ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ NaI(Tl) ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ MONTE CARLO.

Ξανθός Στέλιος[1], Λεοντάρης Φωκίων[2], Κλούβας Αλέξανδρος[2]
[1]Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού ΤΕ, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης
[2]Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών, ΑΠΘ
e-mail: xanthos@autom.teithe.gr

Περίληψη

Ένα από τα προβλήματα της βαθμονόμησης των ανιχνευτών γ-ακτινοβολίας NaI(Tl), είναι ο προσδιορισμός της εσωτερικής αλλά και της απόλυτης απόδοσης των ανιχνευτών αυτών, αναλόγως της εφαρμογής, ώστε να καταστεί δυνατή η εκτίμηση της προσπίπτουσας ροής φωτονίων, ο υπολογισμός του ρυθμού απορροφούμενης δόσης, αλλά και η εκτίμηση της ενεργότητας μετρουμένου δείγματος.
Η διαδικασία του προσδιορισμού της απόδοσης, απαιτεί πιστοποιημένα ραδιενεργά υλικά αναφοράς με διαφορετικά ραδιοϊσότοπα και ένα πλήθος ενεργειών γ-ακτινοβολίας για την βαθμονόμηση αναλόγως της απόδοσης που ζητάται να προσδιοριστεί. Το κόστος των παραπάνω πιστοποιημένων υλικών αναφοράς είναι σημαντικό.
Στην παρούσα εργασία προτείνεται η χρήση μόνο μίας πιστοποιημένης σημειακής ραδιενεργής πηγής με φωτοκορυφές σε ένα εύρος ενεργειών, για τις οποίες θα βαθμονομηθεί ο ανιχνευτής και χρήση τεχνικών Monte Carlo. Πρόκειται για μία μέθοδο χαμηλού κόστους που μπορεί να οδηγήσει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η σημειακή πηγή (Eu-152) τοποθετείται σε ικανή απόσταση από τον ανιχνευτή , για ελαχιστοποίηση των αθροιστικών κορυφών (coincidence summing effects). Προσομοιώθηκε ο ανιχνευτής και η σημειακή πηγή με τεχνικές Monte Carlo ώστε να υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων της απόδοσης που προέκυψε τόσο από την προσομοίωση όσο και από την μέτρηση. Σε αυτή τη διαδικασία βελτιστοποιήθηκε η γεωμετρία του ανιχνευτή σε σχέση με την αρχική γεωμετρία που δίνεται από τον κατασκευαστή, γιατί πολλές φορές οι διαστάσεις του κρυστάλλου διαφέρουν από αυτές που δίνονται από τον κατασκευαστή. Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση αυτών των διαφορών και προσδιορισμός των αιτιών της διαφοροποίησης αυτής.
Μετά τον προσδιορισμό της γεωμετρίας του κρυστάλλου τα αποτελέσματα της προσομοιωμένης απόδοσης συμπίπτουν με αυτά της πειραματικής.
Καθίσταται πλέον εφικτός ο προσδιορισμός της εσωτερικής απόδοσης αλλά και της απόλυτης απόδοσης για διάφορες γεωμετρίες δειγμάτων με χρήση μόνο προσομοιώσεων.

Λέξεις-Κλειδιά: NaI(Tl), Monte Carlo, βαθμονόμηση, απόδοση

Abstract

One of the issues concerning calibration of NaI(T1) gamma radiation detectors is to determine the intrinsic and absolute efficiency of these detectors. Depending on the application, the above estimations are needed in order to estimate incident photon flux, calculate the dose absorption rate and measure the activity of a sample.

The process to estimate the above efficiencies requires certified radioactive reference materials with different radioisotopes and different gamma-ray energies. The cost of the above certified reference materials is significant.

In the present work it is proposed to use one certified point radioactive source with photopeaks in a range of energies for which the detector will be calibrated and Monte Carlo techniques. This is a low cost method that can lead to satisfactory results. The point source (Eu-152) is located at a sufficient distance from the detector to minimize coincidence summing effects. The detector and point source were simulated using Monte Carlo techniques to match the results with the experimental ones. In this process, the geometry of the detector was optimized relative to the original geometry given by the manufacturer, because in many cases the dimensions of the NaI(Tl) crystal differs from those given by the manufacturer. These differences were investigated and the causes of this differentiation identified.

After determining the geometry of the crystal, the results of the simulated performance coincide with those of the experimental.

It is now possible to determine the internal efficiency but also the absolute efficiency for different sample geometries using simulations only.

