

# ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ HPGe ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ MONTE CARLO.

Ξανθός Στέλιος<sup>1</sup> και Κλούβας Αλέξανδρος<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Αυτοματισμού, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης  
<sup>2</sup>Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών, ΑΠΘ  
e-mail: xanthos@autom.teithe.gr

## Περίληψη

Ένα από τα σημαντικά προβλήματα της βαθμονόμησης των ανιχνευτών HPGe, φορητών και εργαστηριακών, είναι ο προσδιορισμός της απόδοσης (απόλυτη ή εσωτερική) των ανιχνευτών αυτών, ώστε να καταστεί δυνατή η εκτίμηση της ενεργότητας του μετρουμένου δείγματος. Η διαδικασία του προσδιορισμού της απόλυτης απόδοσης που θα οδηγήσει στον προσδιορισμό της ενεργότητας του προς μέτρηση δείγματος, απαιτεί σαφή γνώση της γεωμετρίας του παραπάνω δείγματος. Στα εργαστηριακά συστήματα μέτρησης ο χρήστης οφείλει να χρησιμοποιήσει πιστοποιημένα υλικά αναφοράς συγκεκριμένης γεωμετρίας για τη βαθμονόμηση. Επιπροσθέτως λόγω του γεγονότος ότι από κάθε εργαστήριο γίνεται χρήση διαφορετικών, μη τυποποιημένων δοχείων, εντός των οποίων θα τοποθετηθεί το προς μέτρηση δείγμα, το κόστος των παραπάνω πιστοποιημένων υλικών αναφοράς αυξάνεται σημαντικά.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η χρήση μόνο μίας πιστοποιημένης σημειακής πηγής με φωτοκορυφές σε ένα εύρος ενεργειών, για το οποίο θα βαθμονομηθεί ο ανιχνευτής και χρήση τεχνικών Monte Carlo. Πρόκειται για μία μέθοδο χαμηλού κόστους που μπορεί να οδηγήσει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε σημειακή πηγή Eu-152 που τοποθετείται σε ικανή απόσταση (εξαρτάται από την ενεργότητα της πηγής) για ελαχιστοποίηση των αθροιστικών κορυφών. Προσομοιώθηκε ο ανιχνευτής και η σημειακή πηγή 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. Σημαντικός παράγοντας είναι ο προσδιορισμός του ενεργού όγκου του κρυστάλλου. Ή αλλιώς ο καθορισμός της νεκρής ζώνης του κρυστάλλου που πολλές φορές διαφέρει από αυτήν που δίνεται από τον κατασκευαστή. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην διάχυση των προσμίξεων της νεκρής ζώνης στον ενεργό όγκο. Μετά τον προσδιορισμό της γεωμετρίας του κρυστάλλου τα αποτελέσματα της προσομοιωμένης απόδοσης συμπίπτουν με αυτά της πειραματικής.

Καθίσταται πλέον εφικτός ο προσδιορισμός της απόδοσης για διάφορες γεωμετρίες δειγμάτων με χρήση μόνο προσομοιώσεων. Ερευνήθηκε η πιθανότητα ταύτισης των πειραματικών με τις προσομοιωμένες αποδόσεις και για άλλες γεωμετρίες εκτός της σημειακής. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά.

*Λέξεις-Κλειδιά: HPGe, Monte Carlo, βαθμονόμηση, απόδοση*

---

Ξανθός Στέλιος, Κλούβας Αλέξανδρος, ΑΤΕΙΘ, ΑΠΘ  
Βαθμονόμηση ανιχνευτών HPGe με τεχνικές Monte Carlo.

## Abstract

The main part of a calibration procedure of an HPGe detector is the estimation of the efficiency (absolute or intrinsic) in order to estimate the activity of the measuring sample. This procedure requires a good knowledge of sample's geometry. In laboratory systems, certified sources of certain geometries are being used for the calibration. Moreover due to the fact that each laboratory uses different types of beakers, the cost of the certified materials increases.

In the present work the use of a point source in combination with Monte Carlo simulations is proposed. It is a low cost calibration method that leads to acceptable results.

In the present work an Eu-152 source was used. It was placed in a fair distance from the front window of the detector in order to eliminate the summing effects. The detector was simulated in such a way so as experimental and simulated results coincide. In this procedure the geometrical characteristics were revised from these provided by the manufacturer. The difference is the degree of extend of the dead layer. The main reason for this difference is the diffusion of lithium which was implanted into the surface to form an n+ layer, to the active volume. After correcting the thickness of the dead layer, experimental absolute efficiency and simulated one coincide.

