

فرمول بندی یکپارچه برای محاسبات عدم قطعیت در سنجش پرتوگیری فردی

سجاد بتیار*^۱

۱- شرکت خصوصی پرتو نگار شهاب (رادونیک)، تهران، ایران. sbetyar76@gmail.com

خلاصه

پایش دوره‌ای پرتوگیری پرتوکاران (دزیمتری فردی) یک الزام ایمنی و استاندارد اجتناب‌ناپذیر در مراکز استفاده‌کننده از پرتوهای یون‌ساز است. آزمایشگاه‌های انجام‌دهنده این پایش، مطابق با الزامات استاندارد ISO/IEC 17025، ملزم به گزارش نتایج اندازه‌گیری همراه با برآورد صحیح عدم قطعیت هستند. با این وجود، فرمول‌بندی دقیق و یکپارچه‌ای برای محاسبه این عدم قطعیت در حوزه دزیمتری فردی به‌طور گسترده ارائه نشده است. این مقاله با هدف پر کردن این خلأ، به ارائه یک فرمول‌بندی سیستماتیک برای محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری در سنجش پرتوگیری فردی، عمدتاً با روش ترمولومینسانس (TLD)، می‌پردازد. در این راستا، مهم‌ترین منابع عدم قطعیت (از قبیل غیریکنواختی پاسخ دزیمترها، اثر پرتو زمینه، خطی نبودن پاسخ، وابستگی زاویه‌ای و انرژی‌ای، خطای کالیبراسیون و محوشدگی) بر اساس راهنمای IAEA-GSG-7 شناسایی و دسته‌بندی شده‌اند. برای هر منبع، توزیع آماری مربوطه (نرمال برای عدم قطعیت‌های نوع A و مستطیلی برای نوع B) تعیین و روابط ریاضی حاکم استخراج گردیده است. حاصل این مطالعه، ارائه یک فرمول نهایی یکپارچه برای محاسبه عدم قطعیت کل است. این فرمول‌بندی می‌تواند به عنوان یک راهنمای جامع و قابل اتکا برای آزمایشگاه‌های دزیمتری مورد استفاده قرار گیرد تا آن‌ها را در برآورد عدم قطعیت مطابق با استانداردهای بین‌المللی و گزارش‌دهی معتبر نتایج یاری رساند.

کلمات کلیدی: دزیمتری فردی، عدم قطعیت اندازه‌گیری، پایش پرتوگیری فردی، ترمولومینسانس (TLD)، منابع عدم قطعیت

۱. مقدمه

پرتوهای یونساز مانند فوتون‌ها، بتا، آلفا، نوترون‌ها، پروتون‌ها، و پاره‌های شکافت هسته‌ای در محیط زندگی و نیز بسیاری از مراکز صنعتی، پزشکی و تحقیقاتی وجود دارند و از جنبه‌های کاربردی برای زندگی امروز ضروری می‌باشند. در کنار مزایای آنها، به دلیل اثرات مخربی که در اثر استفاده ناصحیح ممکن است برای انسان ایجاد نماید، لذا پایش مستمر افراد شاغل در این مراکز (پرتوکاران) که دزیمتری فردی نامیده می‌شوند یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است [۱-۴]. روش‌های متعددی برای آشکارسازی، طیف نگاری یا سنجش دز انواع پرتوهای یونساز تاکنون معرفی شده‌اند. در حوزه دزیمتری فردی، یکی از ابزارهای متداول این پایش، دزیمتری ترمولومینسانس (TLD) است که به دلیل دقت بالای آن به عنوان روش دزیمتری معمول در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۵-۸]

بر اساس استاندارد ISO 17025، هر آزمایشگاه آزمون یا کالیبراسیون باید قادر باشد نتایج سنجش و کالیبراسیون خود را با یک عدم قطعیت قابل پذیرش بر مبنای استانداردهای تعریف شده در آن حوزه سنجش ارائه نماید. بنابراین مراکز ارائه‌دهنده خدمات دزیمتری TLD نیز به عنوان یک آزمایشگاه آزمون شناخته می‌شوند و بر این مبنا فرمول بندی صحیح

