

# ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE CARLO ΓΙΑ ΤΑ ΜΕΓΕΘΗ ΑΤΟΜΙΚΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΔΟΣΗΣ ΒΑΘΟΥΣ 10 mm ΚΑΙ 0,07 mm

Ε.Καρίνου, Π.Ασκούνης, Χ.Κυργιάκου, Γ.Κυράνος, Ε.Νιργιανάκη, Ε.Παπαδομαρκάκη,  
Β.Καμενοπούλου  
Τμήμα Δοσιμετρίας, ΕΕΑΕ, Πατριάρχου Γρηγορίου και Νεαπόλεως, Αγία  
Παρασκευή, Αττική, 15341  
e-mail: ecarinm@eeae.gr

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός της αβεβαιότητας στις μετρήσεις για τον υπολογισμό του ατομικού ισοδύναμου δόσης βάθους 10 mm και 0,07 mm ( $H_p(10)$  και  $H_p(0,07)$ ) με τη βοήθεια παθητικών ανιχνευτών θερμοφωταύγειας τοποθετημένων στα δοσιμέτρα σώματος και στα δοσιμέτρα άκρων που χρησιμοποιούνται από το Τμήμα Δοσιμετρίας της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας για την εκτίμηση της ενεργού δόσης των 11000 περίπου επαγγελματικά εκτιθέμενων σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Η αβεβαιότητα υπολογίστηκε με δύο τρόπους: με τη βοήθεια αναλυτικών τεχνικών και με τη βοήθεια τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo.

Οι κύριες πηγές της αβεβαιότητας στις περιπτώσεις μετρήσεων ατομικών δοσιμέτρων είναι η βαθμονόμηση του συστήματος (μετρητών και δοσιμέτρων), το σήμα υποστρώματος των δοσιμέτρων, η εξασθένιση του σήματος, η ενεργειακή και η γωνιακή εξάρτηση και η ακτινοβολία φυσικού υποστρώματος σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62461. Το πρότυπο αυτό αποτελεί την εφαρμογή του GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) στα μεγέθη ακτινοπροστασίας. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, η ανάλυση της αβεβαιότητας σχετίζεται με τις μετρήσεις των ατομικών δοσιμέτρων και όχι με παράγοντες που αφορούν τη χρήση του λειτουργικού μεγέθους ως εκτίμηση της ενεργού δόσης.

Με τη βοήθεια των τεχνικών προσομοίωσης μπορεί να υπολογιστεί η αβεβαιότητα των μετρήσεων των ατομικών δοσιμέτρων χρησιμοποιώντας για τον κάθε παράγοντα που επηρεάζει τη μέτρηση (input quantity) την κατανομή που παρατηρείται από τις μετρήσεις δοκιμής και όχι την υπόθεση ότι οι κατανομές των τιμών των διαφόρων παραγόντων είναι ισομερώς κατανομημένες ή συνήθεις (π.χ. κανονική κατανομή).

Τα αποτελέσματα των αβεβαιοτήτων με τους δύο παραπάνω τρόπους είναι συγκρίσιμα και το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η χρήση των τεχνικών Monte Carlo μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την επικύρωση υπολογισμών βασισμένων στη μεθοδολογία του GUM.

*Λέξεις-Κλειδιά: ατομικό δοσίμετρο, αβεβαιότητα, αναλυτικές τεχνικές, τεχνικές Monte Carlo*

## Abstract

The purpose of the present study is to estimate the uncertainty of the measurements of the personal dose equivalent in depth of 10 mm and 0,07 mm ( $H_p(10)$  and  $H_p(0,07)$ ) using passive thermoluminescent detectors placed in whole body and extremity dosimeters used by the Personal Dosimetry Department of Greek Atomic Energy Commission for the estimation of the effective dose of about 11000, occupationally exposed to ionizing radiation, workers. The uncertainty was calculated by two ways: using analytic techniques and Monte Carlo simulation techniques.

The main sources of uncertainty in the measurement of personal dosimeters are: the calibration of the system (for both readers and dosimeters), the background signal of the dosimeters, the fading, the energy and the angle dependence and the natural subtraction in accordance with the standard IEC 62461. This standard represents the application of the Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM) to radiation protection quantities. According to this standard, the analysis of the uncertainty is associated with the measurements of the personal dosimeters rather than with factors related to the use of specific operational quantity as an estimate of effective dose.

