

ارزیابی بین‌المللی استاندارد اندازه‌گیری پرتوهای ایکس و گاما در بخش دزیمتری استاندارد (SSDL)

عبدالرضا سلیمانیان، محمد گواهی، مصطفی غفوری، ارزنگ شاهور، آیتا عالیپور (بخش SSDL)
مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای
آزمایشگاه دزیمتری IAEA و بخش پرتودرمانی بیمارستان سیدالشهدا - اصفهان
سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

آزمایشگاههای دزیمتری استاندارد ثانویه (SSDLs) وظیفه انتقال استانداردهای اندازه‌گیری پرتوهای یونساز را از مراجع بین‌المللی ذریعاً به کاربران پرتوها، به ویژه در سطح پرتودرمانی و حفاظت در برابر پرتوها، به عهده دارند. آزمایشگاه دزیمتری آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) از طریق انجام برنامه‌های دزیمتری و سنجه‌بندی (کالیبراسیون) مقایسه‌ای در سطح پرتودرمانی، کیفیت استاندارد ارائه شده توسط آزمایشگاههای دزیمتری عضو شبکه بین‌المللی SSDL را که با همکاری IAEA و سازمان بهداشت جهانی (WHO) تاسیس گردیده است، ارزیابی می‌نماید. در این مقاله نحوه انجام دزیمتری مقایسه‌ای در میدان تابشهای گاما (ناشی از ^{60}Co) و ایکس انرژی بالا (شتابدهنده) با استفاده از دزیمترهای TLD و همچنین سنجه‌بندی مقایسه‌ای اتاقکهای یونش بر حسب کرمای^۱ هوا و دوز جذبی آب شرح داده شده و نتایج حاصل از شرکت بخش دزیمتری استاندارد سازمان انرژی اتمی ایران در برنامه‌های دزیمتری و سنجه‌بندی مقایسه‌ای IAEA طی سالهای ۷۶-۱۳۶۶ (۹۷-۱۹۸۷) که مؤید کیفیت مطلوب این بخش در ارائه خدمات دزیمتری و سنجه‌بندی در سطح پرتودرمانی است، بررسی گردیده است.

۱- مقدمه

دزیمتری علم اندازه‌گیری و محاسبه کمیت‌های فیزیکی در ارتباط با برخورد پرتوهای یونساز با ماده است. در این مفهوم کلی، دزیمتری شامل تجهیزات، روشهای اندازه‌گیری و اصول اساسی فیزیکی (و فیزیکی - شیمیایی) است که برهم‌کنش پرتو با ماده را تعیین می‌کنند. آنچه که در دزیمتری، به مفهوم خاص آن، مدنظر است تعیین کمیت اساسی آن یعنی انرژی جذب شده در واحد جرم جسم تحت تابش و یا به اصطلاح دز جذبی است. برهم‌کنش پرتو با ماده،

در سطح مولکولی و اتمی، منجر به اثر قابل مشاهده‌ای می‌شود که بطور مستقیم با دز جذبی جسم تحت تابش ارتباط دارد. از اینرو در هرگونه استفاده از پرتوهای یونساز برای دستیابی به یک اثر معین، اطلاع از میزان دز جذبی لازم یک پیش‌نیاز به شمار می‌رود.

دزیمتری در سه زمینه عمده کاربرد پرتوهای یونساز یعنی پرتودرمانی، پرتودهی به مواد مختلف (مانند محصولات مورد استفاده در پزشکی، محصولات صنعتی و