Moreover the estimation of efficiencies for unknown sample geometries is now possible without experimental procedures but only with simulations. The proposed procedure was also tested for three different geometries concerning volumes and densities and the results were acceptable.

*Keywords: HPGe, Monte Carlo, calibration, efficiency*

## 1. Εισαγωγή

Οι ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε συστήματα γ-φασματοσκοπίας για εργαστηριακές αλλά και επί τόπου μετρήσεις. Κυριότερος λόγος χρησιμοποίησής τους είναι ο προσδιορισμός της ενεργότητας ραδιονουκλιδίων στα προς μέτρηση δείγματα.

Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι για την βαθμονόμηση ανιχνευτών HPGe. Συνήθως μετράται πρότυπο δείγμα που περιέχει πλήθος ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν ακτινοβολία  $\gamma$  σε συγκεκριμένες ενέργειες, γνωστής ενεργότητας και συνοδεύεται από πιστοποιητικό που εξασφαλίζει την ιχνηλασιμότητα της ενεργότητας των ραδιονουκλιδίων. Αναγράφει αναλυτικά τα ραδιονουκλίδια που περιέχονται στο δείγμα, τις ενέργειες της  $\gamma$ -ακτινοβολίας που εκπέμπουν, την ενεργότητα των νουκλιδίων καθώς και άλλες χρήσιμες πληροφορίες όπως τη χρονολογία αναφοράς, τις πιθανότητες εκπομπής φωτονίων ανά διάσπαση (branching ratio), τους χρόνους ημιζωής κλπ. των ραδιενεργών νουκλιδίων που περιέχονται στο πιστοποιημένο υλικό αναφοράς.

Ο προσδιορισμός της απόλυτης απόδοσης για κάθε ενέργεια εκπομπής φωτονίων πραγματοποιείται από τον λόγο των ολικά απορροφούμενων κρούσεων που μετρήθηκαν

---

Ξανθός Στέλιος, Κλούβας Αλέξανδρος, ΑΤΕΙΘ, ΑΠΘ  
Βαθμονόμηση ανιχνευτών HPGe με τεχνικές Monte Carlo.

5ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

προς τα φωτόνια που εκπέμφθηκαν από το δείγμα. (Αντωνόπουλος-Ντόμης 2005). Είναι προφανές ότι υπάρχει εξάρτηση της απόλυτης απόδοσης από την γεωμετρία του δείγματος και της διάταξης. Ο τύπος υπολογισμού της απόδοσης συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$\varepsilon(E) = \frac{\text{μετρηθείσες κρούσεις}(E)/s}{\text{εκπεμφθέντα φωτόνια}(E)/s}$$

(1)

Η ενεργότητα προσδιορίζεται γνωρίζοντας τον τρόπο διάσπασης του προς εκτίμηση ραδιονουκλιδίου. Σε αρκετές περιπτώσεις χρειάζονται διορθώσεις για αθροιστικά φαινόμενα από φωτόνια που εκπέμπονται ταυτόχρονα αλλά και αυτοαπορροφήσεις για διαφορετικές πυκνότητες δειγμάτων (Gelsema and Blaauw 1996, Blaauw 1998, Sima 2000).

Ο υπολογισμός εν συνεχεία της συγκέντρωσης κάποιου ραδιονουκλιδίου στο προς μέτρηση δείγμα, που έχει την ίδια γεωμετρία με το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της απόλυτης απόδοσης, γίνεται με τον παρακάτω τύπο:

$$A = \frac{cps}{\varepsilon * FY * M}$$

(2)

όπου A: Η συγκέντρωση του νουκλιδίου (Bq/kg).

cps: Οι καθαρός ρυθμός κρούσεων ολικά απορροφούμενων φωτονίων που μετρώνται στην συγκεκριμένη ενέργεια της γ-ακτινοβολίας.

ε: Η απόλυτη απόδοση του ανιχνευτή για τη συγκεκριμένη γεωμετρία και ενέργεια της γ-ακτινοβολίας.

FY: Η πιθανότητα εκπομπής φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας ανά διάσπαση του προς μέτρηση ραδιονουκλιδίου.

M: Η μάζα του δείγματος (kg).

