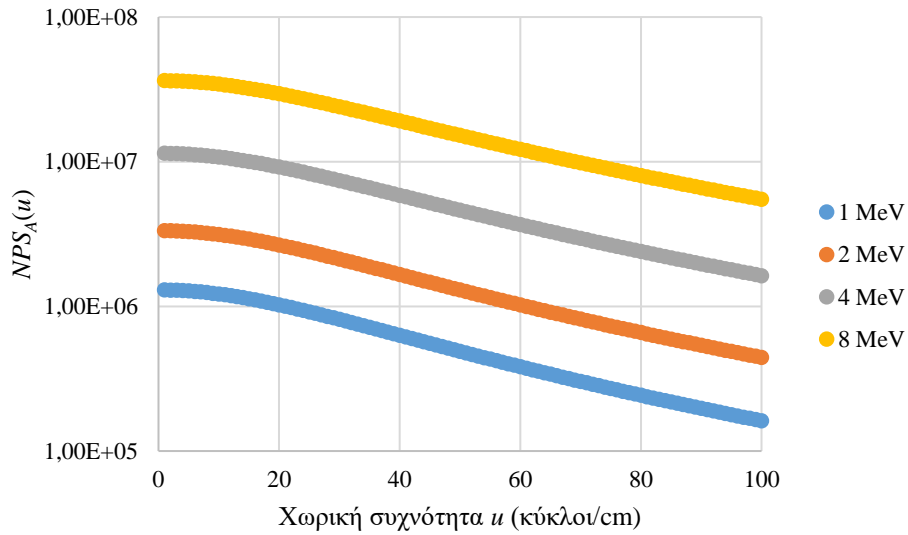


Εικόνα Π4.1: Η NPS_A ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04 cm.

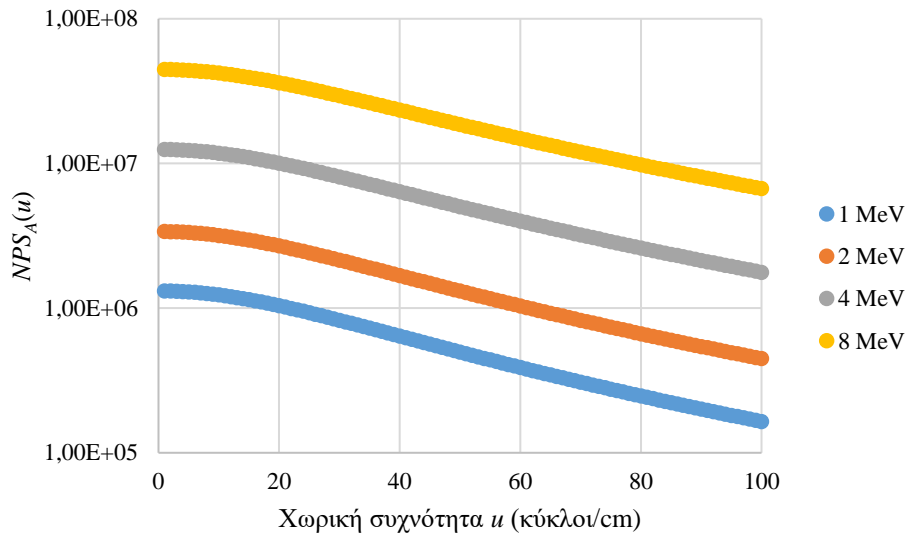
ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΠΥΛΑΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΣΩ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



Εικόνα Π4.2: Η NPS_A ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.06 cm.



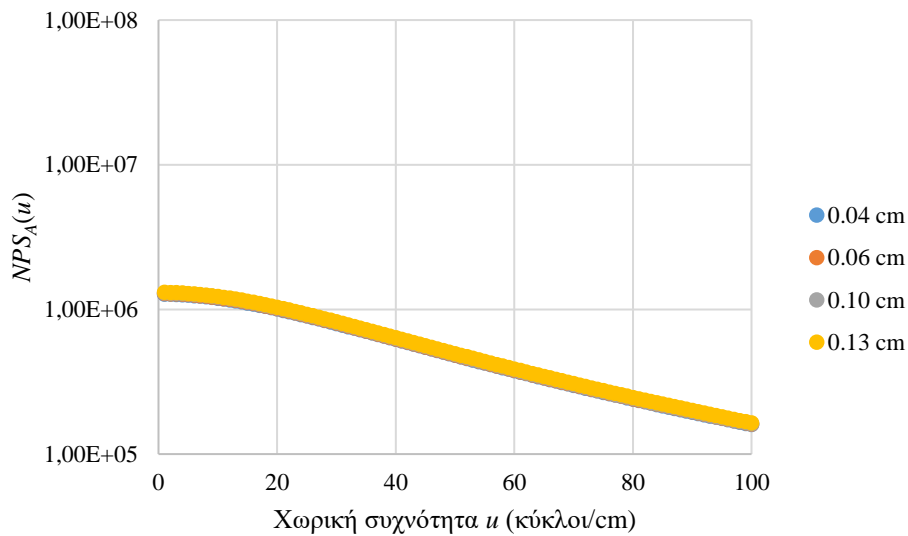
Εικόνα Π4.3: Η NPS_A ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.10 cm.