Keywords: NaI(Tl), Monte Carlo, calibration, efficiency

1. Εισαγωγή

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για τη μέτρηση της γ-ακτινοβολίας είναι η γ-φασματοσκοπία. Όλα σχεδόν τα υλικά περιέχουν έστω και ελάχιστες ποσότητες ραδιενεργών ισοτόπων που εκπέμπουν γ-ακτινοβολία. Το ενεργειακό φάσμα ακτινοβολίας είναι χαρακτηριστικό (αποτελεί ταυτότητα) του νουκλιδίου που την εκπέμπει. Από το χαρακτηριστικό φάσμα που εκπέμπει το ραδιενεργό ισότοπο μπορούμε να διαγνώσουμε την παρουσία ακόμα και ελάχιστων ποσοτήτων κάποιου στοιχείου σε υλικό.
Στη γ-φασματοσκοπία χρησιμοποιούνται πλέον σχεδόν αποκλειστικά ανιχνευτές NaI(Tl) και HPGe. Το πλεονέκτημα των ανιχνευτών NaI(Tl) είναι η σημαντικά μεγαλύτερη εσωτερική απόδοση σε σχέση με τους ανιχνευτές HPGe. Από την άλλη μεριά, η διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών HPGe είναι εξαιρετικά καλύτερη από αυτήν των ανιχνευτών NaI(Tl) (Knoll 2010).

Η γ-φασματοσκοπία εφαρμόζεται ευρύτατα ως ένα εργαλείο για την ανάλυση ενός ραδιενεργού δείγματος ή για μέτρηση στο πεδίο (in-situ). Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζεται για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των ραδιονουκλιδίων που υπάρχουν στο δείγμα ή στον χώρο (Gilmore 1995).

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των ραδιονουκλιδίων αλλά και του ρυθμού απορροφούμενης δόσης από το συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο είναι αναγκαία η γνώση της απόκρισης του ανιχνευτή. Ήδη από την δεκαετία του 1970 χρησιμοποιούνται τεχνικές Monte Carlo για τον προσδιορισμό της απόκρισης ανιχνευτών NaI(Tl), (Berger and Seltzer 1972, Beam et al 1978, Cesana et al. 1978). Παρόλα αυτά ακόμα και σήμερα υπάρχει η ανάγκη βελτιστοποίησης αυτών των τεχνικών κυρίως λόγω αδυναμίας τέλειας προσομοίωσης των χαρακτηριστικών των ανιχνευτών NaI(Tl) (Hoang et al. 2017) αλλά και ελλιπούς γνώσης αυτών.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο έλεγχος και ο προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή που θα οδηγήσει σε ταύτιση της απόδοσής του που υπολογίζεται από τις προσομοιώσεις Monte Carlo με αυτή του πειραματικού προσδιορισμού. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε μία απλή γεωμετρία πηγής (σημειακή) που εκπέμπει ισοτροπικά ακτινοβολία γ σε διάφορες ενέργειες (Eu-152). Στην συνέχεια υπολογίστηκε η εσωτερική απόδοσή του ανιχνευτή με προσομοιώσεις Monte Carlo αλλά και πειραματικές μετρήσεις.

Ο ανιχνευτής και η σημειακή πηγή προσομοιώθηκαν έτσι ώστε να υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων της απόδοσης τόσο από την προσομοίωση όσο και από την μέτρηση. Σε αυτή τη διαδικασία βελτιστοποιήθηκε η γεωμετρία του ανιχνευτή σε σχέση με την αρχική γεωμετρία που δίνεται από τον κατασκευαστή.

2. Μεθοδολογία

2.1 Πειραματικός προσδιορισμός

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών είναι η απόδοση ανίχνευσης (Αντωνόπουλος 2005). Ο ορισμός της απόλυτης απόδοσης συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$\varepsilon(E) = \frac{\mu\varepsilon\tau\rho\eta\theta\varepsilon\acute{\iota}\sigma\varepsilon\varsigma\ \kappa\rho o\acute{\upsilon}\sigma\varepsilon\iota\varsigma(E)/s}{\varepsilon\kappa\pi\varepsilon\mu\varphi\theta\acute{\varepsilon}\nu\tau\alpha\ \varphi\omega\tau\acute{o}\nu\iota\alpha(E)/s} \qquad (1)$$

Επιπλέον η εσωτερική απόδοση ενός ανιχνευτή ορίζεται από την παρακάτω σχέση

$$\varepsilon(E) = \frac{\mu\varepsilon\tau\rho\eta\theta\varepsilon\acute{\iota}\sigma\varepsilon\varsigma\ \kappa\rho o\acute{\upsilon}\sigma\varepsilon\iota\varsigma(E)/s}{\pi\rho o\sigma\pi\acute{\iota}\pi\tau o\nu\tau\alpha\ \varphi\omega\tau\acute{o}\nu\iota\alpha(E)/s} \qquad (2)$$

Η πρώτη χρησιμοποιείται κυρίως για βαθμονόμηση στις εργαστηριακές μετρήσεις δειγμάτων ενώ η δεύτερη στις μετρήσεις πεδίου (in-situ).

Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάζεται στις επιτόπου μετρήσεις και άρα η χρήση και υπολογισμός της εσωτερικής απόδοσης του ανιχνευτή είναι αναγκαία. Μάλιστα αντί της εσωτερικής απόδοσης όπως ορίζεται παραπάνω γίνεται χρήση μίας αντίστοιχης παραμέτρου, του λόγου No/Φ, όπου No οι κρούσεις των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας ανά μονάδα χρόνου, Φ είναι η ασκέδαστη ροή φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας που προσπίπτει στο μπροστινό παράθυρο του ανιχνευτή.

