

# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΛΟΓΩ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ $\gamma$ -ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ

Μ. Νικολάκη, Κ. Ποτηριάδης  
Τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας  
Τ.Θ. 60092, 15310 Αγία Παρασκευή  
e-mail: marnikol@eeae.gr

## Περίληψη

Η  $\gamma$ -φασματοσκοπική ανάλυση ενός δείγματος, το οποίο μετράται σε ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου σε άμεση επαφή με τον κρύσταλλο, μπορεί να επιρραστεί από σφάλματα λόγω πραγματικής σύμπτωσης, τα οποία προκύπτουν όταν δύο ή περισσότερα φωτόνια εκπέμπονται σε σύμπτωση εντός του διακριτικού χρόνου του ανιχνευτικού συστήματος.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση παραγόντων διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης για νουκλίδια, τα οποία απαντώνται σε περιβαλλοντικά δείγματα ή σε ασκήσεις διαβαθμονόμησης. Κατ' αρχήν πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός των συναρτήσεων απόδοσης φωτοκορυφής και ολικής απόδοσης για το πρότυπο κυάθιο στο οποίο συσκευάζονται τα δείγματα του Τμήματος Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της ΕΕΑΕ χρησιμοποιώντας μετρήσεις σημειακών πηγών μονοενεργειακών ή σχεδόν μονοενεργειακών νουκλιδίων σε διαφορετικές αποστάσεις από τον κρύσταλλο και θεωρώντας ότι η πηγή αντιπροσωπεύει στρώμα υλικού ίσης ενεργότητας. Ακολούθως, εκτιμήθηκαν οι παράγοντες διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης για τις κυριότερες ενέργειες βασικών ραδιονουκλιδίων και, τέλος, συγκρίθηκαν με τις τιμές που προβλέπονται για τους παράγοντες αυτούς από τον υπολογιστικό κώδικα CCCC, ο οποίος βασίζεται σε προσομοίωση της ανιχνευτικής διάταξης και της γεωμετρίας μέτρησης του δείγματος.

Η διαφορά μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν στην εργασία σε σχέση με τον κώδικα CCCC δεν ξεπέρασε το 2.5% και αποτελεί δείγμα ότι η προσδιορισθείσα ολική απόδοση είναι πολύ κοντά με αυτήν που προκύπτει από την προσομοίωση. Κατά την χρήση του κώδικα κατέστη σαφές ότι είναι πολύ σημαντικό για την εφαρμογή του να προσδιοριστεί με ακρίβεια το πάχος του νεκρού στρώματος στην επιφάνεια του κρυστάλλου, διότι επιρραάζει σε μεγάλο βαθμό τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών.

*Λέξεις-Κλειδιά:  $\gamma$ -φασματοσκοπία, πραγματική σύμπτωση, κώδικας CCCC*

## Abstract

Gamma spectroscopic analysis of a sample measured in a high purity germanium detector in direct contact with the crystal may be influenced by errors due to true summing coincidence. Errors arise when two or more photons are emitted in coincidence within the discrimination time of the detection system.

The scope of this work is to estimate the true coincidence summing correction factors for nuclides found in environmental samples or in intercalibration exercises. The photopeak and total efficiency functions for the standard box used for samples in the Department of Environmental Radioactivity of GAEC were determined using measurements conducted with point sources of single energy nuclides placed at various distances from the surface

Μ. Νικολάκη, Κ. Ποτηριάδης, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας  
Εκτίμησης συντελεστών διόρθωσης λόγω πραγματικής σύμπτωσης στην  $\gamma$ -φασματοσκοπία

of the crystal, assuming that the point source represents a layer of material of equal activity. Then, the true coincidence summing correction factors were estimated for the main energies of some basic radionuclides and, finally, they were compared to the correction factors predicted by the computational code CCCC that is based on a simulation of the detector and the sample measurement geometry. The differences arising did not exceed 2.5% serving as evidence that the calculated total efficiency is close to that resulting from the simulation. Implementation of the CCCC code showed that the accurate determination of the dead layer on the surface of the crystal is essential, because the thickness influences low energy photon detection.