Η χρήση υπολογιστικών συστημάτων στην σημερινή εποχή με τις διαρκώς αυξανόμενες δυνατότητες σε υπολογιστική ισχύ έχει οδηγήσει στο να γίνει η χρήση κωδικών Monte Carlo ένας εναλλακτικός αλλά και συμπληρωματικός τρόπος υπολογισμού αποδόσεων και βαθμονομήσεων ανιχνευτικών διατάξεων HPGe.

Παρόλα αυτά όταν υπολογίζονται οι αποδόσεις ανιχνευτών HPGe με την χρήση προσομοιώσεων Monte Carlo παρουσιάζεται διαφοροποίηση μεταξύ των πειραματικών και των υπολογισμένων μέσω Monte Carlo αποτελεσμάτων (Korun et al. 1997, Lepy et al. 2001).

Αυτή οφείλεται στην ελλιπή γνώση της γεωμετρίας του κρυστάλλου υπερκαθαρού γερμανίου, δηλαδή της νεκρής ζώνης και πιο συγκεκριμένα της μεταβατικής ζώνης, η οποία δημιουργείται λόγω της διάχυσης φορέων στον ενεργό όγκο, στον όγκο δηλαδή μεταξύ των επαφών p+ και n+. Αυτές οι επαφές μπορεί να έχουν σημαντικό πάχος ιδιαίτερα δε η n+, η οποία κατασκευάζεται εξαχνώνοντας και διαχέοντας λίθιο στον κρύσταλλο (Gilmore and

---

Ξανθός Στέλιος, Κλούβας Αλέξανδρος, ΑΤΕΙΘ, ΑΠΘ  
Βαθμονόμηση ανιχνευτών HPGe με τεχνικές Monte Carlo.

Hemingway 1995, Herold and Kouzes 1991, Kamboj and Kahn 1996). Επίσης ενώ ο κατασκευαστής προσδιορίζει την νεκρή ζώνη, υπάρχει και μία μεταβατική ζώνη που δεν προσδιορίζεται. Η ζώνη αυτή δημιουργείται λόγω της διάχυσης του λιθίου με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ολική αλλά μερική απορρόφηση ενέργειας των προσπιπτόντων φωτονίων (Clouvas et al. 1998). Μάλιστα η διάχυση αυτή συνεχίζεται με τον χρόνο και επομένως μεταβάλλεται η απόδοση του κρυστάλλου με τα χρόνια (Knoll 2010). Επίσης, ενώ οι κατασκευαστές παρέχουν τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών, οι αβεβαιότητες αυτών των χαρακτηριστικών δεν είναι διαθέσιμες.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανιχνευτή που θα οδηγήσει σε ταύτιση των αποτελεσμάτων της απόλυτης απόδοσης που προκύπτει από τις προσομοιώσεις Monte Carlo με αυτά του πειραματικού προσδιορισμού.

Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε μία απλή γεωμετρία πηγής (σημειακή) που εκπέμπει ισοτροπικά ακτινοβολία  $\gamma$  σε διάφορες ενέργειες (Eu-152) και υπολογίστηκε η απόδοσή της με προσομοιώσεις Monte Carlo αλλά και πειραματικές μετρήσεις.

Προσομοιώθηκε ο ανιχνευτής και η σημειακή πηγή 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**