With the use of simulation techniques the uncertainty in measurement of personal dosimeters can be calculated using the distribution observed by the type test measurements for each factor that affects the measurement (input quantity), and not the assumption that the distributions of the values of the various factors are normally distributed (i.e normal distribution).

The results of the uncertainty calculation with the two above methods are comparable and this fact shows that the use of Monte Carlo techniques can be a useful tool in order to validate the calculations based on the methodology of GUM.

*Keywords: personal dosimeter, uncertainty, analytical techniques, Monte Carlo techniques*

## 1. Εισαγωγή

Κατά τη γνωστοποίηση των αποτελεσμάτων της μέτρησης μίας φυσικής ποσότητας, είναι υποχρεωτικό να υπάρχει μια ποσοτικοποίηση της ποιότητας του αποτελέσματος, έτσι ώστε όσοι το χρησιμοποιούν να μπορούν να αξιολογήσουν την αξιοπιστία του. Χωρίς μια τέτοια ένδειξη, τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν μπορούν να συγκριθούν, ούτε μεταξύ τους, ούτε με τις τιμές αναφοράς. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να υπάρχει μία διαδικασία άμεση σε εφαρμογή, εύκολα κατανοητή, και γενικά αποδεκτή για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας ως αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία είναι ο υπολογισμός και η αξιολόγηση της αβεβαιότητας.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι ο υπολογισμός της αβεβαιότητας των μετρήσεων των ατομικών δοσιμέτρων σώματος και άκρων. Τα δοσίμετρα φέρονται από τους επαγγελματίες εκτιθέμενους σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των λειτουργικών μεγεθών:  $H_p(10)$  ατομικό ισοδύναμο δόσης βάθους 10 mm,  $H_p(0,07)$  ατομικό ισοδύναμο δόσης βάθους 0,07 mm. Το μέγεθος  $H_p(10)$  αποτελεί εκτίμηση της ενεργού δόσης ενώ το μέγεθος  $H_p(0,07)$  αποτελεί εκτίμηση της δόσης του δέρματος και των άκρων. Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας στην παρούσα μελέτη γίνεται

με δύο τρόπους: με τη βοήθεια αναλυτικών τεχνικών βάση του οδηγού για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας (ISO 1995) και με Monte Carlo τεχνικές.

Η τεχνική Monte Carlo χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει θεωρητικά φαινόμενα μεταφοράς σωματιδίων μέσα στην ύλη. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (ΣΠΠ) υπολογίζεται από τα δεδομένα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που δίνονται στο πρόγραμμα σαν στοιχεία εισαγωγής, χρησιμοποιώντας τους τυχαίους αριθμούς που παράγονται.

Αντίθετα, οι αναλυτικές μέθοδοι δίνουν λύση με τη βοήθεια θεωρητικών υπολογισμών στηριζόμενες σε παραδοχές που μπορεί να μην ισχύουν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση της κανονικής κατανομής των μετρήσεων γύρω από το αποτέλεσμα μιας μέτρησης.

Έτσι ενώ στις τεχνικές προσομοίωσης γίνεται μία ενδελεχής εξέταση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων αναφορικά με την κατανομή τους για την εξαγωγή χρήσιμων στατιστικών παραμέτρων, στις αναλυτικές τεχνικές τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο για κάθε παράμετρο υποθέτοντας ότι ανήκουν σε συμμετρικές κατανομές.

## **2. Μεθοδολογία και αποτελέσματα**

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας των μετρήσεων των ατομικών δοσιμέτρων χρησιμοποιείται το πρότυπο IEC 62461, το οποίο στηρίζεται στις αρχές του Οδηγού για τον Υπολογισμό της Αβεβαιότητας (GUM 1995) σε μετρήσεις στο χώρο της ακτινοπροστασίας. Το συγκεκριμένο πρότυπο περιέχει, μεταξύ άλλων, αναλυτικό οδηγό για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας για παθητικούς ανιχνευτές, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται από το Τμήμα Δοσιμετρίας (ΤΔ) της ΕΕΑΕ.