*Keywords: gamma spectroscopy, true coincidence, code CCCC*

## 1. Εισαγωγή

Ως πραγματική σύμπτωση (true coincidence) ορίζεται το φαινόμενο της διαδοχικής εκπομπής δύο ή και περισσότερων φωτονίων του ίδιου κλάδου διάσπασης του πυρήνα ενός ισοτόπου και η ταυτόχρονη ανίχνευση αυτών λόγω αντικειμενικής αδυναμίας της ανιχνευτικής διάταξης. Η αποτύπωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης κατά την  $\gamma$ -φασματοσκοπική ανάλυση δείγματος στο εξαγόμενο φάσμα, πραγματοποιείται ταυτόχρονα μέσω της μείωσης της επιφάνειας των φωτοκορυφών που αντιστοιχούν στα διαδοχικά εκπεμπόμενα φωτόνια (summing out), μέσω της αύξησης της επιφάνειας της φωτοκορυφής, η οποία αντιστοιχεί στην αθροισμένη ενέργεια (summing in), ή μέσω της αύξησης των κρούσεων που ανήκουν στο συνεχές υπόστρωμα.

Το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης επηρεάζει τον μηχανισμό ανίχνευσης φωτονίων και καταγραφής κρούσεων στην ανιχνευτική διάταξη επιδρώντας στην επιφάνεια φωτοκορυφής και αποτελεί πηγή συστηματικού σφάλματος στον ποσοτικό προσδιορισμό του δείγματος. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται από τους De Felice et al. (2002), για ανιχνευτή σχετικής απόδοσης 15% το σφάλμα μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 20-50% για γεωμετρικές πηγές τοποθετημένης κοντά στον ανιχνευτή και μεταξύ 5-10% για πηγές όγκου. Το σφάλμα μπορεί μάλιστα να αυξηθεί εξαιρετικά (έως και 100-500%) σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται ανιχνευτές τύπου n, ανιχνευτές τύπου φρέατος ή ανιχνευτές υψηλής σχετικής απόδοσης (De Felice et al., 2002). Με δεδομένη την αυξανόμενη χρήση ανιχνευτών υψηλής απόδοσης, η επίδραση των φαινομένων πραγματικής σύμπτωσης μπορεί εύκολα να καταστήσει ακατόρθωτη την επίτευξη ακρίβειας της τάξης του 10%, ακόμα κι αν γίνονται πολύ καλές βαθμονομήσεις και άλλες σημαντικές διορθώσεις, όπως για την αυτοαπορρόφηση.

Οι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν την ένταση εμφάνισης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, μπορούν να διαχωριστούν σε παράγοντες οι οποίοι εξαρτώνται από την ραδιενεργό πηγή (διάγραμμα διάσπασης ισοτόπου, χρόνος ημιζωής ενδιάμεσων σταθμών ενέργειας του πυρήνα, ποσοστά εκπομπής φωτονίων, είδος διάσπασης) και σε παράγοντες, οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι αυτής (χαρακτηριστικά και απόδοση ανιχνευτικής διάταξης, παράθυρο ανιχνευτή, γεωμετρία πηγής, στερεά γωνία πηγής – ανιχνευτή). Ο προσδιορισμός των συντελεστών διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης μπορεί να γίνει θεωρητικά, ημιεμπειρικά, πειραματικά ή με χρήση κωδίκων προσομοίωσης.

Η εφαρμογή των θεωρητικών μεθόδων συνίσταται στην εξαγωγή μιας σειράς περιοδικά επαναλαμβανόμενων εξισώσεων που επιτρέπουν τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης για ένα οποιοδήποτε διάγραμμα διάσπασης. Μια πρώτη προσέγγιση αποτελεί η γενική μέθοδος που έχει προταθεί από τους Andreev et al. (1972, 1973) και έχει υποστεί

βελτιώσεις από τους Mc Callum and Coote (1975). Επέκταση των παραπάνω μελετών είναι η μέθοδος που έχει αναπτυχθεί από τους Semkow et al. (1990) ενώ υπάρχουν και πολλές μεταγενέστερες προσεγγίσεις (Jutier et al. (2007), Tomarchio και Rizzo (2011)). Οι περισσότερες εμπειρικές μέθοδοι βασίζονται στην αρχή που περιγράφεται από τους Moens et al. (1981) (Moens and Hoste, 1983; Herrera et al., 1995; Piton et al., 2000) ότι η πιθανότητα ανίχνευσης ενός φωτονίου με την πλήρη ενέργειά του εξαρτάται μόνο από την ενέργεια του φωτονίου, δηλαδή είναι ανεξάρτητη από γεωμετρικούς παράγοντες. Οι βασικές διαφορές μεταξύ των διαφόρων ημιεμπειρικών μεθόδων έγκεινται στην μέθοδο υπολογισμού της ενεργού στερεάς γωνίας. Εν γένει, οι κώδικες αυτοί είναι εύκολοι στην εφαρμογή και τα αποτελέσματα λαμβάνονται πολύ γρήγορα. Ημιεμπειρικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί από τους Lépy et al. (2001), Wolterbeek et al. (2000), Quintana και Fernandez (1995), ενώ με τις πηγές όγκου έχουν ενασχοληθεί οι Kolotov et al. (1996) και οι Kolotov and Koskelo (1998).