Πρόκειται δηλαδή για συντελεστή που εκτιμά τον αριθμό των φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας, που αποθέτουν στη μονάδα του χρόνου πλήρως την ενέργεια τους στον ανιχνευτή, προερχόμενα από μία παράλληλη δέσμη φωτονίων που προσπίπτει στον ανιχνευτή υπό μηδενική γωνία πρόσπτωσης, ανά μονάδα ροής φωτονίων. Ο συντελεστής αυτός φαίνεται στην παρακάτω σχέση

$$\alpha\pi\acute{o}\delta o\sigma\eta = \frac{No}{\Phi} = \frac{No}{\frac{So}{4\pi r^2}} = \frac{No}{So} \times 4\pi r^2 \qquad (3)$$

όπου No οι κρούσεις φωτονίων ανά μονάδα χρόνου, Φ είναι η ροή, So ο αριθμός φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή στην μονάδα του χρόνου και r η απόσταση της πηγής από τον ανιχνευτή.

Η ασκέδαστη προσπίπτουσα ροή στον ανιχνευτή σε απόσταση r από την πηγή δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = \frac{So}{4\pi r^2} e^{-\mu r} \left(\frac{\gamma}{cm^2} s\right) \qquad (4)$$

όπου So η ένταση της πηγής (φωτόνια/s), r η απόσταση ανάμεσα στην πηγή και τον ανιχνευτή (cm), μ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένισης στον αέρα για τη συγκεκριμένη ενέργεια των ακτινών-γ σε cm^{-1}. Επειδή συνήθως χρησιμοποιείται ο μαζικός συντελεστής εξασθένισης, δηλαδή το πηλίκο του συντελεστή εξασθένισης διά την πυκνότητα του υλικού (cm^2/g), η σχέση 4 παίρνει τη μορφή:

$$\Phi = \frac{So}{4\pi r^2} e^{-(\frac{\mu}{\rho})\rho r} \qquad (5)$$

Στις τιμές των ενεργειών για τις οποίες δεν υπάρχει απ' ευθείας τιμή για τον μαζικό συντελεστή εξασθένησης πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή.

Για τον πειραματικό προσδιορισμό της εσωτερικής απόδοσης του ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκε πηγή Eu-152. Σύμφωνα με το πιστοποιητικό της πηγής (πιστοποιημένο υλικό αναφοράς) η ενεργότητά της στις 15-05-2000 ήταν 4,114 MBq. Για την εύρεση της ενεργότητας της πηγής την ημερομηνία που πραγματοποιήθηκε η μέτρηση, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση

$$A = Ao\ e^{-\lambda t} \qquad (6)$$

Η πηγή τοποθετήθηκε σε ικανή απόσταση (2m) ώστε η δέσμη των φωτονίων να θεωρηθεί ότι προσπίπτει κάθετα στο μπροστινό παράθυρο του ανιχνευτή.

Ο χρήστης πρέπει να εκτιμά κάθε φορά την απόδοση του ανιχνευτή που διαθέτει ανάλογα με τη συγκρότηση της ανιχνευτικής διάταξης, τη γεωμετρία του ανιχνευτή που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, τη γεωμετρία της πηγής, καθώς και την ενέργεια των ασκέδαστων φωτονίων που ανιχνεύονται.

Στην συνέχεια και με χρήση κατάλληλων συντελεστών από των αριθμό κρούσεων των φωτοκορυφών του φάσματος μπορεί να υπολογιστεί γνωρίζοντας την γεωμετρία της πηγής είτε η ενεργότητα της πηγής (σε περίπτωση εργαστηριακής μέτρησης δείγματος) είτε ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης λόγω της συγκεκριμένης φωτοκορυφής (σε περίπτωση επί τόπου μέτρησης).

Η απόδοση του ανιχνευτή εκτιμάται για συγκεκριμένη διεύθυνση πρόσπτωσης της δέσμης των φωτονίων. Συνήθως η δέσμη των φωτονίων της ραδιενεργής πηγής είναι κάθετη στο μπροστινό παράθυρο του ανιχνευτή. Αυτό σημαίνει ότι σε περιπτώσεις που η γεωμετρία της πηγής-ανιχνευτή είναι τέτοια ώστε τα φωτόνια να προσπίπτουν υπό γωνία στον ανιχνευτή χρειάζεται γωνιακή διόρθωση της απόδοσής του.

Υπολογίστηκαν οι τυπικές αβεβαιότητες οι οποίες οφείλονται κυρίως στην αβεβαιότητα του υλικού αναφοράς (προσδιορίζονται από το πιστοποιητικό του). Οι υπόλοιπες αβεβαιότητες είναι αμελητέες και δεν συνεισφέρουν στην αβεβαιότητα της απόδοσης. Η τυπική αβεβαιότητα της απόδοσης υπολογίστηκε με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$u_\varepsilon = 4\pi r^2 \sqrt{\left(\frac{1}{So} * u_{No}\right)^2 + \left(\frac{-No}{So^2} * u_{So}\right)^2} \qquad (7)$$

Όπου uε: Η αβεβαιότητα της απόδοσης για τη συγκεκριμένη ενέργεια.

u_{No}: Η αβεβαιότητα των καθαρών κρούσεων της φωτοκορυφής που δίνεται από το λογισμικό ανάλυσης (περιέχει την αβεβαιότητα του υποβάθρου).