۱ - Kerma

مواد غذایی) و حفاظت در برابر پرتوها اهمیت اساسی دارد. در هر یک از این موارد مقادیر دُز و میزان دقت لازم برای اندازه‌گیری آنها متفاوتند. در مورد پرتودرمانی رعایت دقت کافی در تعیین دُز جذبی الزامی است. زیرا در پرتودرمانی، فاصله بین دقتی که مورد نیاز است و بالاترین دقتی که در عمل دسترسی به آن میسر است، بسیار اندک است. خطایی در حد $\pm 5\%$ در مقدار دُز دریافتی در موضع تومور ممکن است اثربخشی آن را مختل سازد [۱]. در اندازه‌گیریهای مربوط به حفاظت در برابر پرتوها، بطور کلی، نیازی به دقت بسیار زیاد نیست. به عبارت دیگر، در حالیکه در پرتودرمانی نیاز مداوم به اجرای برنامه‌های کنترل کیفی، نظیر تستهای دوره‌ای و تجدید سنج‌بندی دُزیمترها، و همچنین اتکاء اندازه‌گیریها به استانداردهای بین‌المللی مرجع احساس می‌شود، بنظر می‌رسد که در قلمرو حفاظت در برابر پرتوها این امر قابل چشم‌پوشی باشد*. مباحث دُزیمتری نیز در پرتودرمانی و در دُزیمتری فردی، از لحاظ تاریخی، کاملاً مستقل از هم و با اندک مفاهیم مشترک بسط داده شده‌اند.

رشد سریع کاربرد پرتوهای یونساز در پزشکی، کشاورزی، جانورشناسی، آب‌شناسی (هیدرولوژی) و صنعت و عدم دسترسی کاربران پرتوها، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، به مراکز استاندارد اولیه پرتوهای یونساز که پیامدهای نامطلوبی بخصوص در کاربردهای پزشکی این پرتوها بدنبال داشت**، موجب شد تا آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) و سازمان بهداشت جهانی (WHO) در سال ۱۳۵۵ (۱۹۷۶) با همکاری یکدیگر شبکه بین‌المللی آزمایشگاههای دُزیمتری استاندارد ثانویه (IAEA/WHO Network of SSDLs) را تاسیس نمایند [۳]. هدف از این کار افزودن دقت و درستی در امر

دُزیمتری کاربردی پرتوهای یونساز، بویژه در سطح پرتودرمانی و حفاظت در برابر پرتوها، از طریق ایجاد پیوند بین آزمایشگاههای دُزیمتری استاندارد اولیه (PSDLs) و کاربران پرتوها بود. آزمایشگاههای PSDL تعدادی مراکز شناخته شده ملی هستند که به امر توسعه، تامین و بهبود استانداردهای اولیه دُزیمتری پرتوهای یونساز می‌پردازند و با انجام اندازه‌گیریهای مقایسه‌ای و از طریق مرکز بین‌المللی اوزان و مقادیر (BIPM) در سیستم بین‌المللی اندازه‌گیری شرکت دارند. این آزمایشگاهها دستگاههای دُزیمتری مرجع آزمایشگاههای SSDL را سنج‌بندی می‌کنند و آزمایشگاههای SSDL نیز به نوبه خود دُزیمترهای مورد استفاده در محیطهای کار با پرتو و دستگاههای مولد پرتو و چشمه‌های پرتوزا را بویژه در سطح پرتودرمانی و حفاظت در برابر پرتوها، سنج‌بندی می‌نمایند.

شبکه بین‌المللی آزمایشگاههای SSDL در حال حاضر ۷۶ آزمایشگاه دُزیمتری را در ۵۸ کشور در بر دارد. آزمایشگاه دُزیمتری IAEA، که در زایرسدورف اتریش واقع شده، در این شبکه نقش آزمایشگاه مادر را ایفا می‌کند و با ۱۹ نهاد بین‌المللی و آزمایشگاه PSDL، که اعضای همکار و پیوسته در شبکه بشمار می‌روند، بطور مستقیم در ارتباط است [۴]. بخش دُزیمتری استاندارد سازمان انرژی اتمی ایران نیز که در سال ۱۳۵۶ به عضویت شبکه مذکور

* - با اصلاحاتی که در مقادیر حدی هم‌ارز دُز در مونیتورینگ فردی بعمل آمده [۲]
و با توجه به این واقعیت که این مقادیر به طور روز افزون در موارد قانونی (بعنوان مثال در تعیین مزایای پرتوکاران) مورد استفاده قرار می‌گیرند، لزوم وجود یک زنجیره کاملاً مستند متکی به استانداردهای بین‌المللی در دُزیمتری فردی نیز قابل تأمل است.
** - مطالعات انجام شده توسط IAEA و WHO در خلال سالهای ۱۳۵۴ و ۱۳۶۲ نشان می‌دهد که فقط در حدود ۶۰٪ از مراکز پرتودرمانی تحت بررسی از حداقل دقت لازم $\pm 5\%$ برخوردار بوده‌اند [۳].