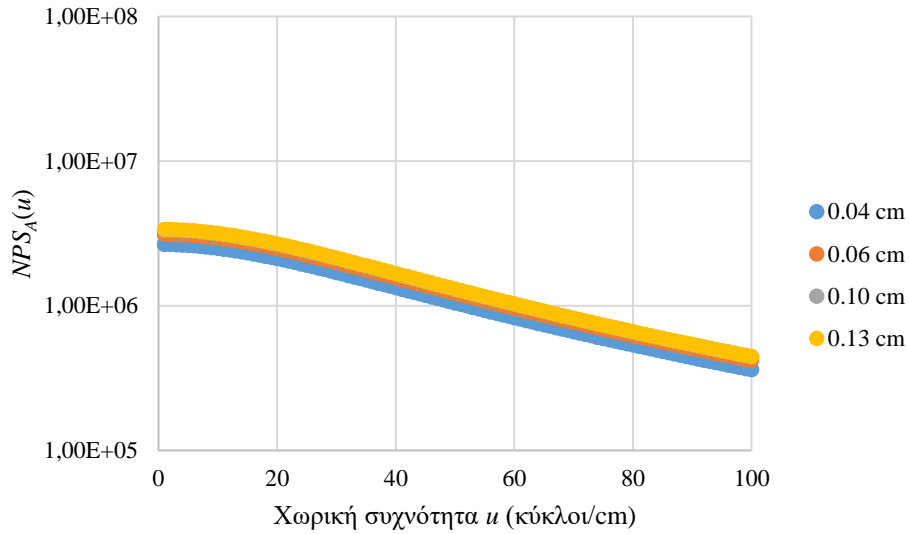
Εικόνα Π4.4: Η NPS_A ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.13 cm.

Β.) $NPS_A(u)$ για τα διαφορετικά πάχη στρώματος φωσφόρου στο ίδιο διάγραμμα

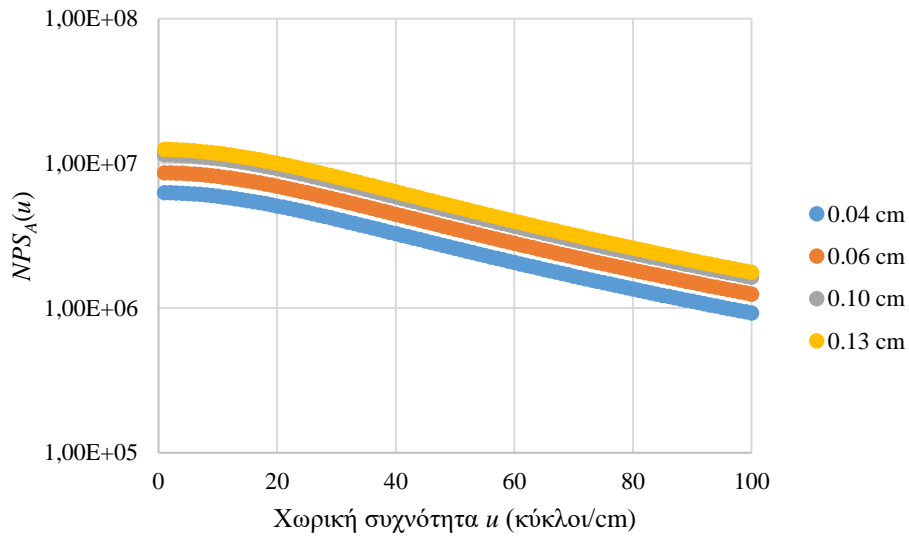
Από διαφορετική σκοπιά, στις Εικόνες Π4.5 - Π4.8 παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα οι $NPS_A(u)$ για τις τέσσερις διαφορετικές τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου κάθε φορά για μία συγκεκριμένη τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου από τις 1, 2, 4 και 8 MeV.



Εικόνα Π4.5: Η NPS_A ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 1 MeV.

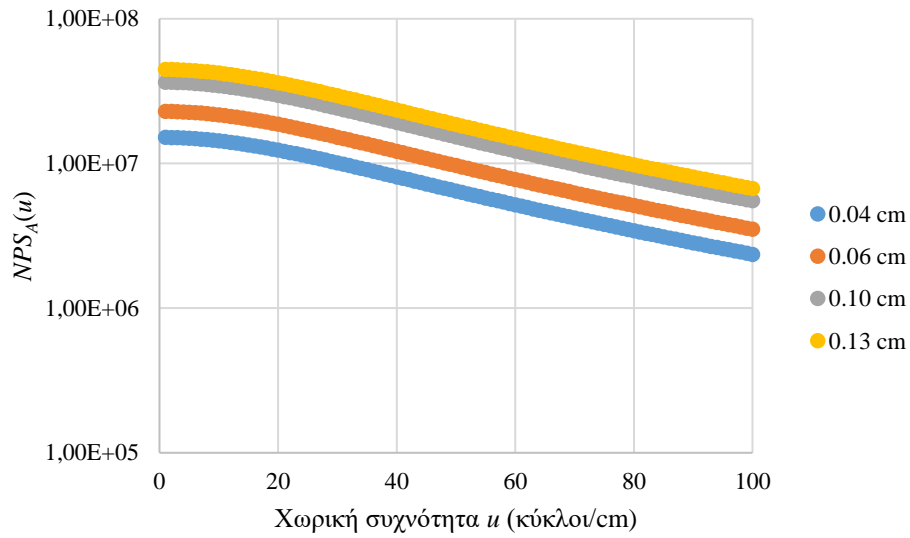


Εικόνα Π4.6: Η NPS_A ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 2 MeV.