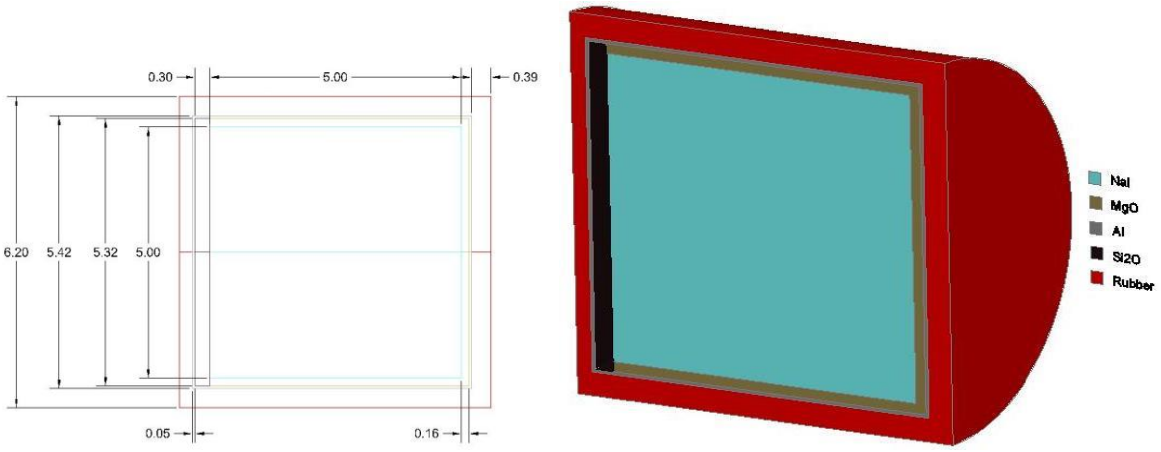
u_{So}: Η αβεβαιότητα του ρυθμού φωτονίων που εκπέμπει το νουκλίδιο στην συγκεκριμένη ενέργεια. Δίνεται από τον κατασκευαστή του προτύπου δείγματος και ανάγεται στην ημερομηνία μέτρησης.

Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε είναι φορητός ανιχνευτής ιωδιούχου νατρίου της εταιρείας Canberra (InSpector 1000TM, IPROS-2). Αποτελείται από έναν κυλινδρικό, ομοαξονικό κρύσταλλο με διάμετρο 5 cm και μήκος 5 cm. Αμέσως μετά τον κρύσταλλο ακολουθεί ο φωτοπολλαπλασιαστής και μέσω ενός καλωδίου συνδέεται με έναν πολυκαναλικό αναλυτή.

Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν το φάσμα συλλέγεται στον πολυκαναλικό αναλυτή (MCA, MultiChannel Analyzer), 1024 καναλιών, και στη συνέχεια με τη χρήση του προγράμματος Genie το φάσμα αποθηκεύεται σε έναν υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα, ο αναλυτής δέχεται τους παλμούς που στέλνει ο κρύσταλλος και καθώς οι παλμοί αυτοί είναι ανάλογοι της ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου τους ταξινομεί στα αντίστοιχα κανάλια. Έτσι, προκύπτει ένα φάσμα, αριθμού κρούσεων συναρτήσει της ενέργειας.

2.2 Προσομοίωση ανιχνευτή

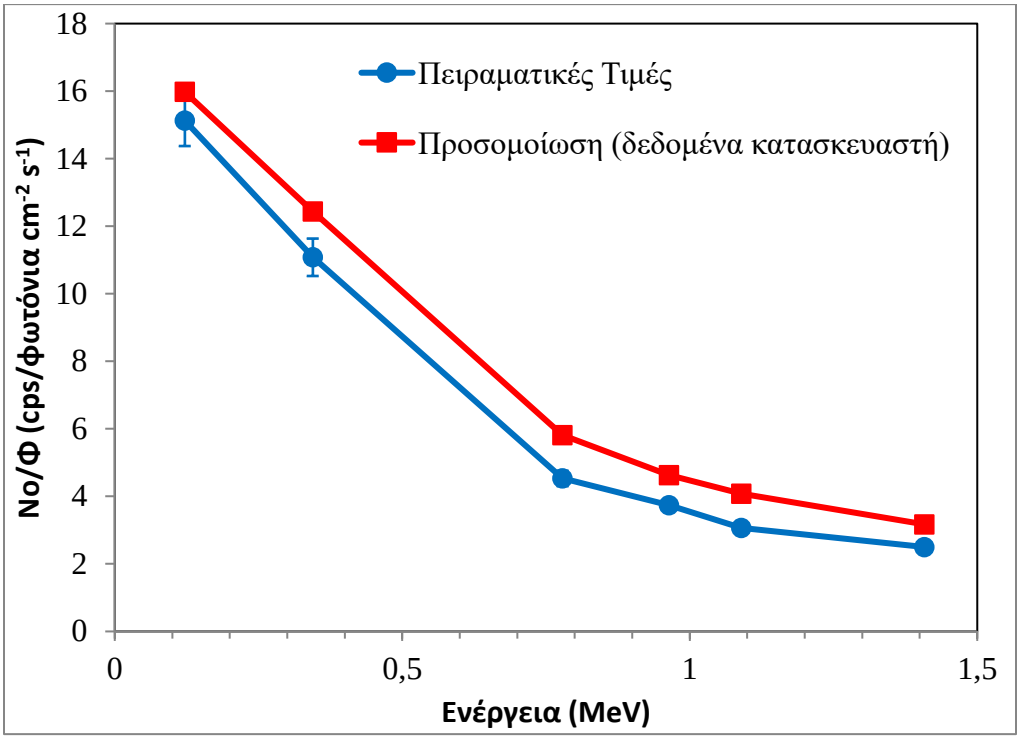
Για την προσομοίωση του ανιχνευτή έγινε χρήση του κώδικα Monte Carlo MCNP (Briesmeister 2000) και χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του σχήματος 1. Η διάταξη των υλικών και η γεωμετρία του ανιχνευτή φαίνονται στο σχήμα 1. Πρόκειται για ένα απλό μοντέλο που χρησιμοποιεί τα βασικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή. Εισάγοντας, λοιπόν, στον κώδικα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, όπως αυτά δόθηκαν από τον κατασκευαστή, έγινε προσπάθεια να προσομοιωθεί το φάσμα που ελήφθη από σημειακή πηγή Eu-152. Επίσης, για τις διάφορες προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν σημειακές και επιφανειακές πηγές, για τον προσδιορισμό της απόδοσης του ανιχνευτή.