Οι προτεινόμενες πειραματικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης έχουν σαν κύριο άξονα την σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ πηγών που εμφανίζουν το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης και πηγών οι οποίες δεν το εμφανίζουν. Ενδεικτικά αναφέρεται ο υπολογισμός διορθώσεων σε ανιχνευτική διάταξη Ge(Li) από τους Debertin και Schötzig (1978) και οι υπολογισμοί σε ανιχνευτές HPGe (Lepy, 2007 και Lepy et al., 2006; De Felice et al. (2000, 2002); Semkow et al. (1990)).

Για την αντιμετώπιση των φαινομένων πραγματικής σύμπτωσης και τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης έχουν επίσης προταθεί μέθοδοι που κάνουν χρήση κωδικών Monte Carlo. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας μεθόδου αναπτύχθηκε από τους O.Sima και D.Arnold (1996) σε συνέχεια προηγούμενων μελετών τους (Sima, 1990 και 1995) υπό την μορφή του λογισμικού GESPECOR (Germanium Spectrometry Correction factors). Στην εργασία των Decombaz et al. (1992) ο Monte Carlo κώδικας GEANT, που έχει αναπτυχθεί στο CERN, χρησιμοποιήθηκε για τη διόρθωση των επιδράσεων coincidence summing σε πηγές όγκου, ενώ στην εργασία των Wang et al. (2002) οι συντελεστές διόρθωσης για την περίπτωση σημειακής πηγής υπολογίστηκαν με χρήση του κώδικα MCNP. Ένας αναλυτικός αλγόριθμος για διόρθωση πραγματικής σύμπτωσης ακτίνων  $\gamma$  αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στο λογισμικό του Canberra Genie 2000 το 2001 από τους Zhu et al. (2009). Τέλος, βάσει της εργασίας των Blaauw και Gelsema (2003), αναπτύχθηκε ο κώδικας CCCC (Vidmar and Likar; 2005, Vidmar and Korun; 2006, Vidmar and Kanisch; 2010).

## 2. Μεθοδολογία

Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε είναι υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe, Canberra) και έχει απόδοση 70%. Οι πρότυπες πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής και της ολικής απόδοσης ήταν 7 σημειακές πηγές (Am-241, Co-57, Co-60, Cs-137, Hg-203, Mn-54, Y-88), ώστε να καλύπτεται το ενεργειακό φάσμα από 59-1836 keV. Οι πηγές τοποθετήθηκαν εντός πρότυπου κυαθίου σε διάφορες αποστάσεις από τον πυθμένα του δοχείου, και συγκεκριμένα σε αποστάσεις 0, 12.8, 25.5, 38.3 και 55 mm. Στην συνέχεια, το κυάθιο πληρώθηκε με αλεύρι. Κατά την τοποθέτηση, επιδιώχθηκε η πηγή να τοποθετείται όσο το δυνατόν σε συμμετρική θέση πάνω στον κεντρικό άξονα του ανιχνευτή για την αποφυγή σφαλμάτων που σχετίζονται άμεσα με τη γεωμετρία της μέτρησης. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η λήψη μετρήσεων και η ανάλυση των φασμάτων. Η πυκνότητα του υλικού (αλεύρι) που χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση του κυαθίου είναι 0.83 g/ml.