Εικόνα Π4.7: Η NPS_A ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 4 MeV.

ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΠΥΛΑΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΣΩ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



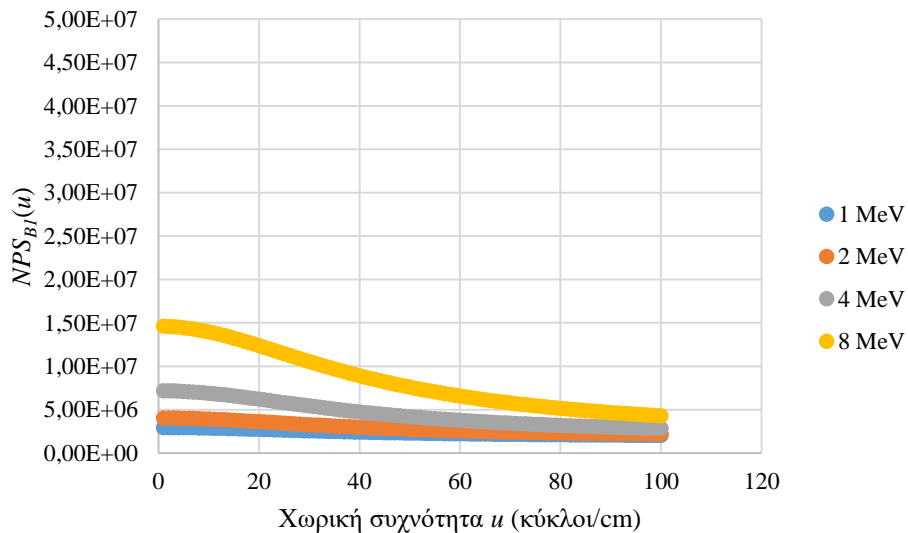
Εικόνα Π4.8: Η NPS_A ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 8 MeV.

Παράρτημα 5: Αποτελέσματα για το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{B1}(u)$ στην έξοδο του σταδίου στοχαστικής ενίσχυσης B_1

Από τις σχέσεις (3.26) και (3.27) υπολογίζονται για κάθε περίπτωση πάχους στρώματος φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm και για κάθε τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV οι καμπύλες του φάσματος ισχύος θορύβου στην έξοδο του σταδίου B_1 NPS_{B1} ως συναρτήσεις της χωρικής συχνότητας (χρησιμοποιήθηκε και πάλι το Microsoft Excel ως κατάλληλο λογισμικό). Αυτές οι καμπύλες, αποδίδονται για λόγους ευκολίας σύγκρισης όλες στην ίδια κλίμακα, στα ακόλουθα διαγράμματα στις Εικόνες Π5.1 - Π5.8.

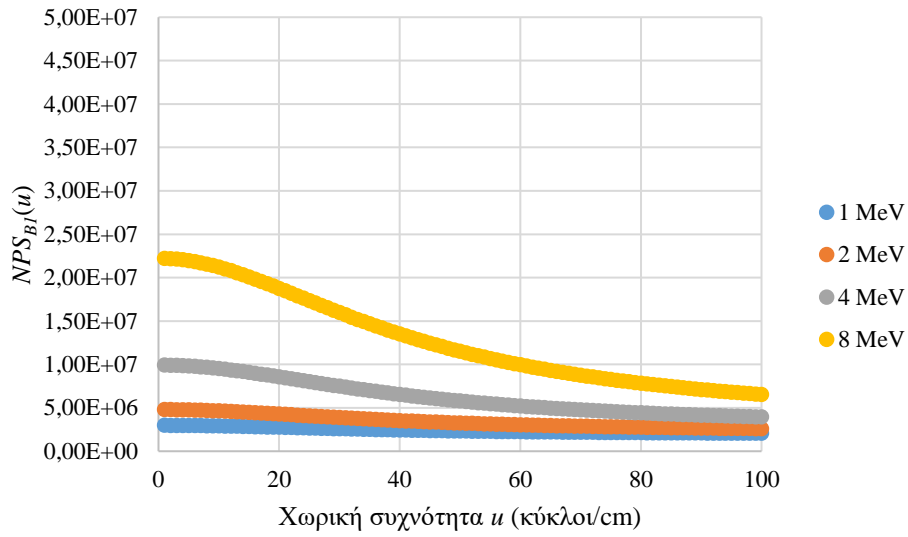
Α.) $NPS_{B1}(u)$ για τις διαφορετικές τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου στο ίδιο διάγραμμα

Καθεμία από τις Εικόνες Π5.1 - Π5.4 παρουσιάζει στο ίδιο διάγραμμα, τις $NPS_{B1}(u)$ για τις τέσσερις περιπτώσεις διαφορετικών τιμών ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου κάθε φορά για ένα συγκεκριμένο πάχος στρώματος φωσφόρου από τα 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm.