محاسبات اهمیت بالایی دارد [۹]. با این حال تاکنون گزارش های محدودی برای این هدف منتشر شده اند. [۱۰]

محاسبات عدم قطعیت در حوزه دزیمتری فردی با دو دیدگاه قابل بررسی است. از دید کمیت بین المللی حفاظت پرتوی (ICRP) بازه پذیرش برای عدم قطعیت کل بر اساس سطح پرتوگیری تعیین می شود، در حالی که استاندارد IEC 62387، برای هر منبع عدم قطعیت، یک بازه پذیرش جداگانه تعریف می نماید. [۱۱-۱۲]

در این مقاله، ابتدا منابع عدم قطعیت در دزیمتری فردی به روش TLD بر اساس راهنمای IAEA-GSG 7 معرفی می گردند و سپس فرمول بندی محاسبات عدم قطعیت بر مبنای توزیع آماری هر کدام از منابع عدم قطعیت ارائه می گردد [۱۳].

۲. منابع عدم قطعیت

بر اساس مدرک IAEA-GSG-7 در دزیمتری نیز مانند هر کمیت قابل سنجش دیگری، به طور کلی دو نوع از عدم قطعیت ها شامل نوع A و نوع B تعریف هستند [۱۳]:

نوع A: منابع خطا با افزایش تکرار یا تعداد نمونه، کاهش می یابند. لذا تابع توزیع آن از نوع نرمال یا گوسی می باشد. از منابع نوع A در دزیمتری فردی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- غیر یکنواختی حساسیت در یک گروه از دزیمترها (خطای تعیین ECC)
- تکرارپذیری سیستم دزیمتری در قرائت دز
- نوسانات دز صفر سیستم دزیمتری

نوع B: منابع خطای سیستماتیکی که به شکل ثابت وجود دارند و با تکرار یا افزایش نمونه ها از مقدار آن کاسته نمی شود. لذا توابع توزیع آن باید مشخص باشد و اگر چنانچه مشخص نباشد، فرض بر تابع توزیع مستطیلی پذیرفته است. از منابع نوع B در دزیمتری فردی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- غیر خطی بودن پاسخ سیستم دزیمتری
- پاسخ دزیمتر به تغییر زاویه و انرژی پرتو
- پرتودهی مرجع کالیبراسیون (SSDL)
- پایداری نوری سیستم خوانشگر (RL)
- محو شدگی (نوری و حرارتی)
- تغییرات دز زمینه

۳. کمیت های تأثیرگذار در دزیمتری فردی و حذف اثر عدم قطعیت آن

بر اساس تعریف کمیت های تأثیرگذار در استاندارد IEC 62387 [۱۳] دمای محیطی، نور محیطی، بیش باری (over-load)، پس اثری (after-effect) و قابلیت استفاده مجدد (Reusability)، نوسانات ولتاژ و فرکانس منبع تغذیه اولیه، میدان های مشخص الکترومغناطیسی، و شوک های مکانیکی از عوامل تأثیرگذار در دزیمتری می باشند. با اقدامات زیر برای کاهش حداکثری یا حذف اثر این عوامل و کمیت های مرتبط با آن از عدم قطعیت کل می توان محاسبات را ساده سازی نمود:

- کنترل شرایط دمایی فضای بسته دزیمتری در بازه دمایی 15°C تا 25°C از طریق نصب سیستم تهویه مرکزی،
- عدم استفاده از خوانشگر در شرایط شدت نور فضای روباز، تثبیت شرایط نوری معمولی روز در فضای بسته دزیمتری و درگیری کامل نوری سیستم خوانشگر،
- اعمال رژیم پیش-حرارت 100°C (Pre-heat) به مدت ۱۰ دقیقه برای تمام دزیمترها پیش از قرائت آنها به منظور حذف کامل اثر محو-شدگی حرارتی، و همچنین اعمال رژیم بازپخت (Annealing) پس از قرائت همه دزیمترها به منظور حذف حداکثری آثار بیش باری، پس اثری و قابلیت استفاده مجدد،
- استفاده از یک دستگاه UPS به منظور حذف نوسانات فرکانس و ولتاژ برق شهر بر خوانشگر،
- استفاده از کابل های به طول کمتر از ۳ متر برای منبع تغذیه و انتقال داده (LAN) و نیز ممنوعیت استفاده از تلفن همراه در مجاورت خوانشگر به منظور به حداقل رساندن آثار احتمالی میدان های الکترومغناطیسی بر خوانشگر،
- استفاده از قرص های نوع دزیمتر LiF به دلیل ناچیز بودن خواص محوشدگی نوری قله های نواحی دزیمتری و عدم خواص تریبوترمولومینسانس (شوکه مکانیکی در اثر سقوط دزیمتر از ارتفاع).

۴. نتایج و بحث

عدم قطعیت کلی U_C در دزیمتری فردی مانند سایر کمیت های فیزیکی، از جمع دو نوع عدم قطعیت U_A و U_B و از رابطه (۱) بدست می آید [۱۴-۱۵].

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (۱)$$

برای عدم قطعیت های نوع A، از آنجا که تابع توزیع عدم قطعیت U_A ، نرمال یا گوسی (شکل ۲) است، عدم قطعیت n تعداد اندازه گیری X_i با میانگین $\bar{X}$ و با سطح اطمینان ۶۸٪ از رابطه (۲) حاصل می شود:

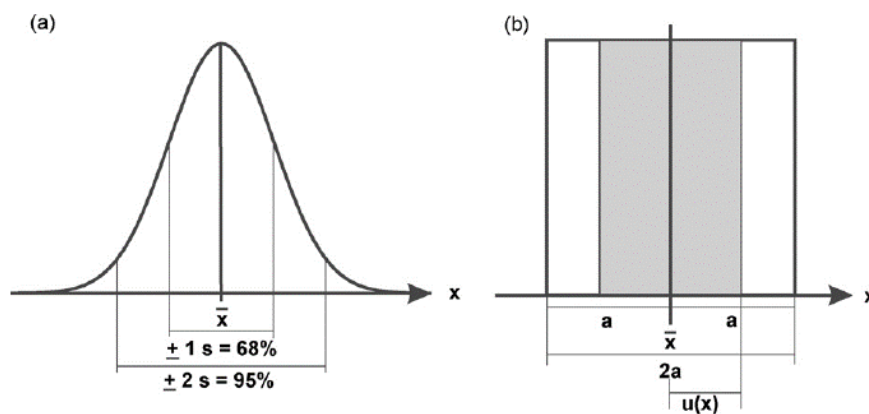
$$U_{X_i} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (۲)$$

و عدم قطعیت میانگین اندازه گیری ها، $U_{\bar{X}}$ ، از رابطه (۳) حاصل می شود:

$$U_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

برای محاسبه عدم قطعیت های نوع B و با فرض توزیع مستطیلی (شکل ۱) با نیم فاصله a و سطح اطمینان ۶۰٪، پارامتر U_B از رابطه (۴) حاصل می شود [۱۵]:

$$U_B = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_i a_i^2} \quad (4)$$



شکل ۱: توابع توزیع نرمال (a) و مستطیلی (b) [۴].

ابتدا همه عدم قطعیت ها با فرض یک انحراف معیار از مقدار میانگین (سطح اطمینان ۶۰٪ توزیع مستطیلی و ۶۸٪ توزیع نرمال) [۴] محاسبه می شوند، و سپس عدم قطعیت کل با لحاظ ضریب پوششی $k=2$ در سطح اطمینان ۹۵٪ محاسبه خواهد شد.