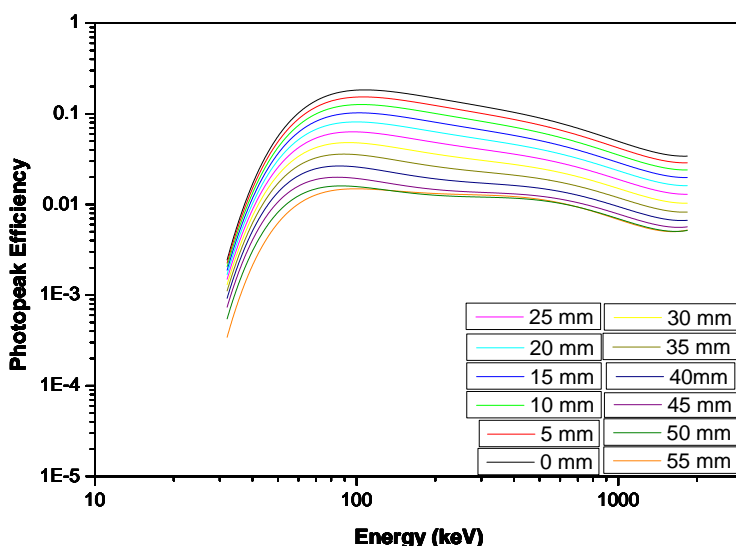
### 3. Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής και ολικής απόδοσης κυαθίου

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις πέντε θέσεις για την πηγή εντός του κυαθίου (0, 12.8, 25.5, 38.3 και 55 mm), όταν το κυάθιο γεμίζεται με αλεύρι, παριστάνεται γραφικά η απόδοση για κάθε ενέργεια συναρτήσει της απόστασης από τον κρύσταλλο. Από τα διαγράμματα που προκύπτουν με προσαρμογή της κατάλληλης καμπύλης, μπορεί να υπολογιστεί η απόδοση ενός κυαθίου γεμισμένου με υλικό κατάλληλης πυκνότητας, ανεξάρτητα με τον όγκο του. Τα χαμηλότερα στρώματα του κυαθίου είναι εκείνα τα οποία συνεισφέρουν κατά κύριο λόγο στην απόδοσή του, διότι καθώς απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του κρυστάλλου η απόδοση φωτοκορυφής μειώνεται. Μπορούμε να υπολογίσουμε θεωρητικά την απόδοση που προκύπτει για ένα κυάθιο γεμισμένο με αλεύρι μέχρι ύψους h:

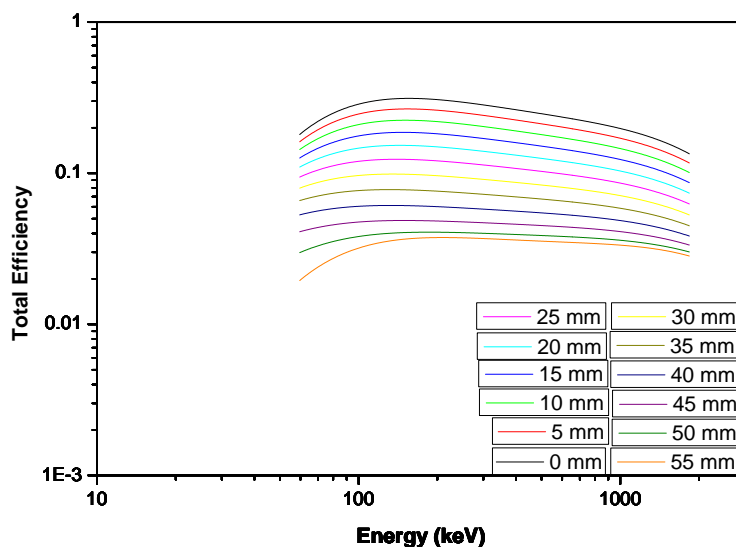
$$eff(h) = \frac{\int_0^h eff(h)dh}{\int_0^h dh}$$

Η απόδοση σταθερά υπερτιμάται, ιδιαίτερα στην περιοχή των μέσων ενεργειών, όπου η αυτοαπορρόφηση παίζει σημαντικό ρόλο. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αρχική παραδοχή ότι η τοποθέτηση σημειακής πηγής στον κεντρικό άξονα ισοδυναμεί με την ύπαρξη ενός στρώματος αντίστοιχης ενεργότητας. Όλα τα σημεία ενός στρώματος δεν έχουν την ίδια απόδοση, αφού μεταβάλλεται η στερεά γωνία υπό την οποία βλέπει κάθε σημείο τον ανιχνευτή. Στην πραγματικότητα, το σημείο στο οποίο στα πειράματά μας έχει τοποθετηθεί η πηγή, έχει την μέγιστη απόδοση, με αποτέλεσμα την υπερτίμηση της απόδοσης του συγκεκριμένου στρώματος. Ομοίως προς την διαδικασία που ακολουθήθηκε για την απόδοση φωτοκορυφής, υπολογίζουμε την ολική απόδοση για κάθε ενέργεια σε ορισμένο ύψος από την επιφάνεια του κρυστάλλου.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες απόδοσης φωτοκορυφής και ολικής απόδοσης.