متوالی برنامه دُزیمتری مقایسه‌ای طی سالهای ۷۶-۱۳۶۶ و همچنین در برنامه سنج‌بندی مقایسه‌ای که تا بحال تنها در دو دوره در سالهای ۱۳۷۴ و ۱۳۷۶ به اجرا درآمد شرکت کرده و نتایج حاصل، به شرحی که به دنبال خواهد آمد، همواره رضایت‌بخش بوده است.

۲- استانداردهای اولیه اندازه‌گیری پرتوهای ایکس و گاما

در آزمایشگاههای دُزیمتری استاندارد اولیه (PSDLs) معمولاً "دُز جذبی گرافیت" (D_{gr})، پرتودهی در هوا (X) و کِرَمای هوا (K_{air}) اندازه‌گیری می‌شود. مقایسه استانداردهای اولیه اعمال شده در مورد هر یک از این کمیتها، با دقتی بین ۰/۲ تا ۰/۳ درصد برای پرتوگامای ^{60}Co توافقی نشان می‌دهد. اندازه‌گیریهای گرماسنجی (کالوریمتری) نیز تعیین مطلق دُز جذبی گرافیت را در همین حد از دقت میسر می‌سازد [۷].

خطای مطلق در اندازه‌گیری کمیت پرتودهی (exposure) در مورد پرتوگامای ^{60}Co ، از توافقی پیش گفته شده بمراتب بیشتر است. پرتودهی برحسب بار الکتریکی و جرم هوای درون اتاقک یونش با دیواره گرافیتی، اندازه‌گیری و طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$X = \bar{J}_{air} S_{g,air} (\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air, g} \prod k_i \quad (1)$$

* - کرما (Kinetic Energy Released in Medium) انرژی جنبشی ذرات یونساز اولیه است که در اثر برهم‌کنش پرتوهای یونساز غیر مستقیم (X, γ, n) در واحد جرم محیط تحت تابش ایجاد می‌شود. این کمیت را برای پرتوهای یونساز مستقیم نیز در مواردی که منبع پرتودهی درون محیط تحت تابش باشد می‌توان تعریف کرد.

درآمد، در حال حاضر مرجع ملی دُزیمتری پرتوهای یونساز و سنج‌بندی دُزیمترها، بخصوص در سطح پرتودرمانی و حفاظت در برابر پرتوها، بشمار می‌رود و هم‌اکنون کلیه مراکز پرتودرمانی را در سطح کشور تحت پوشش برنامه کنترل کیفی خود دارد [۵].

آزمایشگاه دُزیمتری IAEA برای ارزیابی کیفیت استاندارد که توسط اعضای شبکه SSDL ارائه می‌شود به دو روش عمل می‌کند. در روش اول، که از سال ۱۳۶۰ به اجرا درآمده است، تعدادی کپسول TLD برای هر یک از آزمایشگاههای SSDL ارسال و از آنها درخواست می‌شود که کپسولها را در شرایط خاص به مقدار معین تابش داده و عودت دهند. آزمایشگاه دُزیمتری IAEA دُز جذبی آنها را پس از دریافت اندازه‌گیری کرده و با مقدار اعلام شده توسط SSDL مقایسه می‌کند. در روش دوم، موسوم به برنامه CARE که از سال ۱۳۶۶ عملی شد، تعداد معدودی از دستگاههای دُزیمتری به برخی از آزمایشگاههای SSDL ارسال گردید و از آنها خواسته شد که دُزیمترها را در مقایسه با استاندارد مرجع خود سنج‌بندی کرده و عودت دهند. این برنامه به علت مشکلاتی که در حمل و نقل دستگاههای دُزیمتری وجود داشت موفق نبود و در سال ۱۳۷۲ متوقف شد [۶]. برنامه CARE هیچگاه در مورد آزمایشگاه SSDL ایران اجرا نشد. در سال ۱۳۷۳ آزمایشگاه دُزیمتری IAEA نحوه اجرای برنامه CARE را تغییر داد: بدین ترتیب که از آزمایشگاههای عضو شبکه SSDL خواسته شد یکی از اتاقکهای یونش خود را، غیر از اتاقک یونش مرجع، در میدان تابش گامای ^{60}Co برحسب کِرَمای هوا* (K_{air}) و دُز جذبی آب (D_w) سنج‌بندی کرده برای ارزیابی به آزمایشگاه دُزیمتری IAEA ارسال دارند. بخش دُزیمتری استاندارد (SSDL) در دوره‌های