Η γενική φιλοσοφία του οδηγού είναι ότι ο καθορισμός της αβεβαιότητας απαιτεί μεγαλύτερη προσπάθεια από την πραγματοποίηση της ίδιας της μέτρησης. Σαν αντιστάθμισμα, η διαδικασία καθορισμού της αβεβαιότητας δίνει καλύτερη εκτίμηση του μετρούμενου μεγέθους, η οποία μπορεί και να είναι διαφορετική από αυτή που αναγράφεται στο όργανο μέτρησης. Τονίζεται ότι η καλύτερη εκτίμηση της τιμής που επιθυμούμε να μετρήσουμε είναι η προσδοκώμενη τιμή της συνάρτησης κατανομής. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η διαδικασία της όλης μέτρησης.

Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε και μια τεχνική προσομοίωσης για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας των ίδιων λειτουργικών μεγεθών.

Αρχικά έγινε ανάλυση των μετρούμενων λειτουργικών μεγεθών (μεγέθη εξόδου) για να βρεθούν οι ποσότητες εκείνες που επηρεάζουν το μετρούμενο αποτέλεσμα (μεγέθη εισόδου), όπως φαίνεται στην εικόνα 1.

Να σημειωθεί ότι οι αριθμητικές τιμές των μεγεθών εισόδου και στις δύο τεχνικές (αναλυτικές και προσομοίωσης) προέρχονται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων δοκιμής (type test) που πραγματοποιούνται από το ΤΔ στο πλαίσιο των ποιοτικών ελέγχων που διενεργούνται με βάση το σύστημα ποιότητας που έχει αναπτυχθεί.



Εικόνα 1: Διαγραμματική αλληλεπίδραση των μεγεθών εισόδου και εξόδου

## 2.1 Υπολογισμός αβεβαιότητας με βάση το GUM

Στη συγκεκριμένη μελέτη, η αβεβαιότητα υπολογίστηκε για τις μετρήσεις των δοσιμέτρων σώματος, από τις οποίες προσδιορίζονται τα φυσικά μεγέθη  $H_p(10)$  και  $H_p(0,07)$ , για τις μετρήσεις δοσιμέτρων καρπού και μετρήσεις δοσιμέτρων τύπου δακτυλίδι για το μέγεθος  $H_p(0,07)$ .

Τα μεγέθη εισόδου που αναγνωρίστηκαν ότι συνεισφέρουν στην αβεβαιότητα είναι: η βαθμονόμηση του συστήματος, η γραμμικότητα, η ενεργειακή και γωνιακή εξάρτηση, η υγρασία, η επίδραση του φωτός, η εξασθένιση του σήματος, και αντίστοιχοι παράγοντες που σχετίζονται με το μετρητή (χρόνος, θερμοκρασία, φως). Υπολογίστηκε η απόλυτη τυπική αβεβαιότητα με βάση την κατανομή που θεωρείται ότι ακολουθεί καθεμία από τις παραπάνω ποσότητες.

Το αποτέλεσμα της καλύτερης εκτίμησης τη τιμής του  $H_p(10)$  και  $H_p(0,07)$  καθώς και η αβεβαιότητα δίνεται στους παρακάτω πίνακες (1,2,3,4) με βάση το IEC 62461.

Πίνακας 1: Πίνακας υπολογισμού αβεβαιότητας για το μέγεθος  $H_p(10)$  στα δοσίμετρα σώματος

Μεγέθη εισόδου	Δοσίμετρο σώματος, $H_p(10)$				Συντελεστής ευαισθησίας	Συνεισφορά αβεβαιότητας στη δόση (mSv)
	Καλύτερη εκτίμηση	Απόλυτη τυπική αβεβαιότητα	Κατανομή			
Παράγοντας βαθμονόμησης	1	0,020	Τριγωνική	5 mSv	0,102	
Γραμμικότητα	1	0,006	Ορθογώνια	5 mSv	0,029	
Ενεργειακή και γωνιακή εξάρτηση	1	0,157	Κανονική	5 mSv	0,783	
Παράγοντας προσθετικότητα	1	0,133	Ορθογώνια	5 mSv	0,664	

Ε.Καρίνου, Π.Ασκούνης, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας  
 Ανάλυση αβεβαιότητας με τη βοήθεια αναλυτικών τεχνικών και τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo για τα μεγέθη ατομικού ισοδύναμου δόσης βάθους 10 mm και 0,07 mm