Σχήμα 1: Συνάρτηση απόδοση φωτοκορυφής σε διάφορα ύψη από την επιφάνεια του κρυστάλλου.



Σχήμα 2: Συνάρτηση ολικής απόδοσης σε διάφορα ύψη από την επιφάνεια του κρυστάλλου.

#### 4. Υπολογισμός παραγόντων διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα επιχειρήσουμε να υπολογίσουμε παράγοντες διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης για ορισμένα ισότοπα τα οποία απαντώνται συχνά σε περιβαλλοντικές μετρήσεις ή σε δείγματα για ενεργειακή βαθμονόμηση ανιχνευτών γερμανίου. Έχουν επιλεγεί μερικές αντιπροσωπευτικές ενέργειες και οι τύποι υπολογισμού οι οποίοι παρατίθενται έχουν ληφθεί από την βιβλιογραφία (Tomarchio et Rizo; 2011). Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις την απόδοση φωτοκορυφής και την ολική απόδοση όπως υπολογίστηκαν από τα Σχήματα 1 και 2, μπορούν να υπολογιστούν οι παράγοντες διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης για τις κορυφές του ισότοπου για κάθε απόσταση  $h$  από την επιφάνεια του κρυστάλλου. Προκειμένου να προσδιοριστεί ο τελικός παράγοντας διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης για όλο το κυάθιο, πραγματοποιείται αναλυτική ολοκλήρωση της καμπύλης.

Από τις τιμές που προκύπτουν για τους παράγοντες διόρθωσης σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του κρυστάλλου για τα διάφορα ισότοπα παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγάλη διακύμανση της τιμής τους εντός του κυαθίου. Σε ορισμένα ισότοπα αυτή η διακύμανση μεταξύ πυθμένα και κορυφής κυαθίου μπορεί να φθάνει ή ακόμη και να ξεπερνά και το 50%. Καθώς απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του κρυστάλλου, ο παράγοντας τείνει προς την μονάδα. Θεωρητικά, δηλαδή, τοποθετώντας το δείγμα σε απόσταση από την επιφάνεια του κρυστάλλου, η συμβολή του φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης εξασθενεί και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Σε μία τέτοια γεωμετρία μέτρησης, όμως, ελαττώνεται σημαντικά η απόδοση κυαθίου, με αποτέλεσμα να απαιτούνται πολύ μεγάλοι χρόνοι μέτρησης για περιβαλλοντικά δείγματα.

Ο υπολογιστικός κώδικας συντελεστών διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης CCCC παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Περιορίζεται αποκλειστικά σε ανιχνευτές HPGe και σε κυλινδρικά δείγματα συμπεριλαμβανομένων και σημειακών πηγών)
- Υποτίθεται η ύπαρξη αξονικής συμμετρίας, εκτός από την περίπτωση πιθανής μετατόπισης (κακής ευθυγράμμισης) του κρυστάλλου του ανιχνευτή

- Μπορούν να παραμετροποιηθούν το σχήμα του κρυστάλλου και ένας απορροφητής
- Το περιβάλλον εργασίας είναι Excel workbook
- Χρησιμοποιεί το αρχείο δεδομένων πυρηνικών διασπάσεων KORDATEN (βιβλιοθήκη με δεδομένα από το Nucleide), το οποίο έχει ενημερωθεί σύμφωνα με τις συνιστώμενες τιμές από το DDEP (Decay Data Evolution Project).
- Λαμβάνονται υπ' όψιν δύο K ακτίνες-X
- Δεν εφαρμόζονται διορθώσεις για τις L ακτίνες-X
- Λαμβάνονται υπ' όψιν τα φωτόνια εξαϋλώσης
- Η χωρική διακύμανση της απόδοσης αντιμετωπίζεται μέσω της προσέγγισης της καμπύλης LS.
- Χρησιμοποιεί πεπερασμένη ανάλυση 1 keV στο φάσμα
- Ο χρόνος εκτέλεσης του κώδικα είναι λίγα δευτερόλεπτα ανά νουκλίδιο
- Δεν απαιτείται πειραματικός προσδιορισμός της απόδοσης