انرژی لازم برای تولید یک جفت یون است و در اغلب موارد ثابت در نظر گرفته می‌شود. مقدار توصیه شده W/e (e بار الکترون) در هوای خشک 33.97 J/C است. این مقدار تا حد زیادی براساس مقایسه نتایج اندازه‌گیری‌هایی که به وسیله گرماسنج گرافیتی انجام گرفته‌اند و اندازه‌گیری‌هایی که در اتاقک یونش با دیواره گرافیتی در یک فانتوم گرافیت صورت گرفته‌اند تعیین شده است. در این مقایسه از رابطه براگ-گری: $D_g = s_{g,air}(W/e) \bar{J}_{air}$ برای تعیین حاصلضرب $s_{g,air}(W/e)$ استفاده می‌شود. D_g دُز جذبی گرافیت و $\bar{J}_{air}$ مقدار یونش ویژه در حفره هوای اتاقک یونش است که در عمق موردنظر در فانتوم گرافیت قرار داده شده است. پس از تعیین حاصلضرب $s_{g,air}(W/e)$ مقادیر نظری $s_{g,air}$ را برای تعیین W/e بکار می‌برند.

چنانکه ملاحظه می‌شود در معادله ۲، کِرَمای هوا شامل حاصلضرب $s_{g,air}(W/e)$ است که مقدار آن نسبت به مقادیر جداگانه $s_{g,air}$ و W/e با دقت بیشتری در دست است. بنابراین خطا در کِرَمای هوا در مقایسه با پرتودهی، که در آن فقط از مقادیر نظری $s_{g,air}$ استفاده می‌شود، بسیار کمتر است. در حال حاضر سنج‌بندی اتاقکهای یونش برحسب کِرَمای هوا در مقابل پرتوگامای ^{60}Co ، در اکثر روشهای متداول دُزیمتری باریکه‌های فوتون و الکترون در پرتودرمانی توصیه شده است و بکار می‌رود.

در مورد پرتوهای ایکس با انرژی متوسط ($100 - 300 \text{ kV}$) و کم انرژی ($10 - 100 \text{ kV}$)، استانداردهای اولیه براساس اندازه‌گیری پرتودهی با اتاقکهای هوای آزاد (free air chambers) تهیه می‌شوند. مقایسه استانداردهای مذکور توافقی در حد $\pm 5\%$ را نشان می‌دهد. در این اندازه‌گیری‌ها از همان

در این رابطه $\bar{J}_{air}$ مقدار متوسط یونش ویژه (بار الکتریکی تولید شده در واحد جرم هوای اتاقک)، $s_{g,air}$ نسبت توان متوقف‌سازی گرافیت به هوا، $(\mu_{en}/\rho)_{air,g}$ نسبت ضریب جرمی جذب انرژی هوا به گرافیت و $\sum_i k_i$ حاصلضرب ضریب‌های تصحیح است. آزمایشگاههای دُزیمتری استاندارد اولیه ضرایب $s_{g,air}$ و $(\mu_{en}/\rho)_{air,g}$ را معمولاً از منابع مشابهی [۸] اقتباس کرده و در رابطه (۱) بکار می‌برند. از اینرو مقایسه اندازه‌گیری‌ها در این آزمایشگاهها توافق مطلوبی را نشان می‌دهد (0.2% تا 0.3% درصد) که در واقع به معنای حد دقت مطلق اندازه‌گیری‌ها نیست. خطا در اندازه‌گیری مقادیر $s_{g,air}$ و $(\mu_{en}/\rho)_{air,g}$ به ترتیب در حدود $1/5\%$ و $2/0\%$ برآورد می‌شود. بنابراین، ضریب $s_{g,air}$ بیشترین سهم را در خطای مطلق اندازه‌گیری پرتودهی دارد.