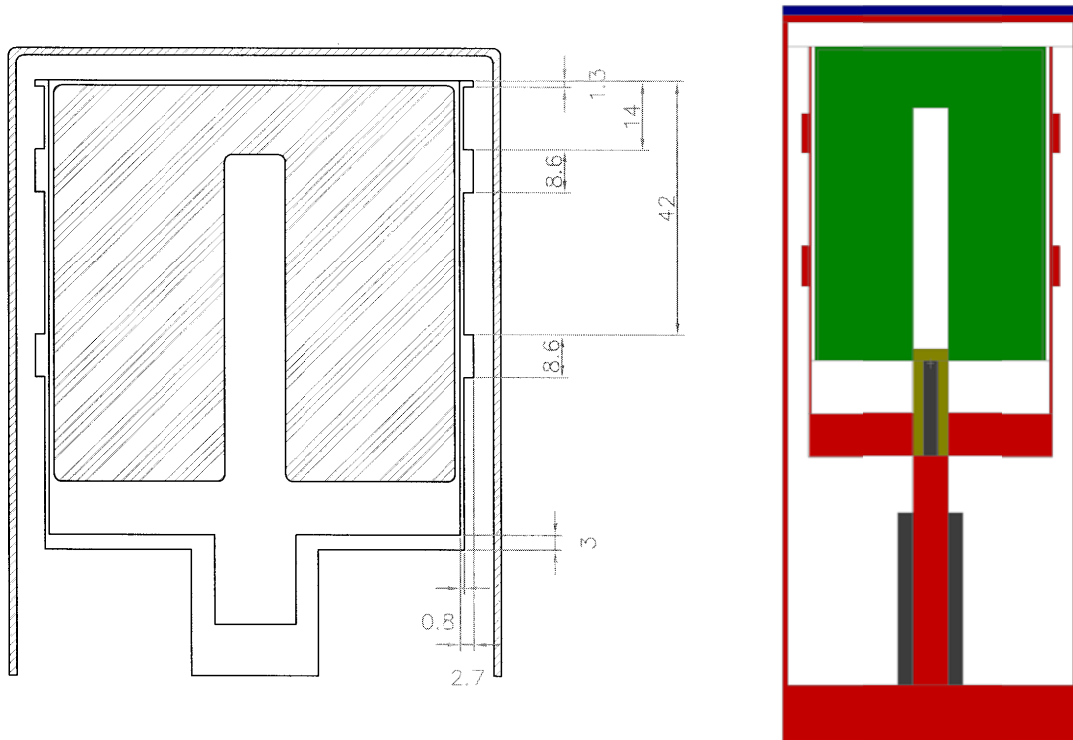
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου με σχετική απόδοση 50% σε σχέση με κρύσταλλο 3"X3" NaI(Tl) στα 1.33 MeV. Πρόκειται για κυλινδρικό ανιχνευτή π-τύπου της εταιρίας Canberra. Είναι συνδεδεμένος με πολυκαναλικό αναλυτή Inspector 2000 της ίδιας εταιρίας και για την ανάλυση των φασμάτων χρησιμοποιείται το λογισμικό Genie 2000.

Αρχικά μετρήθηκε η απόλυτη απόδοση για πιστοποιημένη σημειακή πηγή Eu-152 που τοποθετήθηκε σε απόσταση 60 cm από το πρόσθιο παράθυρο του ανιχνευτή για τις σημαντικότερες ενέργειες του Eu-152. Είναι σημαντικό να τοποθετηθεί η πηγή σε απόσταση από τον ανιχνευτή ώστε να εξαιρεθούν φαινόμενα αθροιστικής σύμπτωσης (TCS) στο μετρούμενο φάσμα της  $\gamma$ -ακτινοβολίας αλλά και για την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας της απόστασης. Επιλέχθηκαν οι πέντε σημαντικότερες φωτοκορυφές του Eu-152 για τον καθορισμό της απόδοσης συναρτήσει της ενέργειας. Η καμύλη της απόδοσης, όπως προκύπτει από τις μετρήσεις στις συγκεκριμένες ενέργειες εκπομπής φωτονίων του Eu-152, φαίνεται στο σχήμα 2α.

### **2.2 Προσομοίωση ανιχνευτή**

Ο παραπάνω ανιχνευτής προσομοιώθηκε με την βοήθεια του κώδικα Monte Carlo MCNP4c2 (Briesmeister 2000). Το διάγραμμα του κατασκευαστή αλλά και ο τρόπος προσομοίωσης του