Εισάγοντας στον κώδικα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή και τα στοιχεία για το πρότυπο κυάθιο, καθώς και τις ενεργούς διατομές αλληλεπίδρασης των φωτονίων για το υλικό πλήρωσης του κυαθίου μπορούν να υπολογιστούν για κάθε ισότοπο οι παράγοντες διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης. Στην προσομοίωση είναι πολύ σημαντικό να οριστεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το πάχος του νεκρού στρώματος στην επιφάνεια του κρυστάλλου (dead layer). Το νεκρό στρώμα στην πραγματικότητα επεκτείνεται πέραν του πάχους που αναφέρει ο κατασκευαστής λόγω της παρουσίας και ενός μεταβατικού στρώματος που ακολουθεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απόδοση στις χαμηλές ενέργειες, για την ανιχνευτική διάταξη του εργαστηρίου στη περιοχή κάτω των 50 keV, να μειώνεται ραγδαία και κατ' ουσίαν σε ενέργειες κάτω των 30 keV να είναι σχεδόν μηδενική. Για τον ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία, ο κατασκευαστής παρέχει ως πάχος 0.5 mm, λόγω όμως του μεταβατικού στρώματος που ακολουθεί, όπου η απόδοση του κρυστάλλου είναι πολύ χαμηλή, εκτιμάται ότι το νεκρό στρώμα του ανιχνευτή είναι 0.8 mm.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραγόντων διόρθωσης για μια σειρά ραδιονουκλιδίων όπως υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία και όπως προέκυψαν με την εφαρμογή του CCCC. Παρατηρούμε ότι οι παράγοντες διόρθωσης που υπολογίζονται για το κυάθιο των 260 mL για τα ισότοπα και τις ενέργειες που έχουν επιλεγεί είναι μεγαλύτεροι από την μονάδα, διότι κυριαρχεί το φαινόμενο του summing out. Οι διορθώσεις κυμαίνονται από σχεδόν μηδενικές, όπως για τον Pb-214, και φθάνουν έως περίπου 25%.

Συγκρίνοντας τις τιμές βλέπουμε ότι οι διαφορές δεν ξεπερνούν το 2.5%. Οι διαφορές αποδίδονται στο γεγονός ότι ο κώδικας λαμβάνει υπ' όψιν περισσότερες περιπτώσεις σύμπτωσης φωτονίων σε κάθε ενέργεια από ότι οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν εδώ. Δεδομένου ότι το φαινόμενο του summing out είναι αυτό που κυριαρχεί στην πραγματική σύμπτωση, λιγότερες συμπτώσεις φωτονίων σημαίνουν ότι υποτιμάται το φαινόμενο του summing out και οι παράγοντες διόρθωσης δίνουν χαμηλότερες τιμές στην προσέγγισή μας. Ακόμη, σημειώνεται ότι ο κώδικας συμπεριλαμβάνει και διορθώσεις για τα φωτόνια εξαϋλώσης. Παρ' όλο που εξετάζονται και περιπτώσεις νουκλιδίων με περίπλοκα διαγράμματα διάσπασης, όπου παίζει σημαντικό ρόλο το πλήθος των περιπτώσεων μεταπτώσεων που λαμβάνουν χώρα και που μπορούν να συμπεριληφθούν στις διορθώσεις, οι διαφορές με το CCCC παραμένουν μικρές.

Πίνακας 1: Σύγκριση παραγόντων διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης για το κιάθιο 260 mL με πυκνότητα 0.83 g/cm<sup>3</sup>.