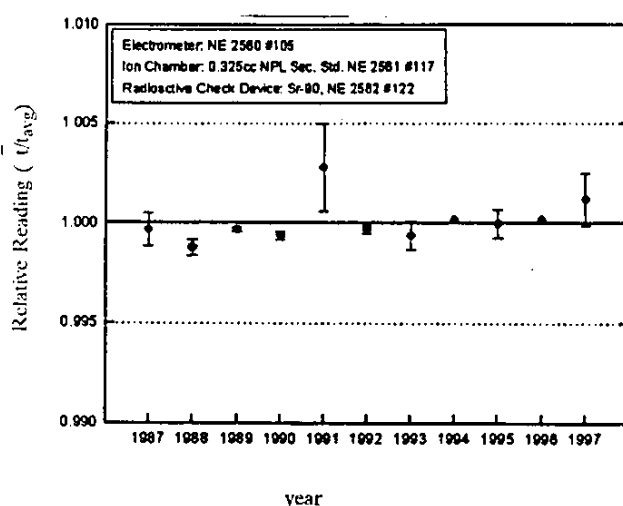
خطای اندازه‌گیری کِرَمای هوا در مقایسه با خطای اندازه‌گیری پرتودهی بمراتب کمتر است. کِرَمای هوا کمیتی اساسی در دُزیمتری پرتوهای ایکس و گاما است و به وسیله اتاقک یونش اندازه‌گیری و از رابطه زیر حساب می‌شود:

(۲)

$$K_{air} = \frac{1}{(1-g)} \frac{W}{e} \frac{\sum_i k_i \bar{J}_{air}}{s_{g,air}(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air,g}}$$

در این رابطه g کسری از انرژی الکترونها حاصل از برخورد پرتو ایکس یا گاما با مولکولهای هوا است که به صورت پرتو برمشتراونگ از دست می‌رود. مقدار g برای پرتوگامای ^{60}Co در حدود 0.3% و برای پرتوهای ایکس متوسط و کم انرژی ($10 - 300 \text{ kV}$) از این هم کمتر است. خطای اندازه‌گیری مقدار g در مقایسه با خطاهای دیگر که در اندازه‌گیری K_{air} وارد می‌شوند ناچیز است؛ W میانگین

و آزمون استانداردهای کار در آزمایشگاه^۲ که شامل اتاقکهای یونش از نوع موسوم به فارمر 0.6 cc PTW, W-30001 و 0.6cc NE 2571 & 2505 هستند استفاده می‌گردد. این اتاقکهای یونش نیز بنوبه خود برای سنجهبندی دُزیمترهای مراکز پرتودرمانی و اندازه‌گیری خروجی دستگاههای مولد پرتو در این مراکز بکار می‌روند.



شکل ۱- نمودار پایداری درازمدت دستگاه دُزیمتری استاندارد ثانویه بخش دُزیمتری استاندارد در سطح پرتودرمانی، t/t_{avg} زمان نسبی اندازه‌گیری شده برای تخلیه مقدار معینی بار الکتریکی در الکترومتر توسط اتاقک یونش است که در معرض چشمه آزمایشی مرجع قرار گرفته باشد. $\bar{t}$ میانگین زمان اندازه‌گیری شده در طول یک سال است که با توجه به واپاشی چشمه ^{90}Sr برای تاریخ t_{avg} ۱۳۷۵/۷/۱ (۱۹۹۶-۹-۲۳) بهنجار (نرمالیزه) شده است. میانگین زمانهای اندازه‌گیری شده در طول مدت ۷۶-۱۳۶۶ است.

مقدار $W/e = 33/97 \text{ J/C}$ که برای ^{60}Co بکار می‌رود استفاده می‌شود.