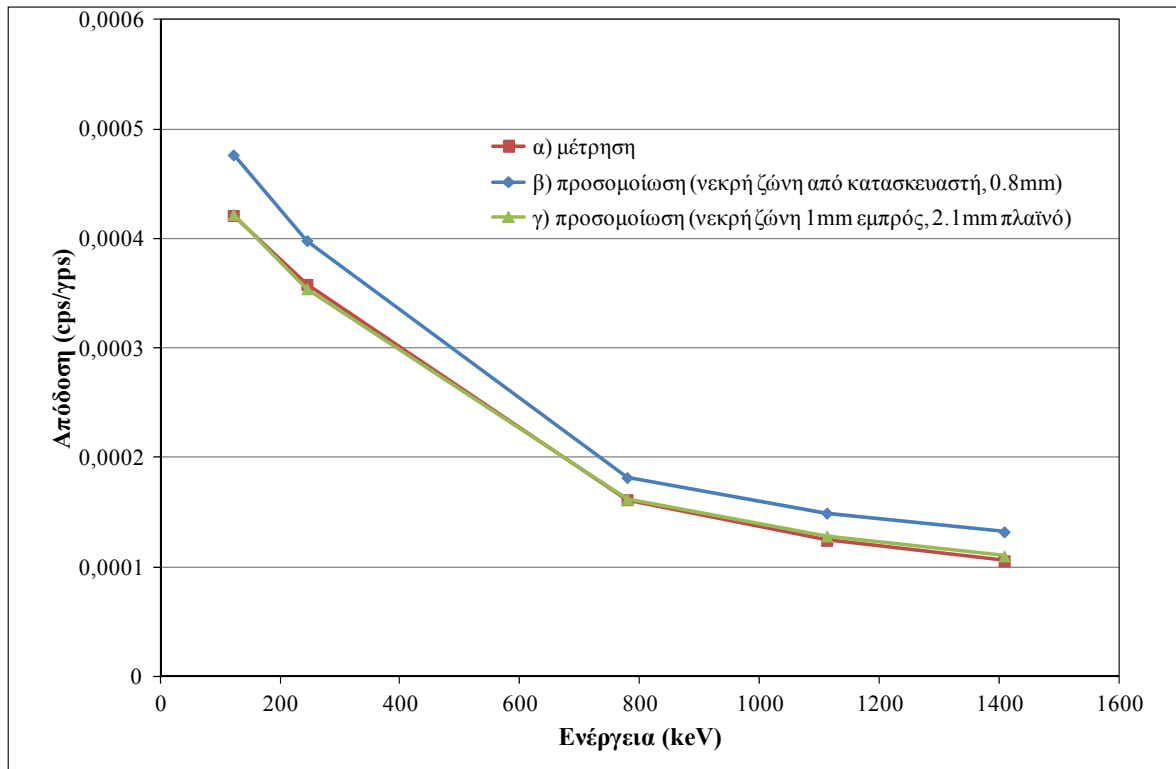
ανιχνευτή φαίνονται στο σχήμα 1. Δίνεται από τον κατασκευαστή επίσης η τιμή της νεκρής ζώνης στην επαφή n+ ίση με 0.8mm και στη p+ ίση με 0.3μm.



Σχήμα 1. α) Γράφημα ανιχνευτή όπως δίνεται από τον κατασκευαστή β) Γράφημα ανιχνευτή όπως προσομοιώθηκε από τον κώδικα Monte Carlo.

Χρησιμοποιώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που δίνονται από τον κατασκευαστή προσομοιώθηκε ο ανιχνευτής HPGe αλλά και η σημειακή ισοτροπική πηγή για τον υπολογισμό της απόλυτης απόδοσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2β. Παρατηρείται απόκλιση από τα δεδομένα της μέτρησης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διαφορά οφείλεται σε μεταβολή της νεκρής ζώνης ιδιαίτερα της n+ επαφής. Για την ακρίβεια οφείλεται στην ύπαρξη μεταβατικής ζώνης από την νεκρή ζώνη στον ενεργό όγκο όπου τα ηλεκτρόνια δεν αποδίδουν όλη τους την ενέργεια αλλά μέρος αυτής. Επομένως δεν συνεισφέρει στην απόδοση των ολικώς απορροφημένων φωτονίων. Μεταβάλλοντας την νεκρή ζώνη παρατηρείται η καλύτερη σύμπτωση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά των προσομοιώσεων για νεκρή ζώνη 1mm στο πρόσθιο παράθυρο και 2.1 mm στην πλαϊνή κυλινδρική πλευρά. Η διαφορά της νεκρής ζώνης στο πρόσθιο παράθυρο από αυτή στο πλαϊνό του κυλίνδρου εισάγεται γιατί η νεκρή ζώνη στο πρόσθιο παράθυρο συνεισφέρει περισσότερο στην απορρόφηση φωτονίων χαμηλών ενεργειών ενώ αυτή του πλαϊνού στην απορρόφηση φωτονίων υψηλότερων ενεργειών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2γ.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι αλλάζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της νεκρής ζώνης προκύπτει σύμπτωση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά των προσομοιώσεων.