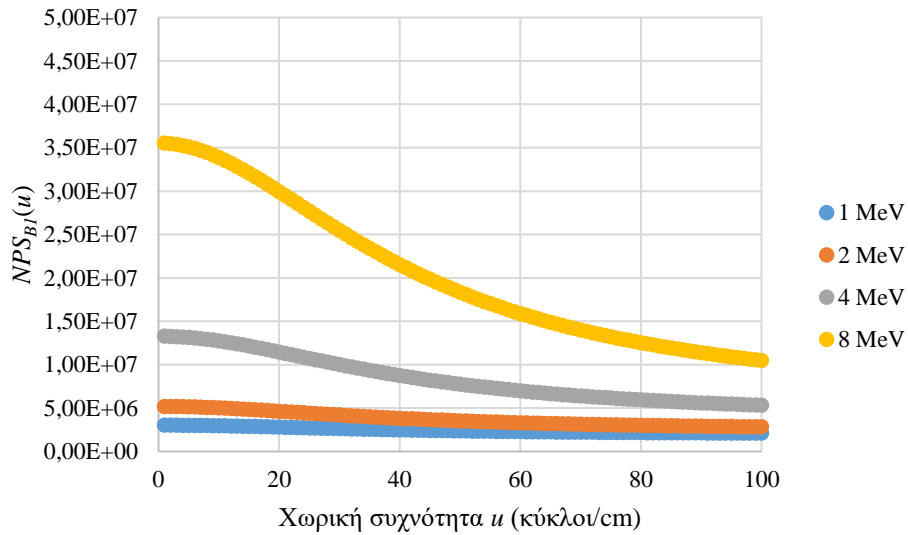


Εικόνα Π5.1: Η NPS_{B1} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04 cm.

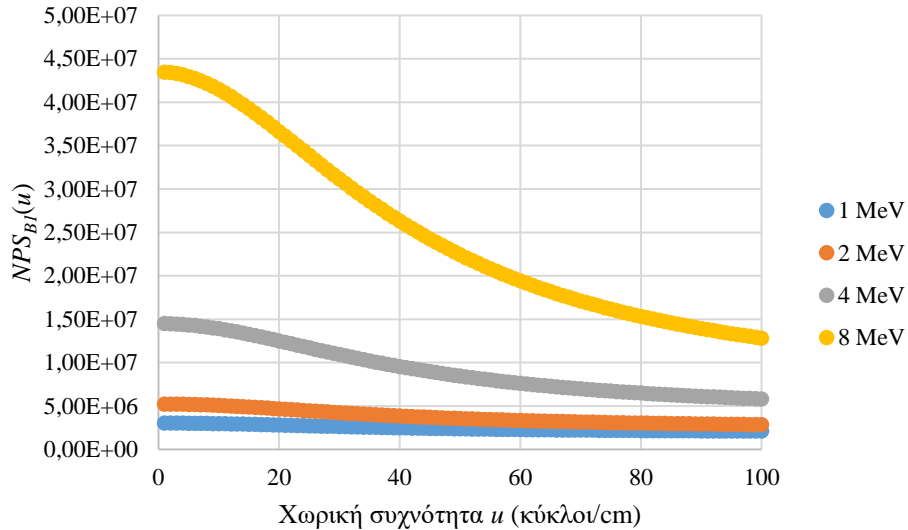
ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΠΥΛΑΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΣΩ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



Εικόνα Π5.2: Η NPS_{B1} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.06 cm.



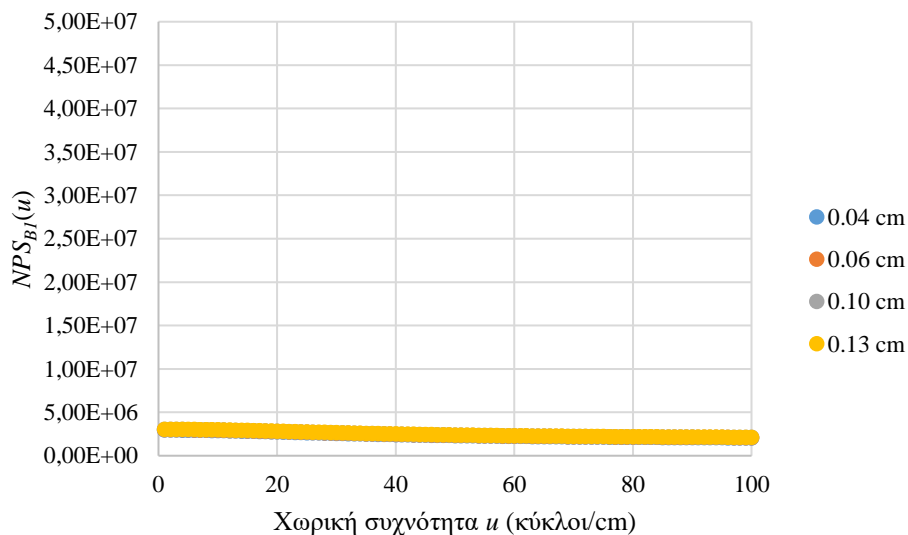
Εικόνα Π5.3: Η NPS_{B1} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.10 cm.



Εικόνα Π5.4: Η NPS_{BI} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.13 cm.