۳- استاندارد اندازه‌گیری پرتوهای ایکس و گاما در بخش دُزیمتری استاندارد (SSDL)

استاندارد مرجع اندازه‌گیری پرتوهای ایکس و گاما در سطح پرتودرمانی را در بخش دُزیمتری استاندارد، دستگاه دُزیمتری متشکل از یک الکترومتر از نوع NE 2560، یک اتاقک یونش از نوع NE 2561، 0.325 cc, NPL Sec. Std. و یک چشمه آزمایشی مرجع از نوع St-90, NE 2562 تشکیل می‌دهد. این دستگاه دُزیمتری برای اولین بار در سال ۱۳۵۶ (۱۹۷۷) در آزمایشگاه ملی انگلیس (NPL) برحسب روننگن سنجهبندی شد. از آن سال تا بحال سنجهبندی این دُزیمتر دوبار تجدید شده و آخرین دوره سنجهبندی آن ۱۳۷۳ بوده است. در این سال آزمایشگاه دُزیمتری IAEA، که متکی به سیستم اندازه‌گیری بین‌المللی BIPM است، این دُزیمتر را برحسب کرمای هوا در کیفیتهای مختلف پرتو ایکس و گامای ^{60}Co و همچنین برحسب دُز جذبی آب در مقابل پرتو گامای ^{60}Co سنجهبندی کرد. خطای کلی عاملهای سنجهبندی دُزیمتر برحسب کرمای هوا و دُز جذبی آب بترتیب $1/2\%$ و 1% ، است. پایداری دراز مدت پاسخ دستگاه دُزیمتری به وسیله یک چشمه آزمایشی مرجع سنجیده می‌شود. تغییرات پاسخ دستگاه در طول سالها اندازه‌گیری همواره کمتر از 0.5% بوده است. شکل ۱ نمودار پایداری پاسخ دستگاه دُزیمتری را طی سالهای ۱۹۸۷-۹۷ (۱۳۶۶-۷۶) نشان می‌دهد.

دستگاه دُزیمتری مرجع همواره در آزمایشگاه نگهداری می‌شود و اصولاً از آن برای سنجهبندی

۲- دُزیمتری مقایسه‌ای با استفاده از دُزیمترهای

ترمولومینسانس (TLD)

برنامه دُزیمتری مقایسه‌ای آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در سطح پرتودرمانی، برای ارزیابی درستی اندازه‌گیریهای انجام شده توسط آزمایشگاههای دُزیمتری عضو شبکه SSDL، از سال ۱۳۶۰ تا ۱۳۶۹ هر دو سال یکبار و از سال ۱۳۷۰ تاکنون سالانه از طریق ارسال دُزیمترهای TLD توسط آژانس دنبال شده است. این دُزیمترها، که بشکل کپسولهای استوانه‌ای شکل حاوی گرد LiF هستند، در باریکه‌های پرتوگامای ^{60}Co و ایکس شتابدهنده، به شرح زیر، تحت تابش معین (۲ Gy) قرار گرفته سپس به آزمایشگاه دُزیمتری IAEA عودت داده می‌شوند. این آزمایشگاه دُز جذبی کپسولها را اندازه‌گیری می‌کند و نتیجه را گزارش می‌دهد.

۴-۱- دُزیمتری مقایسه‌ای در باریکه پرتوگامای ^{60}Co

برای پرتو دادن به دُزیمترهای TLD در میدان پرتوگامای ^{60}Co ، از دستگاه پرتودرمانی Therapy Unit Picker V9، که در بخش دُزیمتری استاندارد موجود است، استفاده می‌شود: ابتدا دُز جذبی آب تحت شرایط معینی در یک فانتوم آب در محور مرکزی باریکه پرتو اندازه‌گیری می‌شود. شرایط مرجعی که برای دُزیمتری دستگاههای پرتودرمانی ^{60}Co ، هم در اکثر مراکز پرتودرمانی و هم در دُزیمتری مقایسه‌ای، توسط بخش دُزیمتری استاندارد بکار می‌روند بدین قرار است:

فاصله چشمه تا سطح فانتوم: $\text{SSD} = 80 \text{ cm}$

ابعاد میدان پرتو در سطح فانتوم: $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$

عمق آب: $d_w = 5 \text{ cm}$

فانتوم مورد استفاده مکعبی است به ابعاد $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ با دیواره‌هایی از جنس پلکسی گلاس (PMMA) به ضخامت 1 cm ، و پنجره ورودی پرتو به ضخامت 3 mm است که در بخش دُزیمتری استاندارد طراحی و ساخته شده است. می‌توان اتاقک یونش را با استفاده از پوشش پلاستیکی ضد آب در هر نقطه دلخواه در این فانتوم قرار داد.