Σχήμα 2. α) Μέτρηση της απόδοσης β) Απόδοση από προσομοίωση με νεκρή ζώνη από δεδομένα κατασκευαστή (0.8 mm στην εξωτερική πλευρά του κυλίνδρου) γ) Απόδοση από προσομοίωση με νεκρή ζώνη ίση με 1 mm στο πρόσθιο παράθυρο και 2.1mm στο πλαϊνό τμήμα του κυλίνδρου.

### 2.3 Επιβεβαίωση-Έλεγχος ορθότητας προσομοίωσης

Επιπλέον ελέγχθηκε η ορθότητα της νέας θεώρησης της νεκρής ζώνης για δύο διαφορετικές γεωμετρίες δειγμάτων και τρεις διαφορετικές πυκνότητες. Χρησιμοποιήθηκαν πιστοποιημένα υλικά αναφοράς για την υλοποίηση των τριών δειγμάτων.

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν παρασκευάστηκαν με τη χρήση κυλινδρικών δοχείων ακτίνας 4 cm και ύψους 7cm, που πληρώνονται από το κατά περίπτωση πιστοποιημένο ραδιενεργό υλικό. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω τρεις γεωμετρίες δειγμάτων: α) όγκος 100ml και πυκνότητα 0.7 g/cm<sup>3</sup> β) όγκος 260 ml και πυκνότητα 1 g/cm<sup>3</sup> γ) όγκος 260 ml και πυκνότητα 1.3 g/cm<sup>3</sup>.

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

$$u_{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{1}{gps} * u_{cps}\right)^2 + \left(\frac{-cps}{gps^2} * u_{gps}\right)^2}$$

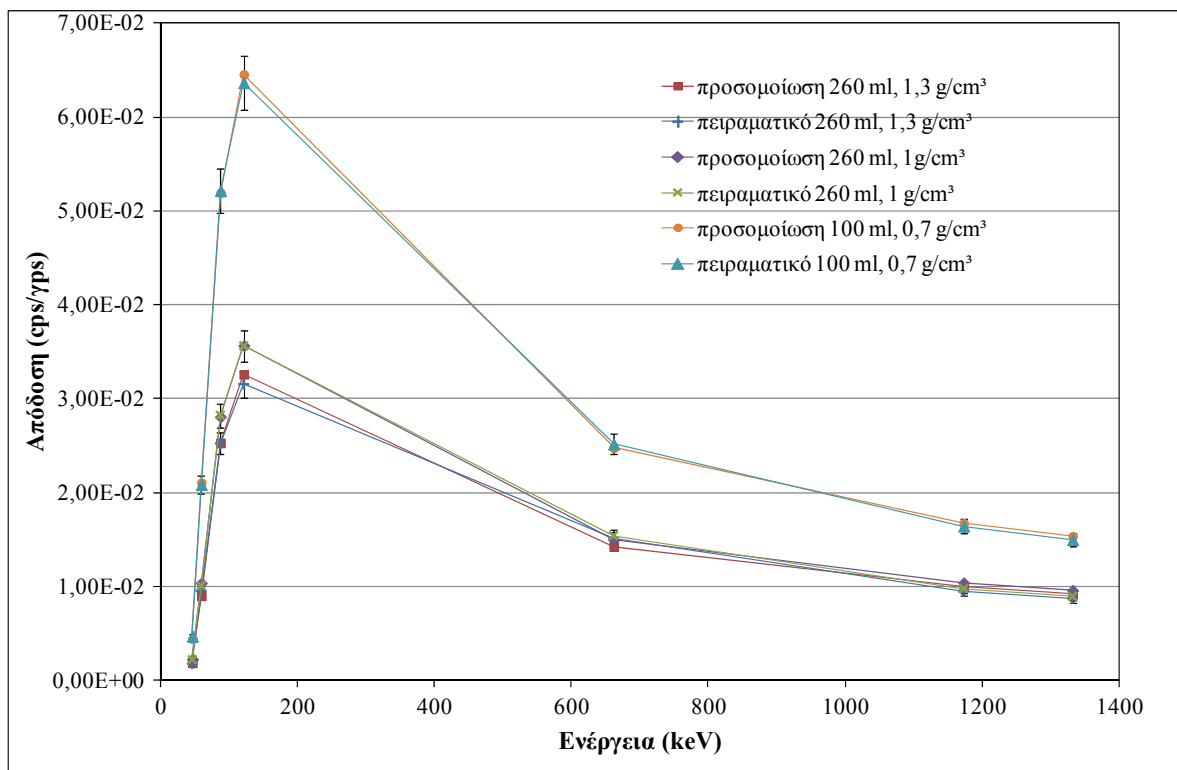
(3)

Όπου  $u_{\varepsilon}$ : Η αβεβαιότητα της απόδοσης για τη συγκεκριμένη ενέργεια.