Σχήμα 1: Διαστάσεις και διάταξη υλικών ανιχνευτή NaI(Tl), όπως δίνονται από τον κατασκευαστή.

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης του ανιχνευτή ορίστηκαν οι γεωμετρικές διαστάσεις του κρυστάλλου, όπως αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή του ανιχνευτή. Έτσι το γυαλί ελήφθη ίσο με 3.00 mm, το φύλλο αλουμινίου 0.5 mm, το φύλλο μαγνησίου 1.85 mm και ο κρύσταλλος NaI(Tl) 5.08 cm X 5.08 cm. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση και σύγκριση της

προσομοιωμένης απόδοσης του ανιχνευτή με την πειραματική απόδοση. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 2.

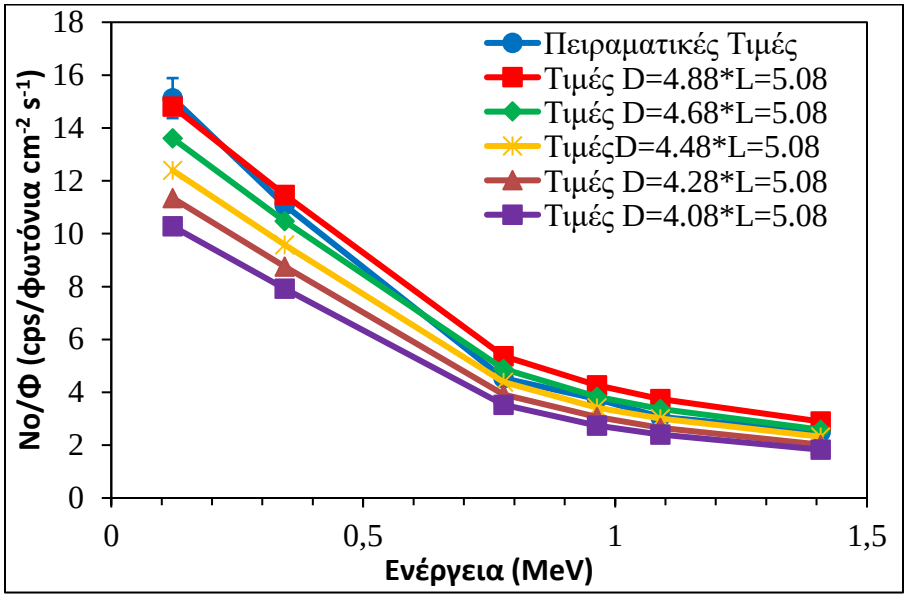


Σχήμα 2: Σύγκριση πειραματικής και προσομοιωμένης καμπύλης απόδοσης του ανιχνευτή με χρήση διαστάσεων του κατασκευαστή.