برای تعیین دُز جذبی در باریکه پرتوگامای ^{60}Co در شرایط مرجع، می‌توان به دو راه عمل کرد: راه اول اینست که بعد از قرار دادن اتاقک یونش استاندارد NPL در عمق $d_w = 5 \text{ cm}$ فانتوم، با استفاده از فاکتور سنج‌بندی این اتاقک برحسب دُز جذبی آب یعنی « $N_{D,w,Co} (\text{Gy/C})$ » که توسط آزمایشگاه دُزیمتری IAEA و با استناد به سنج‌بندی مستقیم برحسب دُز جذبی آب در BIPM ارائه شده است دُز جذبی « $D_w(5 \text{ cm})$ » را بدست آوریم.

$$D_w(5 \text{ cm}) = M N_{D,w,Co} \quad (3)$$

M مقدار خوانده شده روی الکترومتر برحسب بار الکتریکی C (کولن) است که تصحیح لازم برای تغییرات دمای آب فانتوم « T » و فشار هوای محیط « P » نسبت به دما و فشار مرجع، که معمولاً « $T = 20^\circ \text{C}$ و « $P = 1013/25 \text{ mb}$ » است، در مورد آن اعمال شده است

$$(k_{TP} = \frac{T(C) + 273/2}{293/2} * \frac{1013/25}{P(\text{mb})})$$

راه دوم، که روش عمده و اساسی برای تعیین دُز جذبی آب بشمار می‌رود، استفاده از فاکتور سنج‌بندی اتاقک

حفرة سنجه‌بندی شده براگ-گری در نظر گرفت و برای تمام پرتوهای یونساز به کار برد. در معادله ۴، $S_{w,air}$ نسبت توان متوقف‌سازی آب به هوا است و مقدار آن بستگی به انرژی باریکه دارد (برای ^{60}Co ، $S_{w,air} = 1/133$). P_u ضریبی است که برای تصحیح اختلال ناشی از حضور اتاقک یونش در فانتوم بکار می‌رود. این ضریب با رابطه زیر تخمین می‌شود:

$$P_u = \frac{\alpha S_{wall,air} (\bar{\mu}_{en}/\rho)_{w,wall} + (1-\alpha) S_{w,air}}{S_{w,air}} \quad (5)$$

α کسری از ایجاد یونش در حفرة اتاقک است که از دیواره اتاقک ناشی می‌شود. $S_{wall,air}$ نسبت توان متوقف‌سازی دیواره به هوا است و $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{w,wall}$ نسبت ضریب جرمی جذب انرژی آب به دیواره است.

پس از تعیین نرخ دُز جذبی آب در عمق ۵ cm فانتوم، کپسولها را یکی پس از دیگری با استفاده از پوشش و نگهدارنده از جنس PMMA در همان عمق از آب قرار داده و به اندازه ۲ Gy پرتو می‌دهیم. در هر دوره دُزیمتری مقایسه‌ای ۴ کپسول TLD توسط IAEA برای هر باریکه پرتو ارسال می‌شود که یکی از آنها به عنوان دُزیمتر کنترل تلقی شده و بدون دادن پرتو همراه با بقیه کپسولها به IAEA برگردانده می‌شود.

* - در بررسی که به توسط یک گروه مشورتی از مستخدمان دُزیمتری در سطح بین‌المللی از ۲۵ تا ۲۸ نوامبر ۱۹۹۶ در وین به عمل آمد، لزوم تجدید نظر در دستورالعمل فعلی تعیین دُز جذبی در باریکه‌های فوتون و الکترون مورد بحث قرار گرفت و در مورد تعویض آن با دستور کار جدیدی که براساس استفاده از فاکتور سنجه‌بندی برحسب دُز جذبی آب باشد توافق شد [۴]. تا تدوین دستور کار جدید، که احتمالاً چند سال بطول خواهد انجامید، ملاک تعیین دُز جذبی همان IAEA-TRS No.277[7] خواهد بود.