σήματος					
Διόρθωση λόγω υγρασίας στα δοσίμετρα	1	0,027	Κανονική	5 mSv	0,137
Διόρθωση λόγω επιρροής του φωτός στα δοσίμετρα	1	0,002	Κανονική	5 mSv	0,008
Εξασθένιση σήματος δοσιμέτρων	1	0,023	Κανονική	5 mSv	0,117
Διόρθωση του μετρητή λόγω χρόνου	1	0,022	Κανονική	5 mSv	0,110
Διόρθωση του μετρητή λόγω θερμοκρασίας	1	0,012	Κανονική	5 mSv	0,058
Διόρθωση του μετρητή λόγω φωτός	1	0,016	Κανονική	5 mSv	0,078
Αποτέλεσμα μέτρησης	5	0,200	Κανονική	1,000	0,200
Απόκλιση λόγω μηχανολογικών επιρροών	0	0,001	Κανονική	-1	0,001
Hr(10) mSv	5	1,077			2,288
		21,5	%		

Πίνακας 2: Πίνακας υπολογισμού αβεβαιότητας για το μέγεθος Hr(0,07) στα δοσίμετρα σώματος

Δοσίμετρο σώματος, Hr(0,07)					
Μέγεθος εισόδου	Καλύτερη εκτίμηση	Απόλυτη Τυπική αβεβαιότητα	Κατανομή	Συντελεστής ευαισθησίας	Συνεισφορά αβεβαιότητας στη δόση (mSv)
Παράγοντας βαθμονόμησης	1	0,020	Τριγωνική	5 mSv	0,102
Γραμμικότητα	1	0,029	Ορθογώνια	5 mSv	0,144
Ενεργειακή και γωνιακή εξάρτηση	1	0,193	Κανονική	5 mSv	0,967
Παράγοντας προσθετικότητας σήματος	1	0,000	Ορθογώνια	5 mSv	0,000
Διόρθωση λόγω υγρασίας στα δοσίμετρα	1	0,025	Κανονική	5 mSv	0,127
Διόρθωση λόγω επιρροής του φωτός στα δοσίμετρα	1	0,021	Κανονική	5 mSv	0,103
Εξασθένιση σήματος δοσιμέτρων	1	0,027	Κανονική	5 mSv	0,133
Διόρθωση του μετρητή λόγω χρόνου	1	0,023	Κανονική	5 mSv	0,113
Διόρθωση του μετρητή λόγω θερμοκρασίας	1	0,026	Κανονική	5 mSv	0,132
Διόρθωση του μετρητή λόγω φωτός	1	0,016	Κανονική	5 mSv	0,078
Αποτέλεσμα μέτρησης	5	0,209	Κανονική	1,000	0,209

Ε.Καρίνου, Π.Ασκούνης, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας  
 Ανάλυση αβεβαιότητας με τη βοήθεια αναλυτικών τεχνικών και τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo για τα μεγέθη ατομικού ισοδύναμου δόσης βάθους 10 mm και 0,07 mm

Απόκλιση λόγω μηχανολογικών επιρροών	0	0,001	Κανονική	-1	0,001
Hr(0,07) mSv	5	1,044			2,109
		20,9	%		

Πίνακας 3: Πίνακας υπολογισμού αβεβαιότητας για το μέγεθος Hr(0,07) στα δοσίμετρα καρπού