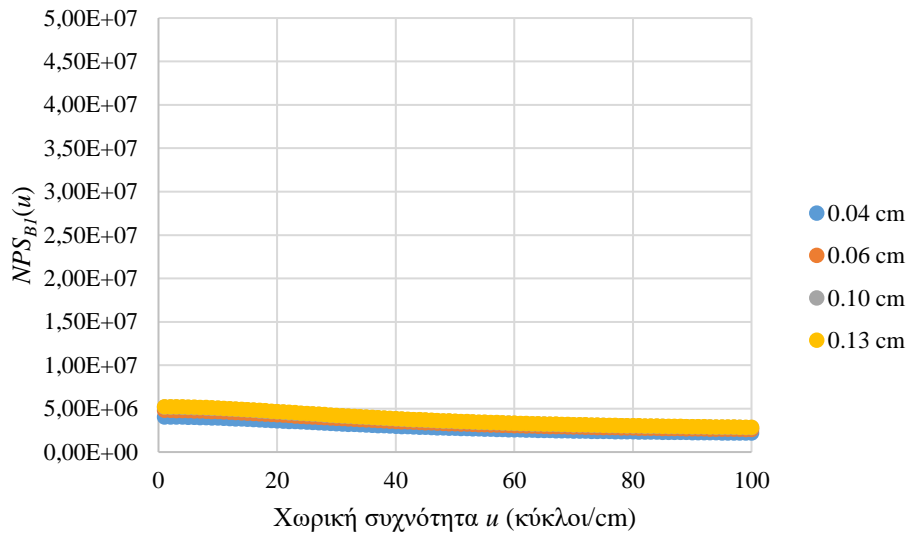
Β.) $NPS_{BI}(u)$ για τα διαφορετικά πάχη στρώματος φωσφόρου στο ίδιο διάγραμμα

Από διαφορετική σκοπιά, στις Εικόνες Π5.5 – Π5.8 παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα οι $NPS_{BI}(u)$ για τις τέσσερις διαφορετικές τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου κάθε φορά για μία συγκεκριμένη τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου από τις 1, 2, 4 και 8 MeV.

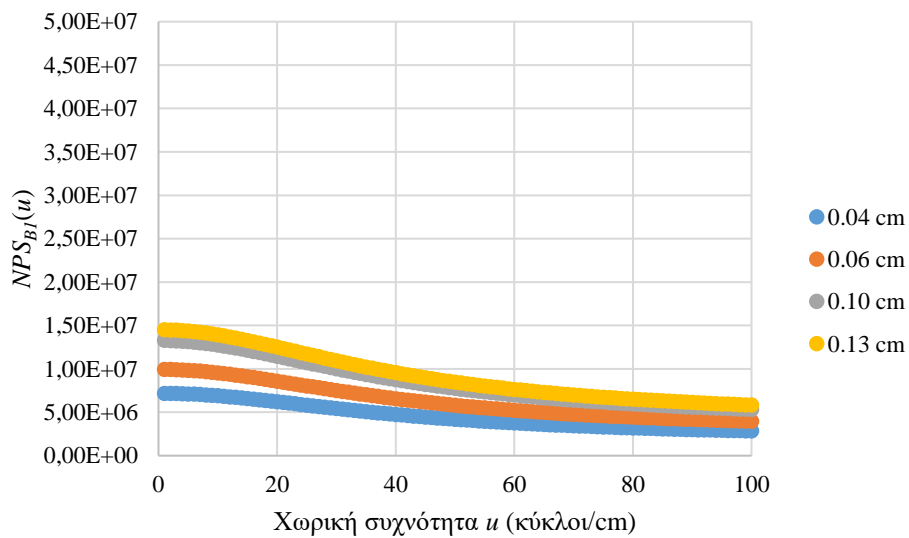


Εικόνα Π5.5: Η NPS_{BI} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 1 MeV.

ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΠΥΛΑΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΣΩ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

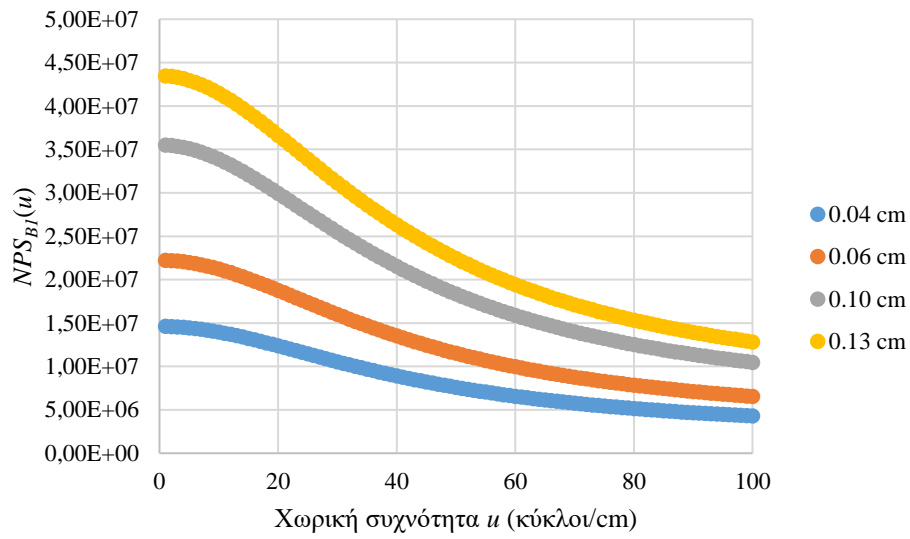


Εικόνα Π5.6: Η NPS_{BI} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 2 MeV.



Εικόνα Π5.7: Η NPS_{BI} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 4 MeV.

ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΠΥΛΑΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΣΩ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



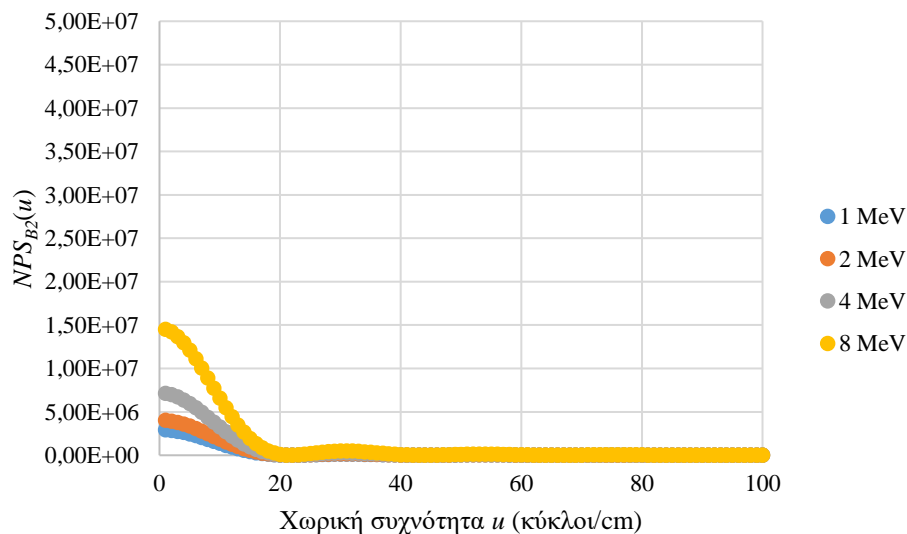
Εικόνα Π5.8: Η NPS_{B1} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 8 MeV.

Παράρτημα 6: Αποτελέσματα για το φάσμα ισχύος θορύβου $NPS_{B_2}(u)$ στην έξοδο του σταδίου καθορισμένης ασάφειας B_2

Από τις σχέσεις (3.28) και (3.29) υπολογίζονται για κάθε περίπτωση πάχους στρώματος φωσφόρου 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm και για κάθε τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV οι καμπύλες του φάσματος ισχύος θορύβου στην έξοδο του σταδίου B_2 NPS_{B_2} ως συναρτήσεις της χωρικής συχνότητας (χρησιμοποιήθηκε και πάλι το Microsoft Excel ως κατάλληλο λογισμικό). Αυτές οι καμπύλες, αποδίδονται για λόγους ευκολίας σύγκρισης όλες στην ίδια κλίμακα, στα ακόλουθα διαγράμματα στις Εικόνες Π6.1 – Π6.8.

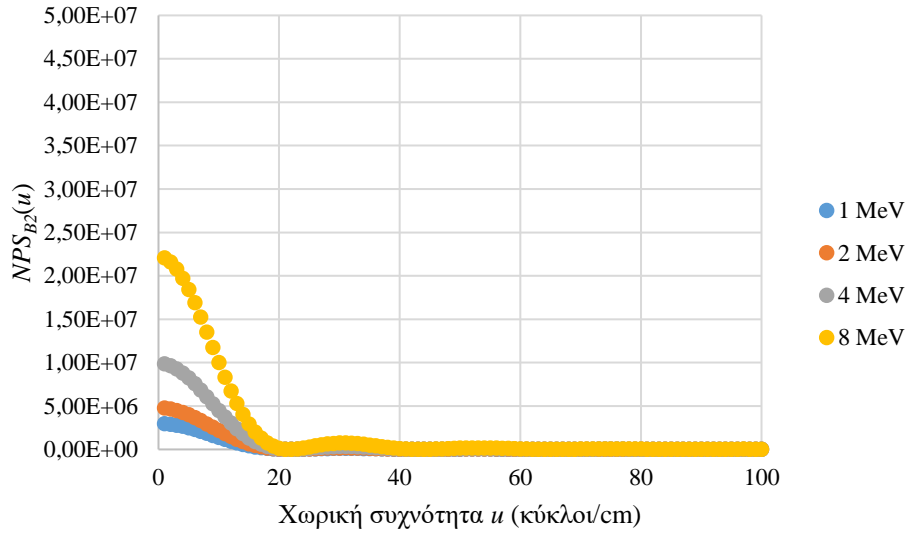
Α.) $NPS_{B_2}(u)$ για τις διαφορετικές τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου στο ίδιο διάγραμμα

Καθεμία από τις Εικόνες Π6.1 - Π6.4 παρουσιάζει στο ίδιο διάγραμμα, τις $NPS_{B_2}(u)$ για τις τέσσερις περιπτώσεις διαφορετικών τιμών ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου, κάθε φορά για ένα συγκεκριμένο πάχος στρώματος φωσφόρου από τα 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm.

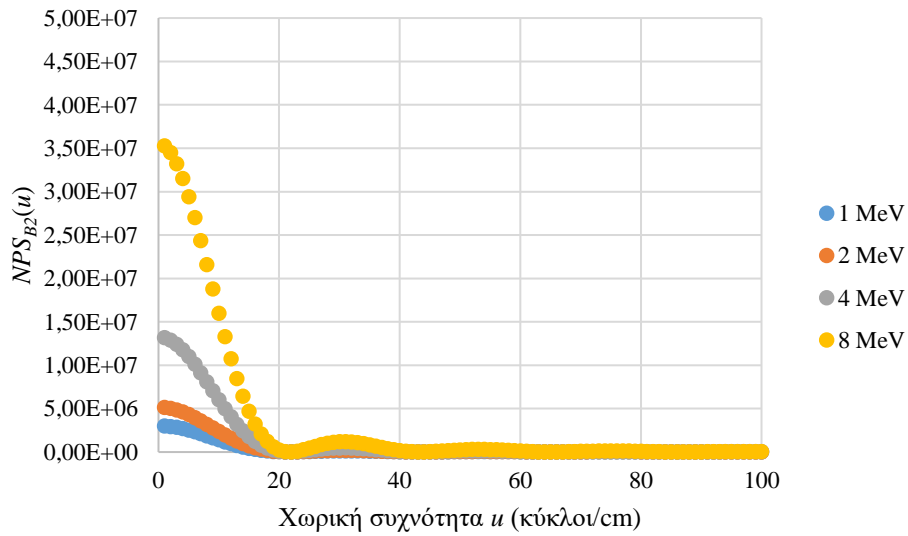


Εικόνα Π6.1: Η NPS_{B_2} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04 cm.