با توجه به محاسبه دز دزیتر فرضی $\#i$ از رابطه (۵): [۱۰]

$$Dose_i = (TL_i - TL_{BKG}) \times ECC_i \times \frac{RL_0}{RL_i} \times CF \quad (5)$$

که در آن:

TL_{BKG} : ثبت قرائت دزیتر زمینه (nC)

ECC_i : عدد مربوط به EEC دزیتر شماره $\#i$

RL_0 : نور مرجع دستگاه قرائتگر در روز کالیبراسیون (nC)

RL_i : نور مرجع دستگاه قرائتگر به هنگام خوانش دزیتر شماره $\#i$ (nC)

CF : ضریب کالیبراسیون (mSv/nC)

عدم قطعیت کل نسبی از رابطه (۶) قابل استنتاج است:

$$U_C = \sqrt{U_{TL}^2 + U_{BKG}^2 + U_{ECC}^2 + U_{RL_{rel}}^2 + U_{CF}^2} \quad (6)$$

بسط رابطه (۶) با توجه به هر یک از عدم قطعیت ها و با استفاده از روابط (۷) تا (۱۰) به شرح زیر صورت می پذیرد:

$$U_{TL}^2 = U_{repeatability}^2 + U_{\alpha,E}^2 + U_{fading}^2 \quad (۷)$$

$$U_{ECC}^2 = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (ECC_i - \overline{ECC})^2} \quad (۸)$$

$$RL_{rel} = \frac{RL_0}{RL_i} \Rightarrow U_{RL_{rel}}^2 = \frac{U_{RL_0}^2}{\overline{RL_0}^2} + \frac{U_{RL_i}^2}{\overline{RL_i}^2} \quad (۹)$$

$$U_{CF}^2 = U_{SSDL}^2 + U_{non-linearity}^2 \quad (۱۰)$$

پارامترهای معادلات (۶) تا (۱۰) به همراه نوع عدم قطعیت در جدول (۱) ارائه شده اند.

جدول (۱): مؤلفه های عدم قطعیت نسبی و نوع آنها

نوع عدم قطعیت	عنوان عدم قطعیت نسبی	پارامتر در معادله
A و B	سیگنال خوانش TL سیستم دزیمتری برای هر دزیمتر	U_{TL}
B	تغییرات پرتو زمینه	U_{BKG}
A	تکرارپذیری پاسخ سیستم دزیمتری	$U_{repeatability}$
B	پاسخ دزیمتر به تغییر زاویه و انرژی پرتو	$U_{\alpha,E}$
B	محوشدگی پاسخ دزیمتر	U_{fading}
B	پایداری نوری سیستم خوانشگر	$U_{RL_{rel}}$
A	ضریب ECC دزیمتر (غیر یکنواختی حساسیت دزیمترها)	U_{ECC}
B	پرتوهای آزمایشگاه مرجع SSDL	U_{SSDL}
A	غیر خطی بودن پاسخ سیستم دزیمتری	$U_{non-linearity}$

در محاسبات فوق، برای تمام انواع عدم قطعیت های نوع B، می توان با فرض توزیع مستطیلی از رابطه (۱۱) استفاده نمود:

$$U_a = \left(\frac{MAX - MIN}{2 \times \overline{AVG}} \right) \quad (۱۱)$$

با در نظر گرفتن تمامی منابع عدم قطعیت در بندهای فوق، بر اساس رابطه (۶)، عدم قطعیت کل (با سطح اطمینان ۶۰٪) برابر است با:

$$U_C = \sqrt{U_{repeatability}^2 + U_{ECC}^2 + \frac{1}{3}(U_{BKG}^2 + U_{RL_{rel}}^2 + U_{CF}^2 + U_{\alpha,E}^2 + U_{CFfading}^2)} \quad (12)$$

۳.۲.۵. نتیجه گیری

پایش دقیق پرتوگیری شغلی پرتوکاران، به عنوان یک الزام استاندارد و ایمنی، نیازمند گزارش دهی کمی دقیق همراه با برآورد صحیح عدم قطعیت اندازه گیری است. در این مقاله، با استناد به راهنمای IAEA-GSG-7 و استاندارد IEC 62387، یک فرمول بندی سیستماتیک و جامع برای محاسبه عدم قطعیت کل در سنجش پرتوگیری فردی به روش ترمولومینسانس (TLD) ارائه شد.