Ενέργεια (keV)	Παράγοντας Διόρθωσης		%
	Πειραματικά	CCCC	
Ba-133			
81	1.133	1.149	-1.44
302.9	1.028	1.042	-1.33
356.0	1.023	1.035	-1.22
Bi-214			
609.3	1.099	1.119	-1.78
1120.3	1.125	1.130	-0.40
1764.5	0.997	1.002	-0.47
Cs-134			
563.2	1.251	1.268	-1.37
569.3	1.252	1.266	-1.12
604.7	1.139	1.152	-1.10
795.8	1.144	1.150	-0.52
801.9	1.227	1.241	-1.12
Eu-152			
121.8	1.117	1.144	-2.41
244.7	1.182	1.201	-1.62
344.3	1.079	1.092	-1.23
778.9	1.135	1.132	0.26
964.1	1.093	1.089	0.34
1112.1	1.062	1.054	0.75
1408.0	1.071	1.066	0.46
Pb-214			
295.2	0.999	0.999	9E-03
351.9	1.001	1.001	9E-03
Tl-208			
583.2	1.098	1.147	-4.46
2614.6	1.164	1.173	-0.77
Y-88			
898.0	1.071	1.095	-2.22
1836.1	1.101	1.108	-0.66

## 5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία προσδιορίστηκαν οι συναρτήσεις απόδοσης φωτοκορυφής και ολικής απόδοσης για το πρότυπο κυάθιο στο οποίο συσκευάζονται τα δείγματα του Τμήματος Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της ΕΕΑΕ χρησιμοποιώντας μετρήσεις σημειακών πηγών μονοενεργειακών ή σχεδόν μονοενεργειακών νουκλιδίων σε διαφορετικές αποστάσεις από τον κρύσταλλο και θεωρώντας ότι η πηγή αντιπροσωπεύει στρώμα υλικού ίσης ενεργότητας.

Ακολουθώς, εκτιμήθηκαν οι παράγοντες διόρθωσης πραγματικής σύμπτωσης για τις κυριότερες ενέργειες βασικών ραδιονουκλιδίων για πρότυπο κυάθιο, εισάγοντας την απόδοση που υπολογίστηκε στο πρώτο μέρος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση φωτοκορυφής η οποία υπερτιμήθηκε παίζει μικρό ρόλο στις διορθώσεις, λόγω του ότι υπεισέρχεται μόνο σε περίπτωση summing in.

Τέλος, οι παράγοντες διόρθωσης συγκρίθηκαν με τις τιμές που προβλέπονται από τον υπολογιστικό κώδικα CCCC, ο οποίος βασίζεται σε προσομοίωση της ανιχνευτικής διάταξης και της γεωμετρίας μέτρησης του δείγματος. Η διαφορά μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν στην εργασία σε σχέση με τον κώδικα δεν ξεπέρασε το 2.5% και αποτελεί δείγμα ότι η προσδιορισθείσα ολική απόδοση είναι πολύ κοντά με αυτήν που προκύπτει από την προσομοίωση. Κατά την χρήση του κώδικα κατέστη σαφές ότι είναι πολύ σημαντικό για την εφαρμογή του να προσδιοριστεί με ακρίβεια το πάχος του νεκρού στρώματος στην επιφάνεια του κρυστάλλου, διότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών.

## 6. Βιβλιογραφία

- Andreev D.S., Erokhina K.I., Zvonov V.S. and Lemberg I.Kh, Instr. Exp. Tech. USSR (English transl.) 15 (1972) 1358.
- Andreev D.S., Erokhina K.I., Zvonov V.S. and Lemberg I.Kh, Bull. Acad. Sci. USSR Phys. Ser. (English transl.) 37 (8) (1973) 41.
- Blaauw M., Gelsema S.J., Cascade summing in gamma-ray spectrometry in marinelli-beaker geometries: the third efficiency curve, *Nucl. Instrum Meth. A* **505** (2003) 311.
- Decombaz M., Gostely J.J. and Laedermann J.P., Coincidence-summing corrections for extended sources in gamma-ray spectrometry using Monte Carlo simulation, *Nucl. Instrum Meth. A* **312** (1992) 152.
- Debertin K., Schötzig U., Nuclear Instruments and Methods 158 (1979) 471.
- De Felice P., Angelini P., Fazio A., Biagini R., Fast procedures for coincidence-summing correction in g-ray spectrometry, *Appl. Radiat. Isot.* **52** (2000) 745.
- De Felice P., Angelini P., Fazio A., Capogni M., A national Campaign for Coincidence-Summing Correction in  $\gamma$ -Ray spectrometry, *Appl. Radiat. Isot.* **56** (2002) 117.
- Herrera, E.F., Perdome, A., Garcia, C., Montero, M.E., Soto, L., Geometric correction of the efficiency to total absorption peak in semiconductor detector using numerical integration. Regional Workshop of the k0 method and other parametric methods in NAA, Lima, Peru, March 13–24 (1995) ARCAL-IV, RLA/2/003.
- Jutier C., Gross P., Le Petit G., A new synthetic formalism for true coincidence summing calculations, *Nucl. Instrum Meth. A* **580** (2007) 1344.
- Kolotov V.P., Atrashkevich V.V., Gelsema S.J., Estimation of true coincidence corrections for voluminous sources, *J. Radioanal. Nucl. Ch. Ar.* 210 (1996) 183.
- Kolotov V. P., Koskelo M. J., Testing of different true coincidence correction approaches for gamma-ray spectrometry of voluminous sources, *J. Radioanal. Nucl. Ch.* 233 (1998) 95.