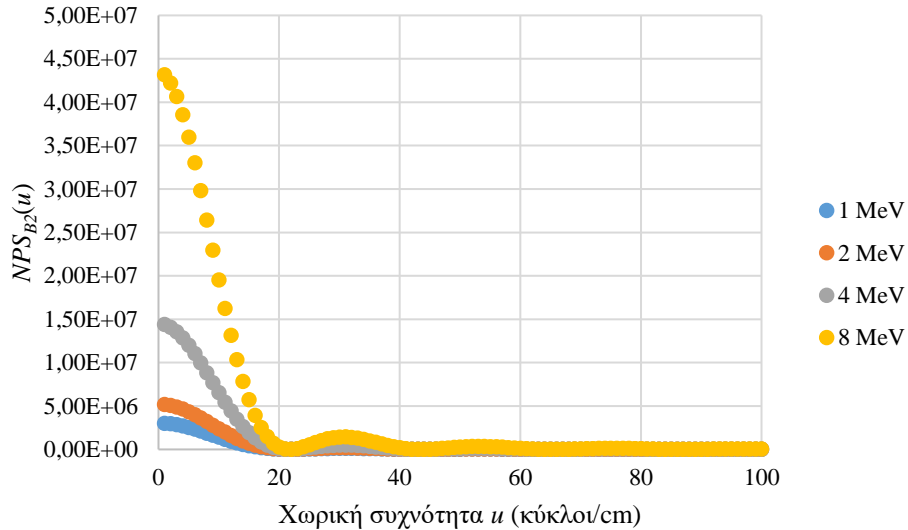
ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΠΥΛΑΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΣΩ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



Εικόνα Π6.2: Η NPS_{B2} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.06 cm.



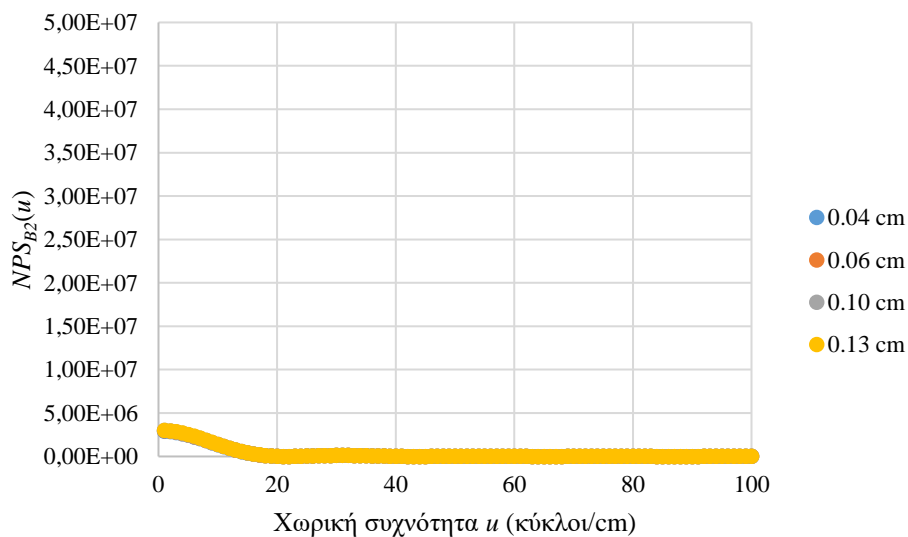
Εικόνα Π6.3: Η NPS_{B2} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.10 cm.



Εικόνα Π6.4: Η NPS_{B2} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου 1, 2, 4 και 8 MeV για πάχος στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.13 cm.

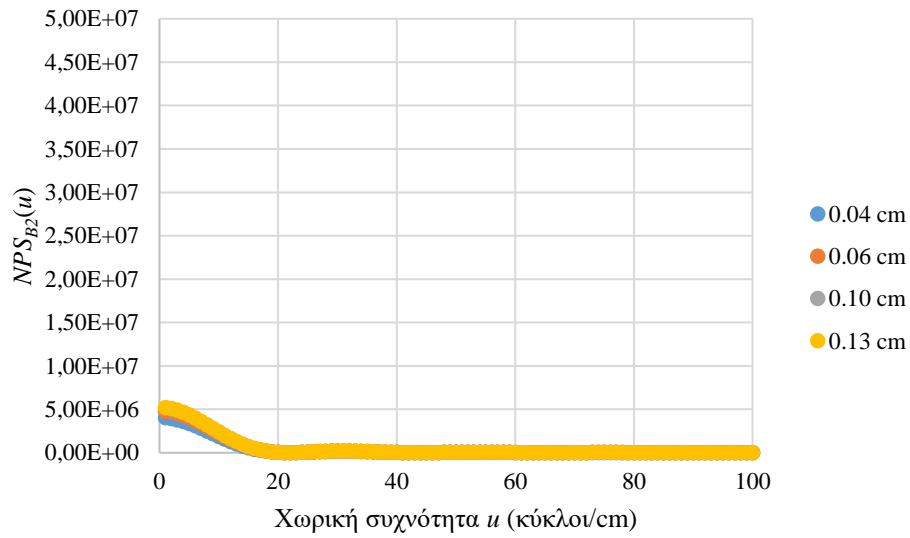
Β.) $NPS_{B2}(u)$ για τα διαφορετικά πάχη στρώματος φωσφόρου στο ίδιο διάγραμμα