2.3 Επιβεβαίωση-Έλεγχος ορθότητας προσομοίωσης

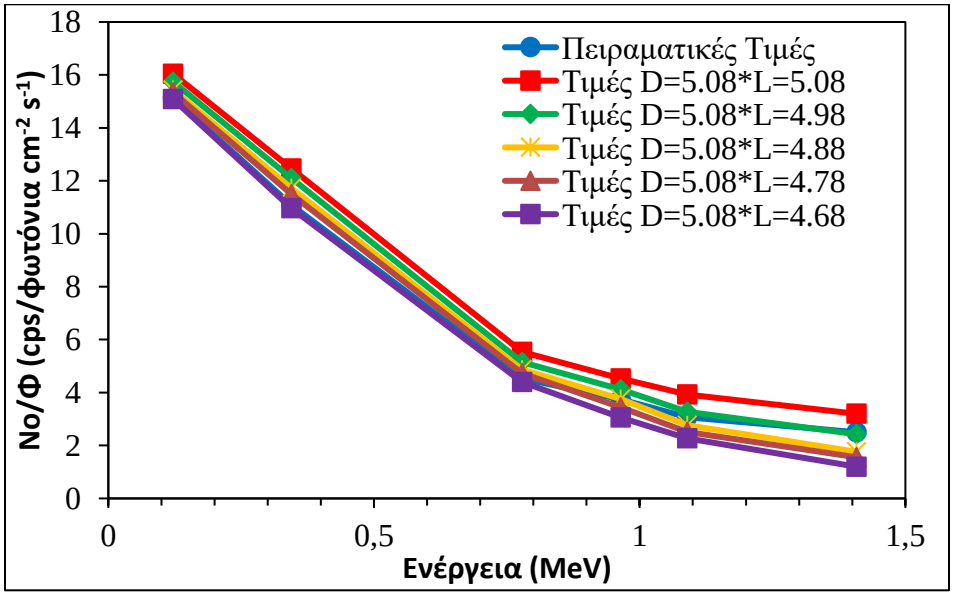
Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται μεγάλη διαφορά της απόδοσης ανάμεσα στις δύο καμπύλες, για τις ίδιες ενέργειες. Προκειμένου να μειωθεί η απόκλιση τιμών στις χαμηλές και υψηλές ενέργειες είναι αναγκαία η μεταβολή των διαστάσεων των υλικών του ανιχνευτή. Συνήθως από τον κατασκευαστή δεν δίνεται ακριβές σχέδιο του συγκεκριμένου κρύσταλλου παρά μόνο μία γενική περιγραφή της κατασκευής των κρυστάλλων εν γένει. Επομένως είναι λογικό να υπάρχουν αποκλίσεις στις τελικές διαστάσεις του κρυστάλλου. Παρακάτω μεταβάλλονται οι διαστάσεις του κρυστάλλου ώστε να υπάρξει ταύτιση των δύο καμπυλών. Χρησιμοποιούνται οι εξής τρόποι για την μεταβολή των διαστάσεων του ενεργού όγκου του κρυστάλλου. Μεταβάλλεται η διάμετρος του κρυστάλλου, το μήκος του κρυστάλλου είτε ταυτόχρονα και τα δύο.

Στην περίπτωση της διατήρησης σταθερού μήκους κρυστάλλου L=5.08cm και μεταβολής της διαμέτρου D στην κατεύθυνση της μείωσης αυτής, τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 3: Μεταβολή απόδοσης για μείωση της διαμέτρου του κρυστάλλου (οι τιμές των διαστάσεων σε cm).

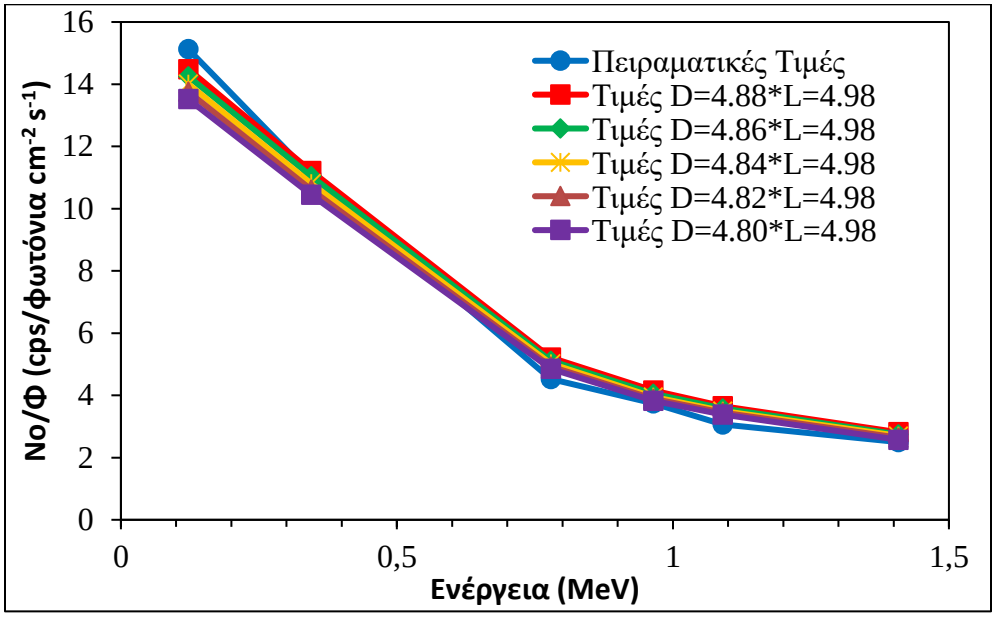
Παρατηρείται ότι, όταν μειώνεται η διάμετρος D του κρυστάλλου γίνεται περισσότερο εμφανής η μεταβολή μείωσης της απόδοσης του ανιχνευτή στις χαμηλές ενέργειες. Αντίθετα στις υψηλές ενέργειες η μείωση είναι πολύ μικρότερη και δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την απόδοση. Είναι προφανές από το παραπάνω γράφημα ότι η διάσταση της διαμέτρου που οδηγεί σε σύμπτωση της προσομοιωμένης απόδοσης με την πειραματική απόδοση είναι αυτή με D=4.88 cm. Στην συνέχεια διατηρήθηκε σταθερή η διάμετρος του κρυστάλλου D=5.08cm και μεταβλήθηκε το μήκος του κρυστάλλου L στην προοπτική της μείωσης αυτού. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και η σύγκριση με την πειραματική καμπύλη φαίνονται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 4: Μεταβολή απόδοσης για μείωση του μήκους του κρυστάλλου (οι τιμές των διαστάσεων σε cm)