- Lépy M.C., Total efficiency calibration for coincidence-summing corrections, *Nucl. Instrum Meth. A* **579** (2007) 284.
- Lépy M.C., Altitzoglou T., Arnold D., Bronson F., Capote Noy R., Décombaz M., De Corte F., Edelmaier R., Herrera Peraza E., Klemola S., Korun M., Kralik M., Neder H., Plagnard J., Pommé 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** (2001) 493.
- Lépy M.C., Brun P., Collin C., Plagnard J., Experimental validation of coincidence summing corrections computed by the ETNA software, *Appl. Radiat. Isot.* **64** (2006) 1340.
- McCallum G.J. and Cote G.E., *Nucl. Instrum Methods* **130** (1975) 189.
- Moens, L., Hoste, J., Calculation of the peak efficiency of high-purity germanium detectors, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **34** (1983) 1085.
- Moens, L., De Donder, J., Lin, Xilei, De Corte, F., De Wispelaere, A., Simonits, A., Hoste, J., Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries, *Nucl. Instrum. Methods* **187** (1981) 451.
- Piton, F., Lépy, M.C., Bé, M.M., Plagnard, J., Efficiency transfer and coincidence summing corrections for g-ray spectrometry, *Appl. Radiat. Isot.* **52** (2000) 791.
- Quintana B., Fernandez F., An Empirical Method to Determine Coincidence-Summing Corrections in Gamma Spectrometry, *Appl. Radiat. Isot.* **46** (1995) 961.
- Semkow T.M., Mehmood G., Parekh P.P., Virgil M., Coincidence Summing in Gamma-Ray Spectroscopy, *Nucl. Instrum Meth. A* **290** (1990) 437.
- Sima O., Monte Carlo simulation versus semi-empirical calculation of autoabsorption factors for semiconductor detector calibration in complex geometries, *Progr. Nucl. Energy* **24** (1990) 327
- Sima O., Applications of the Monte Carlo calculations to gammaspectrometric measurements of environmental samples, *Appl. Radiat. Isot.* **47** (1995) 919.
- Sima O., Arnold D., Self-attenuation and Coincidence-summing Corrections calculated by Monte Carlo simulations for Gamma-spectrometric measurements with well-type Germanium detectors, *Appl. Radiat. Isot.* **47** (1996) 8893.
- Vidmar, T., Likar, A., Calculation of total efficiencies of extended samples for HPGe detectors. *Nucl. Instrum. Methods*, 2005, vol. A555, p. 251-254.
- Vidmar, T., Korun, M., Calculation of "LS-curves" for coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry. *Nucl. Instrum. Methods*, 2006, vol. A556, p. 543-546.
- Vidmar, T., Kanisch, G., Intrinsic error of the point-source and the LS-curve approximations in treatment of true coincidence summing. *Appl. Radiat. Isotopes*, 2010, vol. 68, p. 1785-1788.
- Tomarchio E., Rizzo S., Coincidence-summing correction equations in gamma-ray spectrometry with p-type HPGe detectors, *Radiat. Phys. Chem.* **80** (2011) 318.
- Wang Z., Kahn B., and Valentine J.D, Efficiency Calculation and Coincidence Summing Correction of a Germanium Detector by Monte-Carlo Simulation, *IEEE* (2002) 1038.
- Wolterbeek H.T., van der Meer A.J.G.M., Dip-sticks calibration handles self-attenuation and coincidence effects in large-volume  $\gamma$ -ray spectrometry, *Nucl. Instrum Meth. A* **452** (2000) 140.
- Zhu H., Venkataraman R., Mueller W., Lamontagne J., Bronson F., Morris K., Berlizov A., X-ray true coincidence summing correction in Genie2000, *Appl. Radiat. Isot.* **67** (2009) 696.