Από διαφορετική σκοπιά, στις Εικόνες Π6.5 - Π6.8 παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα οι $NPS_{B2}(u)$ για τις τέσσερις διαφορετικές τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου κάθε φορά για μία συγκεκριμένη τιμή ενέργειας προσπίπτοντος φωτονίου από τις 1, 2, 4 και 8 MeV.

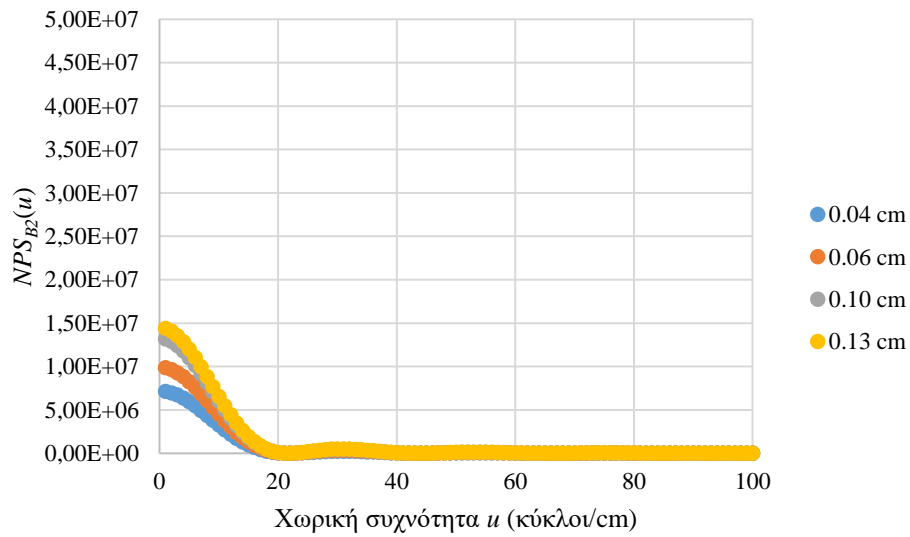


Εικόνα Π6.5: Η NPS_{B2} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 1 MeV.

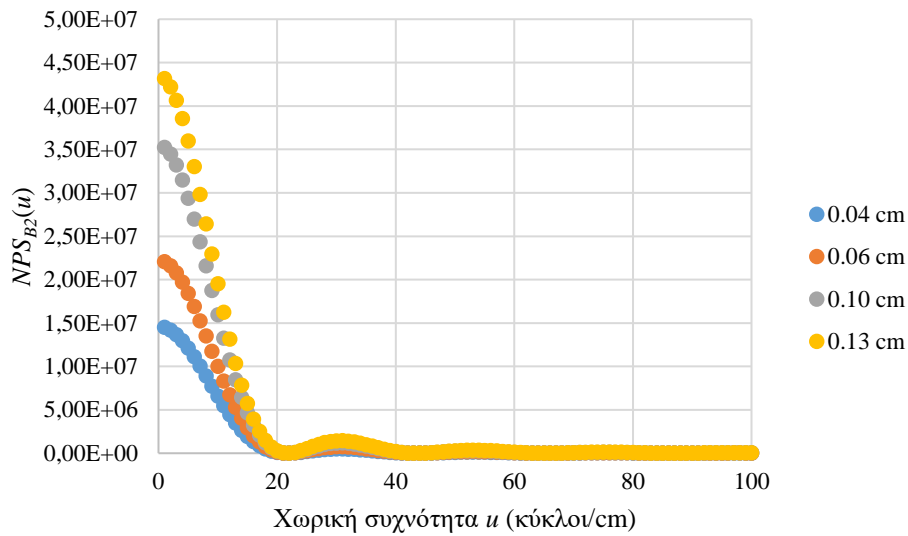
ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΠΥΛΑΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΣΩ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



Εικόνα Π6.6: Η NPS_{B2} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 2 MeV.



Εικόνα Π6.7: Η NPS_{B2} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 4 MeV.



Εικόνα Π6.8: Η NPS_{B2} ως συνάρτηση της χωρικής συχνότητας για τις τέσσερις τιμές πάχους στρώματος φωσφόρου $Gd_2O_2S:Tb$ 0.04, 0.06, 0.10 και 0.13 cm για ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου 8 MeV.

Από τα αποτελέσματα του Παραρτήματος 6, προκύπτει ότι το φάσμα ισχύος θορύβου, περιορίζεται σημαντικά μετά την ολοκλήρωση φωτονίων στη φωτοδίοδο που πραγματοποιείται στη συστοιχία. Πιο συγκεκριμένα, μετά τη δειγματοληψία, το φάσμα ισχύος θορύβου εξόδου του συστήματος είναι σημαντικό μόνο για τις χαμηλές χωρικές συχνότητες, μέχρι περίπου 20 κύκλους/cm.