Παρατηρείται ότι όταν μειώνεται το μήκος L του κρυστάλλου, γίνεται περισσότερο εμφανής η μεταβολή μείωσης της απόδοσης του ανιχνευτή στις υψηλές ενέργειες. Αντίθετα στις χαμηλές ενέργειες η μείωση είναι πολύ μικρότερη και δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την απόδοση.
Είναι προφανές από το παραπάνω γράφημα ότι η διάσταση του μήκους του κρυστάλλου που οδηγεί σε σύμπτωση της προσομοιωμένης απόδοσης με την πειραματική απόδοση είναι αυτή με L=4.98 cm.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με αρχική τιμή διαμέτρου D=4.88cm με βήμα μείωση 0,2mm ως 4.80cm και με σταθερό μήκος L=4.98cm, ώστε να βρεθεί η καλύτερη καμπύλης απόδοσης, που συγκλίνει περισσότερο στην πειραματική καμπύλη απόδοσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και η σύγκριση με την πειραματική καμπύλη φαίνονται στο σχήμα 5.



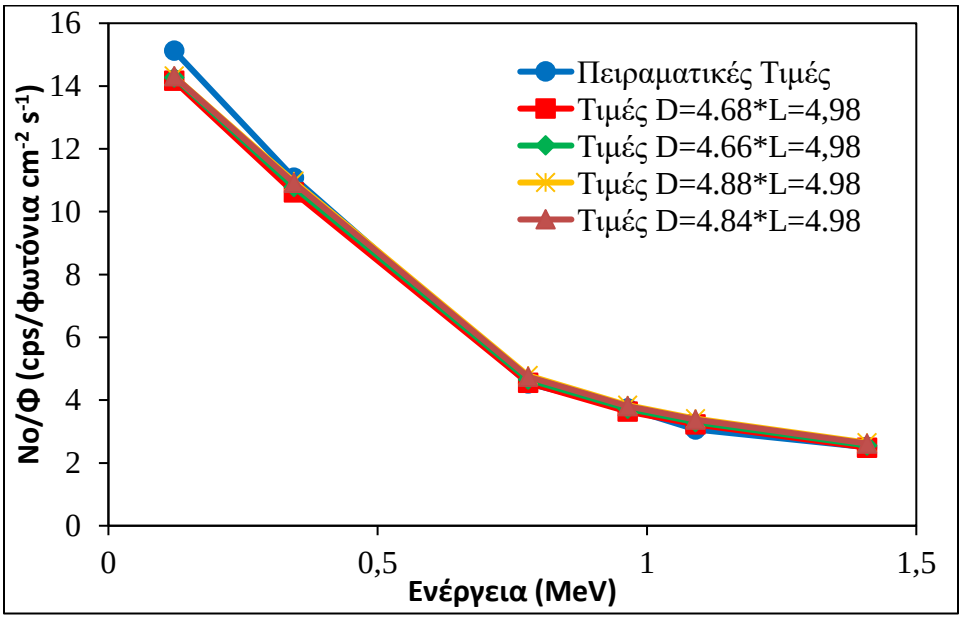
Σχήμα 5: Μεταβολή απόδοσης για μείωση της διαμέτρου του κρυστάλλου και σταθερό μήκος L=4.98 cm (οι τιμές των διαστάσεων σε cm)

Δεν γίνεται ακριβής ταύτιση τιμών κάποιας προσομοιωμένης καμπύλης, στην πειραματική καμπύλη, μα γίνεται η επιλογή της βέλτιστης με την παρατήρηση του σχήματος 5. Έτσι λαμβάνουμε ως καλύτερη συμπίπτουσα της πειραματικής καμπύλης απόδοσης, για σημειακή πηγή σε απόσταση 2m, την καμπύλη απόδοσης με γεωμετρικές διαστάσεις κρυστάλλου D=4.88cm, L=4.98 cm.

Ελέγχθηκε η περίπτωση χρήσης προσομοίωσης με δέσμη φωτονίων κάθετης στο μπροστινό παράθυρο του ανιχνευτή αντί σημειακής πηγής. Το γεγονός ότι η πηγή είναι σε μεγάλη απόσταση από τον ανιχνευτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η γεωμετρία είναι ίδια. Η δέσμη φωτονίων έχει ίδιες ενεργειακά ιδιότητες με την πηγή, δηλαδή έχει φωτόνια ίδιων ενεργειών με αυτά της σημειακής πηγής. Η διαφορά τους έγκειται στην απόσταση από τον ανιχνευτή NaI(Tl) και στην κατεύθυνσης εκπομπής των φωτονίων της πηγής. Η δέσμη φωτονίων είναι μονοκατευθυντική και η σημειακή πηγή έχει ισοτροπική εκπομπή φωτονίων.