$u_{cps}$ : Η αβεβαιότητα των καθαρών κρούσεων της φωτοκορυφής που δίνεται από το λογισμικό ανάλυσης (περιέχει την αβεβαιότητα του υποβάθρου).

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

Προσομοιώθηκαν και οι τρεις γεωμετρίες και υπολογίστηκαν οι αποδόσεις. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 3. Παρατηρείται καλή σύμπτωση των αποτελεσμάτων. Η απόκλιση στις ενέργειες των 1173 και 1332 keV οφείλεται σε φαινόμενα αθροιστικής σύμπτωσης που εμφανίζονται στην πειραματική απόδοση και δεν ελήφθησαν υπόψη στην προσομοίωση. Οι αβεβαιότητες στις προσομοιώσεις δεν τοποθετήθηκαν στο γράφημα λόγω του γεγονότος ότι οι κώδικες Monte Carlo δεν υπολογίζουν ορθότητα αλλά πιστότητα του αποτελέσματος. Είναι προφανές ότι η πιστότητα είναι πολύ μικρή, μικρότερη του 0.1%.



Σχήμα 3. Σύγκριση υπολογισμένης απόλυτης απόδοσης από πειραματικές μετρήσεις και προσομοιώσεις για 3 διαφορετικές γεωμετρίες: α) όγκος 100ml και πυκνότητα 0.7g/cm<sup>3</sup> β) όγκος 260ml και πυκνότητα 1g/cm<sup>3</sup> γ) όγκος 260 ml και πυκνότητα 1.3 g/cm<sup>3</sup>. Παρουσιάζονται και οι τυπικές αβεβαιότητες των πειραματικών μετρήσεων.

Ευαγόρας Στέλιος, Κλούβας Αλέξανδρος, ΑΤΕΙΘ, ΑΠΘ  
Βαθμονόμηση ανιχνευτών HPGe με τεχνικές Monte Carlo.

Τα αποτελέσματα φαίνονται και στον επόμενο πίνακα 1, όπου εκτός των άλλων εμφανίζεται και η σχετική απόκλιση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων από τις πειραματικές τιμές και για τις τρεις γεωμετρίες δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 1. Σύγκριση πειραματικών αποδόσεων και αποδόσεων προσομοιώσεων για διαφορετικές γεωμετρίες μετρουμένου δείγματος.

Ενέργεια (keV)	Πειραμ. απόδοση 100ml, 0.7 g/cm <sup>3</sup> (cps/γps)	Απόδοση προσομ. 100ml, 0.7 g/cm <sup>3</sup> (cps/γps)	Από- κλιση 100ml, 0.7g/cm <sup>3</sup> (%)	Πειραμ. απόδοση 260ml, 1 g/cm <sup>3</sup> (cps/γps)	Απόδοση προσομ. 260ml, 1 g/cm <sup>3</sup> (cps/γps)	Από- κλιση 260ml, 1 g/cm <sup>3</sup> (%)	Πειραμ. απόδοση 260ml, 1,3g/cm <sup>3</sup> (cps/γps)	Απόδοση προσομ. 260ml, 1,3 g/cm <sup>3</sup> (cps/γps)	Από- κλιση 260ml, 1,3g/cm <sup>3</sup> (%)
46,5	0,0047	0,0044	-5,9	0,0022	0,0022	2,7	0,0018	0,0019	5,7
59,5	0,0209	0,0211	1,0	0,0101	0,0104	3,0	0,0095	0,0090	-5,2
88	0,0522	0,0519	-0,4	0,0282	0,0281	-0,6	0,0252	0,0253	0,2
122	0,0636	0,0645	1,4	0,0356	0,0356	0,1	0,0315	0,0326	3,4
661,6	0,0252	0,0248	-1,7	0,0154	0,0150	-2,8	0,0151	0,0143	-5,4
1173,2	0,0164	0,0167	1,9	0,0098	0,0104	6,4	0,0095	0,0100	5,7
1332,5	0,0150	0,0154	2,4	0,0089	0,0096	7,2	0,0087	0,0092	6,1

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η γεωμετρία με την βελτιστοποιημένη θεώρηση της νεκρής ζώνης είναι αυτή που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα και άρα αυτή που πρέπει να υιοθετηθεί. Επιπλέον, έχοντας το σωστό μοντέλο του ανιχνευτή είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι αποδόσεις για διάφορες γεωμετρίες δειγμάτων προσομοιώνοντας μόνο την γεωμετρία του δείγματος.