Μέγεθος εισόδου	Δοσίμετρο καρπού Hr(0,07)				Συνεισφορά αβεβαιότητας στη δόση (mSv)
	Καλύτερη εκτίμηση	Απόλυτη τυπική αβεβαιότητα	Κατανομή	Συντελεστής ευαισθησίας	
Παράγοντας βαθμονόμησης	1	0,020	Τριγωνική	5 mSv	0,102
Γραμμικότητα	1	0,022	Ορθογώνια	5 mSv	0,110
Ενεργειακή και γωνιακή εξάρτηση	1	0,193	Κανονική	5 mSv	0,967
Παράγοντας προσθετικότητας σήματος	1	0,000	Ορθογώνια	5 mSv	0,000
Διόρθωση λόγω υγρασίας στα δοσίμετρα	1	0,025	Κανονική	5 mSv	0,127
Διόρθωση λόγω επιρροής του φωτός στα δοσίμετρα	1	0,021	Κανονική	5 mSv	0,103
Εξασθένιση σήματος δοσιμέτρων	1	0,027	Κανονική	5 mSv	0,133
Διόρθωση του μετρητή λόγω χρόνου	1	0,023	Κανονική	5 mSv	0,113
Διόρθωση του μετρητή λόγω θερμοκρασίας	1	0,026	Κανονική	5 mSv	0,132
Διόρθωση του μετρητή λόγω φωτός	1	0,016	Κανονική	5 mSv	0,078
Αποτέλεσμα μέτρησης	5	0,155	Κανονική	1,000	0,155
Απόκλιση λόγω μηχανολογικών επιρροών	0	0,001	Κανονική	-1	0,001
Hr(0,07) mSv	5	1,030			2,021
		20,6	%		

Πίνακας 4: Πίνακας υπολογισμού αβεβαιότητας για το μέγεθος Hr(0,07) στα δοσίμετρα δακτύλου

Μέγεθος	Δοσίμετρο δακτύλου Hr(0,07)				Συνεισφορά
	Καλύτερη	Απόλυτη	Κατανομή	Συντελεστής	

Ε.Καρίνου, Π.Ασκούνης, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας  
 Ανάλυση αβεβαιότητας με τη βοήθεια αναλυτικών τεχνικών και τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo για τα μεγέθη ατομικού ισοδύναμου δόσης βάθους 10 mm και 0,07 mm

εισόδου	εκτίμηση	τυπική αβεβαιότητα		ευαισθησίας	αβεβαιότητας στη δόση (mSv)
Παράγοντας βαθμονόμησης	1	0,020	Τριγωνική	5 mSv	0,100
Γραμμικότητα	1	0,001	Ορθογώνια	5 mSv	0,003
Ενεργειακή και γωνιακή εξάρτηση	1	0,070	Κανονική	5 mSv	0,350
Παράγοντας προσθετικότητας σήματος	1	0,005	Ορθογώνια	5 mSv	0,026
Διόρθωση λόγω υγρασίας στα δοσίμετρα	1	0,011	Κανονική	5 mSv	0,053
Διόρθωση λόγω επιρροής του φωτός στα δοσίμετρα	1	0,017	Κανονική	5 mSv	0,083
Εξασθένιση σήματος δοσιμέτρων	1	0,047	Κανονική	5 mSv	0,233
Διόρθωση του μετρητή λόγω χρόνου	1	0,017	Κανονική	5 mSv	0,083
Διόρθωση του μετρητή λόγω θερμοκρασίας	1	0,023	Κανονική	6 mSv	0,117
Διόρθωση του μετρητή λόγω φωτός	5	0,265	Κανονική	1,000	0,265
Αποτέλεσμα μέτρησης	5	1,405			1,314
		28,1	%		

## 2.2 Υπολογισμός αβεβαιότητας με τη βοήθεια Monte Carlo

Στο δεύτερο αυτό μέρος της παρούσας εργασίας διερευνάται η δυνατότητα των υπολογιστικών μεθόδων (μέθοδοι προσομοίωσης) για την ανάλυση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με τις μετρήσεις των ατομικών δοσιμέτρων. Χρησιμοποιώντας την υπολογιστική μέθοδο που βασίζεται στη δειγματοληψία Monte Carlo, η ΣΠΠ των λειτουργικών μεγεθών που μετρήθηκαν με τη βοήθεια ατομικών δοσιμέτρων μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση μετρήσεων τύπου δοκιμής (type test). Από την υπολογιζόμενη ΣΠΠ μπορεί να υπολογιστεί η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα. Η μέθοδος υπολογίζει την ΣΠΠ της δόσης από τις ΣΠΠ των μεγεθών εισόδου που την επηρεάζουν, για παράδειγμα ενεργειακή και γωνιακή εξάρτηση, επίδραση φωτός κλπ, όπως στην προηγούμενη μεθοδολογία. Οι ΣΠΠ των μεγεθών εισόδου επιλέχθηκαν με κριτήριο την καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων με χρήση της στατιστικής συνάρτησης ελέγχου  $\chi^2$ .