Στη περίπτωση της δέσμης φωτονίων όλη η ενέργεια των φωτονίων προσπίπτει ομοιόμορφα ακριβώς στις διαστάσεις του κρυστάλλου, στο μπροστινό παράθυρο του ανιχνευτή. Έτσι δεν υπάρχει πιθανότητα απώλειας φωτονίων και οι προσομοιώσεις εκτελούνται ταχύτερα.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και η σύγκριση με την πειραματική καμπύλη φαίνονται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 6: Μεταβολή απόδοσης για μείωση της διαμέτρου του κρυστάλλου D με σταθερό μήκος L=4.98cm. Η πηγή αντικαταστάθηκε με δέσμη φωτονίων στο μπροστινό παράθυρο

Η δέσμη φωτονίων στο μπροστινό παράθυρο του ανιχνευτή, δίνει ίδια αποτελέσματα των καμπυλών απόδοσης, με την πειραματική καμπύλη άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί της χρονοβόρας σημειακής πηγής. Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι επιλέγονται ως καλύτερες γεωμετρικές διαστάσεις κρυστάλλου αυτές με D=4.88cm και L=4.98cm.

3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένας τρόπος βαθμονόμησης και υπολογισμού απόδοσης ανιχνευτή NaI(Tl) με τη χρήση μίας πιστοποιημένης σημειακής πηγής με φωτοκορυφές σε ένα εύρος ενεργειών και τεχνικών Monte Carlo

Για τον προσδιορισμό της πειραματικής καμπύλης απόδοσης του ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκε πηγή Eu-152 και οι έξι πιο σημαντικές ενέργειες εκπομπής φωτονίων (E_1=121.7, E_2=344.3, E_3=778.9, E_4=964.1, E_5=1089.7 E_6=1408.0 keV).

Προτείνεται μεταβολή των χαρακτηριστικών του ανιχνευτή στο κομμάτι των διαστάσεων (διαμέτρου, μήκους κρυστάλλου) από αυτά που δίνονται από τον κατασκευαστή. Με χρήση των διαστάσεων του κρυστάλλου από τον κατασκευαστή παρατηρείται απόκλιση της προσομοιωμένης απόδοσης από την πειραματική. Η πειραματική απόδοση είναι μικρότερη αυτής που προκύπτει από τις προσομοιώσεις.

Από την προσομοίωση του ανιχνευτή γίνεται εκτίμηση της μεταβολής των χαρακτηριστικών του, ώστε να υπάρξει ταύτιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αυτά των πειραματικών μετρήσεων. Η γεωμετρία που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή και σύγκριση των αποτελεσμάτων είναι αυτή της σημειακής ισοτροπικής πηγής σε απόσταση 2m από το πρόσθιο παράθυρο του ανιχνευτή.

Ο κρύσταλλος με διαστάσεις D=4.88cm, L=4.98cm και για σημειακή πηγή έχει την καλύτερη σύμπτωση με την πειραματική καμπύλη της απόδοσης.

Παρατηρήθηκε ταύτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά των προσομοιώσεων και μπορεί να υπάρξει επέκταση και για άλλες γεωμετρίες. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος και στον υπολογισμό της απόλυτης απόδοσης του ανιχνευτή.

Παρατηρήθηκε ότι η δέσμη φωτονίων στο μπροστινό παράθυρο του ανιχνευτή, δίνει ταυτόσημα αποτελέσματα για την καμπύλη της απόδοσης σε σχέση, με την σημειακή πηγή. Και σε αυτή την περίπτωση οι βέλτιστες διαστάσεις είναι όπως παραπάνω.

4. Βιβλιογραφία

Αντωνόπουλος-Ντόμης Μ. "Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία", 2005, εκδόσεις Ζήτη.

Berger, M.J., Seltzer, S.M., "Response functions for sodium iodide scintillation detectors". Nucl. Instrum. Methods 104, 317–332, 1972.

Beam, G.B.; Wielopolski, L.; Gardner, R.P.; Verghese, K. "Monte Carlo calculation of efficiencies of right circular cylindrical NaI detectors for arbitrary located point sources". Nucl. Instr. Meth. 1978, 154, 501.

Briesmeister J. "MCNP–A General Monte Carlo N–Particle Transport Code", 2000, Los Alamos National Laboratory

Cesana, A.; Terrani, M. "Determination of the full energy peak efficiency of NaI (Tl) detectors". Appl. Radiat. Isot. 1978, 29, 427–429.

Gilmore G., Hemingway J.D. "Practical Gamma-ray Spectrometry", 1995, Wiley.

Hoang Duc Tam, Nguyen Thi Hai Yen, Le Bao Tran, Huynh Dinh Chuong and Tran Thien Thanh, "Optimization Of The Monte Carlo Simulation Model Of NaI(Tl) Detector By Geant4 CODE" , Applied Radiation and Isotopes, http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.09.020

Knoll G. "Radiation Detection and Measurement", 2010, Wiley.