### 3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένας τρόπος βαθμονόμησης ανιχνευτή HPGe με τη χρήση μόνο μίας πιστοποιημένης σημειακής πηγής με φωτοκορυφές σε ένα εύρος ενεργειών και τεχνικών Monte Carlo. Πιο συγκεκριμένα προτείνεται ένας τρόπος υπολογισμού της απόλυτης απόδοσης για διαφορετικές γεωμετρίες δειγμάτων χωρίς την χρήση προτύπων πηγών με την ίδια γεωμετρία του προς μέτρηση δείγματος.

Προτείνεται μεταβολή των χαρακτηριστικών του ανιχνευτή στο κομμάτι της νεκρής ζώνης από αυτά που δίνονται από τον κατασκευαστή.

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

Παρατηρήθηκε ταύτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά των προσομοιώσεων και για άλλες γεωμετρίες. Ελέγχθηκε και υπήρξε καλή ταύτιση αποτελεσμάτων για τρεις διαφορετικές γεωμετρίες δειγμάτων. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά.



Ως εκ τούτου είναι προφανές ότι είναι πλέον εφικτός ο υπολογισμός απόδοσης για άγνωστες γεωμετρίες δειγμάτων χωρίς εκτεταμένη χρήση πιστοποιημένων πηγών παρά μόνο με προσομοιώσεις Monte Carlo.

#### 4. Ευχαριστίες

Η παραπάνω έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (European Social Fund - ESF) και εθνικούς πόρους στα πλαίσια του επιχειρησιακού προγράμματος "Εκπαίδευση και δια βίου μάθηση" του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: ΘΑΛΗΣ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου. Έργο του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος: "LENSER"

#### 5. Βιβλιογραφία

- Αντωνόπουλος-Ντόμης Μ. "Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία", 2005, εκδόσεις Ζήτη.
- Blaauw M. "Calibration of the well-type germanium gamma-ray detector employing two gamma-ray spectra", Nucl. Instr. and Meth. A, 419, pp. 146-153, 1998.
- Briesmeister J. "MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", 2000, Los Alamos National Laboratory
- Clouvas A., Xanthos S., Antonopoulos-Domis M., Silva J. "Monte-Carlo based method for conversion of in-situ gamma-ray spectrum obtained with portable Ge detector to incident photon flux energy distribution", Health Phys., 74, pp. 216-230, 1998.
- Gelsema S.J, Blaauw M. "Geometry effects in well-type Ge-detectors due to the introduction of high-Z linings", Nucl. Instr. and Meth. A, 368, pp. 410-415, 1996.
- Gilmore G., Hemingway J.D. "Practical Gamma-ray Spectrometry", 1995, Wiley.
- Herold L.K., Kouzes R.T. "Intrinsic germanium detector efficiency calculations", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-38, pp. 231-238, 1991.
- Kambo S., Kahn B. "Evaluation of Monte Carlo Simulation of Photon Counting Efficiency for Germanium Detectors" Health Phys., 70, pp. 512-519, 1996.
- Knoll G. "Radiation Detection and Measurement", 2010, Wiley.
- Korun M., Likar A., Vidmar T. "Monte-Carlo calculation of the spatial dependence of the coaxial HPGe detector efficiency for point sources", Nucl. Instr. and Meth. A 390, pp. 203-208, 1997.
- Lepy MC, Altzitzoglou T, Arnold D, Bronson F, Capote Noy R., Decombaz M, De Corte F, Edelmaier R., Herrera Peraza E., Klemola S., Korun M., Kralik M., Neder H., Plagnard J., Pomme S., de Sanoit J., Sima O., Ugletveit F., Van Velzen L., Vidmar T., "Intercomparison of efficiency transfer software for gamma-ray spectrometry", Appl. Radiat. Isot. 55, pp. 493-502, 2001
- Sima O. "Accurate calculation of total efficiency of Ge well-type detectors suitable for efficiency calibration using common standard sources", Nucl. Instr. and Meth. A, 450, pp. 98-108, 2000.