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τα αντίστοιχα λειτουργικά μεγέθη των πινάκων 1,2,3 και 4 παραθέτονται στους πίνακες 5,6,7 και 8 αντίστοιχα. Στην πρώτη στήλη δίνεται το μέγεθος εισόδου, το οποίο επηρεάζει το αντίστοιχο λειτουργικό μέγεθος, στη δεύτερη στήλη δίνεται ο τύπος κατανομής, όπως υπολογίστηκε με τη βοήθεια των υπολογιστικών μεθόδων και των αποτελεσμάτων των type tests και στην τελευταία στήλη δίνεται η μέση τιμή της κατανομής του αντίστοιχου μεγέθους εισόδου. Στην τελευταία γραμμή του κάθε πίνακα δίνεται η τιμή της συνολικής κατανομής (μέγεθος εξόδου) μαζί με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση. Οι δύο τιμές της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης που δίνονται στον καθένα από τους πίνακες οφείλονται σε δύο διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού των μεγεθών αυτών. Στην πρώτη από αυτές τις γραμμές δίνεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση θεωρώντας τους παράγοντες ενέργεια, γωνία, σήμα μηδενικού υποστρώματος και βαθμονόμηση δοσιμέτρου ως ανεξάρτητες ποσότητες (σημασμένα με \*), ενώ η δεύτερη γραμμή δίνει την τιμή και την τυπική απόκλιση θεωρώντας τους παραπάνω παράγοντες ότι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και υπολογίζοντας τη συνολική τους κατανομή.

Πίνακας 5: Υπολογισμός μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης για το μέγεθος Hp(10) στα δοσίμετρα σώματος

Δοσίμετρο σώματος Hp(10)		
Μέγεθος εισόδου	Κατανομή	Μέση τιμή κατανομής
Παράγοντας βαθμονόμησης	Ορθογώνια	1,000
Βαθμονόμηση μετρητή	Κανονική	1,000
Συντελεστής βαθμονόμησης δοσιμέτρου	Αντίστροφη κανονική	1,212
Φυσικό υπόστρωμα	Κανονική	0,013
Παράγοντας εξασθένισης	Κανονική	0,985
Ενεργειακή εξάρτηση*	Τριγωνική	1,093
Σήμα μηδενικού υποστρώματος*	Logistic	0,983
Γωνιακή εξάρτηση*	Ορθογώνια	0,988
Ενέργεια, μηδενικό σήμα, γωνία, βαθμονόμηση δοσιμέτρου	Loglogistic	1,146
*Μέση τιμή 1,082 Τυπική απόκλιση 0,27		
Μέση τιμή 1,15 Τυπική απόκλιση 0,31		

Πίνακας 6: Υπολογισμός μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης για το μέγεθος Hp(0,07) στα δοσίμετρα σώματος

Δοσίμετρο σώματος Hp(0,07)		
Μέγεθος εισόδου	Κατανομή	Μέση τιμή κατανομής
Παράγοντας βαθμονόμησης	Ορθογώνια	1,000
Βαθμονόμηση μετρητή	Log logistic	1,000
Συντελεστής βαθμονόμησης δοσιμέτρου	Αντίστροφη κανονική	1,213
Φυσικό υπόστρωμα	Κανονική	0,013
Παράγοντας εξασθένισης	Κανονική	0,985

Ε.Καρίνου, Π.Ασκούνης, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας  
 Ανάλυση αβεβαιότητας με τη βοήθεια αναλυτικών τεχνικών και τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo για τα μεγέθη ατομικού ισοδύναμου δόσης βάθους 10 mm και 0,07 mm



Ενεργειακή εξάρτηση*	Τριγωνική	1,187
Σήμα μηδενικού υποστρώματος*	Logistic	0,985
Γωνιακή εξάρτηση*	Ορθογώνια	1,086
Ενέργεια, μηδενικό σήμα, γωνία, βαθμονόμηση δοσιμέτρου	Lognorm	1,182
*Μέση τιμή 1,12 Τυπική απόκλιση 0,28		
Μέση τιμή 1,19 Τυπική απόκλιση 0,43		

Πίνακας 7: Υπολογισμός μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης για το μέγεθος Hp(0,07) στα δοσίμετρα καρπού