مهم ترین منابع عدم قطعیت، اعم از نوع A مانند غیریکنواختی حساسیت دزیمترها و تکرارپذیری، و نوع B مانند پاسخ به زاویه و انرژی، خطای کالیبراسیون مرجع، و محوشدگی شناسایی و دسته بندی شدند. برای هر منبع، توزیع آماری مناسب نرمال برای نوع A و مستطیلی برای نوع B در نظر گرفته شده و روابط ریاضی مربوطه جهت محاسبه سهم هر کدام در عدم قطعیت کل استخراج گردید.

علاوه بر این، راهکارهای عملی برای حذف یا کاهش حداقلی تأثیر کمیت های مزاحم خارجی (مانند دما، نور، نوسانات برق، و میدان های الکترومغناطیسی) ارائه شد که با پیاده سازی آن ها می توان دقت محاسبات را افزایش و پیچیدگی آن ها را کاهش داد.

فرمول نهایی ارائه شده برای محاسبه عدم قطعیت کل، که ترکیبی از تمامی این مؤلفه ها تحت یک انحراف معیار (سطح اطمینان ۶۸٪) است، به عنوان یک راهنمای عملی و قابل ارجاع برای آزمایشگاه های دزیمتری عمل می کند. این فرمول بندی امکان گزارش دهی مطابق با الزامات استاندارد ISO/IEC 17025 و همچنین ارزیابی انطباق با معیارهای پذیرش ICRP و IEC 62387 را فراهم می سازد. پیشنهاد می شود این روش به صورت عملی در یک آزمایشگاه دزیمتری پیاده سازی و نتایج آن با روش های موجود مقایسه گردد.

۵. مراجع

1. H Cember, Introduction to health physics, 4th edition, MCGraw Hill, ISBN: 978-0-07-164323-8 (2008)
2. B Amanat, MR Kardan, R Faghihi, SMH Pooya, Comparative Measurements of Radon Concentration in Soil Using Passive and Active Methods in High Level Natural Radiation Area (HLNRA) of Ramsar, Journal of Biomedical Physics & Engineering 3 (4), 139 (2013)
3. B Pourshahab, C Rasouli, SM Hosseini Pooya, H Rasouli, A Sadigzadeh, Dose measurement of hard x-ray produced by Damavand tokamak by means of LiF: Mg, Cu, P TLDs, Journal of Fusion Energy 32 (4), 451-456 (2013)
4. L Hafezi, SM Arianezhad, SM Hosseini Pooya, Evaluation of the radiation dose in the thyroid gland using different protective collars in panoramic imaging Dentomaxillofacial Radiology 47 (6), 20170428 (2018)

5. GF Knoll, Radiation detection & Measurement, ISBN 0471073385, Wiley (2000)
6. SMH Pooya, H Afarideh, M Taheri, MR Kardan, Passive α -particles spectrometry by polycarbonate SSNTD using new etching conditions, Radiation Physics and Chemistry 77 (8), 949-953 (2008)
7. FT Nabil, SMH Pooya, MS Zafarghandi, M Taheri, A diffusion chamber for passive separated measurements of radon/thoron concentration in dwellings Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, (694), 331-334 (2012)
8. Effect of reader and oven annealing on the glow curve structure and fading of aLiF: Mg, Cu, P TL dosimeter, M Hosseini-Pooya, M Jafarizadeh, Journal of Radiological Protection 24 (2), 173
9. ISO IEC 17025, General requirements for the competence of testing and calibration Laboratories, 3th edition (2017)
10. Hosseini Pooya S. M., Orouji T., Evaluation of effective sources in uncertainty measurements of personal dosimetry by a Harshaw TLD system, Journal of biomedical physics & engineering 4 (2), 43 (2014)
11. ICRP 75:1997, General Principles for the Radiation Protection of Workers
12. IEC 62387, Radiation protection instrumentation – Dosimetry systems with integrating passive detectors for individual, workplace and environmental monitoring of photon and beta radiation (2020).
13. IAEA GSG-7, Occupational Radiation Protection (2018).
14. ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
15. Veronika R. Meyer, Measurement uncertainty *J. Chrom. A*, 1158, 15–24 (2007).