Δοσίμετρο σώματος Hp(0,07)		
Μέγεθος εισόδου	Κατανομή	Μέση τιμή κατανομής
Παράγοντας βαθμονόμησης	Loglogistic	1,000
Βαθμονόμηση μετρητή	Lognorm	1,000
Συντελεστής βαθμονόμησης δοσιμέτρου	Αντίστροφη κανονική	1,027
Φυσικό υπόστρωμα	Κανονική	0,013
Παράγοντας εξασθένισης	Κανονική	0,985
Ενεργειακή εξάρτηση*	Τριγωνική	
Σήμα μηδενικού υποστρώματος*	Logistic	0,983
Γωνιακή εξάρτηση*	Ορθογώνια	
Ενέργεια, μηδενικό σήμα, γωνία, βαθμονόμηση δοσιμέτρου	Τριγωνική	1,293
* Μέση τιμή 1,08 Τυπική απόκλιση 0,15		
Μέση τιμή 1,30 Τυπική απόκλιση 0,18		

Πίνακας 8: Υπολογισμός μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης για το μέγεθος Hp(0,07) στα δοσίμετρα καρπού

Δοσίμετρο σώματος Hp(0,07)		
Μέγεθος εισόδου	Κατανομή	Μέση τιμή κατανομής
Παράγοντας βαθμονόμησης	Τριγωνική	1,000
Βαθμονόμηση μετρητή	Log logistic	1,000
Συντελεστής βαθμονόμησης δοσιμέτρου	Log logistic	1,035
Φυσικό υπόστρωμα	Κανονική	0,013
Παράγοντας εξασθένισης	Κανονική	0,998
Ενεργειακή εξάρτηση*	Ορθογώνια	1,013
Σήμα μηδενικού υποστρώματος*	Κανονική	0,972
Γωνιακή εξάρτηση*	Log norm	0,997
Ενέργεια, μηδενικό σήμα, γωνία, βαθμονόμηση δοσιμέτρου	Τριγωνική	0,973
*Μέση τιμή 1,0 Τυπική απόκλιση 0,19		
Μέση τιμή 0,97 Τυπική απόκλιση 0,13		

Ε.Καρίνου, Π.Ασκούνης, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας  
Ανάλυση αβεβαιότητας με τη βοήθεια αναλυτικών τεχνικών και τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo για τα μεγέθη ατομικού ισοδύναμου δόσης βάθους 10 mm και 0,07 mm

### 3. Συμπεράσματα – Πρόταση

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι οι τιμές της αβεβαιότητας όπως υπολογίζονται με την αναλυτική μέθοδο και τις υπολογιστικές μεθόδους είναι συγκρίσιμες, παρά το γεγονός ότι η πρώτη μέθοδος στηρίζεται στο νόμο διάδοσης των αβεβαιοτήτων και στο κεντρικό οριακό θεώρημα, τα οποία δεν ισχύουν πάντα.

Σαν συμπέρασμα μπορεί να ειπωθεί ότι οι υπολογιστικές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικύρωση των αναλυτικών μεθόδων αλλά ταυτόχρονα αποτελούν μία μέθοδο που αυτόνομα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της συνδυασμένης αβεβαιότητας του μετρούμενου μεγέθους.

Τα εγχειρίδια που ακολουθούν το GUM (1995) θεωρούν ότι για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας υπάρχει συμμετρική κατανομή γύρω από τις τιμές των αποτελεσμάτων των type test και για το λόγο αυτό αποτελούν μία καλή αλλά όχι ακριβή μέθοδο υπολογισμού της αβεβαιότητας. Επιπρόσθετα, οι υπολογιστικές τεχνικές επιτρέπουν τον υπολογισμό κι άλλων στατιστικών παραμέτρων όπως τη διάμεσο, την ασυμμετρία κλπ τα οποία μπορούν να μας δώσουν καλύτερη εικόνα στην απόδοση ενός δοσιμέτρου από ότι μία απλή τιμή αβεβαιότητας της μέτρησης.

### 4. Βιβλιογραφία

- International Organisation for Standardisation. Guide to the expression of uncertainty in measurement. Supported by BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML (Geneva: ISO) (1995).
- IEC 62461 TR. Radiation protection instrumentation— determination of uncertainty in measurement. IEC (2006).