یونش برحسب کیمای هوا و تعیین دُز جذبی براساس دستور کار بین‌المللی توصیه شده توسط IAEA است [۷]. طبق این روش دُز جذبی آب در باریکه‌های فوتون و الکترون توسط معادله زیر تعیین می‌شود:

$$D_w(P_{eff}) = M \frac{N_{D,air}}{[N_K (1-g) k_{att} k_m k_{cel}]} S_{w,air} P_u \quad (4)$$

در معادله فوق P_{eff} نقطه مؤثر اندازه‌گیری اتاقک یونش است که جای آن با توجه به نوع باریکه (فوتون یا الکترون) و انرژی آن تعیین می‌شود و در مورد پرتوگامای ^{60}Co در فاصله ۰/۶۲(mm) از محور مرکزی اتاقک استوانه‌ای و در وضعیت نزدیکتری نسبت به منبع پرتو قرار دارد (۲ شعاع داخلی اتاقک است). M مقدار خوانده شده روی الکترومتر است که پیشتر به آن اشاره شد. در روش توصیه شده IAEA، جمله $N_K (1-g) k_{att} k_m k_{cel}$ ، ضریب سنجه‌بندی برحسب دُز جذبی هوای اتاقک یونش است که $N_{D,air}$ نامیده شده است و این ضریب معادل ضریب N_{gas} در دستور کار معرفی شده توسط انجمن فیزیک پزشکی آمریکا (AAPM) است [۹]. در این ضریب، g کسری از انرژی باریکه است که به صورت پرتو برمشتراونگ (ترمزی) از محیط اندازه‌گیری خارج می‌شود (در مورد ^{60}Co ، $g = 0.03$). k_{att} ضریب مربوط به تضعیف پرتو در دیواره اتاقک و k_m و k_{cel} بترتیب ضریب‌های مربوط به هم‌ارز بودن دیواره و الکترومتر مرکزی اتاقک با هوا هستند. ضریب‌های k_{att} و k_m برای اتاقکهای مختلف در دسترس هستند و ضریب k_{cel} هم فقط برای اتاقک NE 2571 حساب شده است ($k_{cel} = 1/0.06$) و برای بقیه ۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۰]. با تعیین ضریب $N_{D,air}$ برای یک اتاقک یونش، می‌توان این اتاقک را

۴-۲- دُزیمتری مقایسه‌ای در باریکه‌های پرتو ایکس با انرژی بالا (شتاب‌دهنده)

آزمایشگاه دُزیمتری IAEA در سال ۱۳۷۱ دُزیمتری مقایسه‌ای در میدان پرتوهای ایکس انرژی بالا را نیز در برنامه کار خود قرار داد. بخش دُزیمتری استاندارد برای پرتودادن به دُزیمترهای TLD در میدان پرتو ایکس انرژی بالا، تاکنون از شتاب‌دهنده خطی الکترون (CGR Saturn 20)، واقع در بخش پرتودرمانی بیمارستان سیدالشهدای اصفهان استفاده کرده است. از این شتاب‌دهنده در هر دو حالت تولید باریکه‌های الکترون و فوتون برای پرتودرمانی استفاده می‌شود که در مورد فوتون قادر است باریکه‌های پرتو ایکس با انرژی اسمی ۱۲ MV و ۱۸ MV را تولید نماید. شرایط مرجع اندازه‌گیری دُز جذبی آب در این باریکه‌ها عبارتند از:

فاصله منبع پرتو تا سطح فانتوم: $SSD = 100 \text{ cm}$

ابعاد میدان در سطح فانتوم: $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$

عمق آب: $d_w = 10 \text{ cm}$

برای تعیین دُز جذبی، لازم است که ابتدا کیفیت باریکه پرتو ایکس را تعیین کنیم. این کیفیت را، که ملاکی از انرژی و قدرت نفوذ پرتو در ماده است، در مورد باریکه‌های ایکس با انرژی بالا، با نسبت دُز جذبی آب در عمق ۲۰ cm به دُز جذبی آب در عمق ۱۰ cm (D_{20}/D_{10}) مشخص می‌کنند*. بنابراین اتاقک یونش نوع فارمر را ابتدا در عمق ۱۰ cm و سپس در عمق ۲۰ cm قرار داده و این نسبت را بدست می‌آوریم. پس از تعیین کیفیت باریکه، نسبت $S_{w,air}$ را، که برحسب تابعی از کیفیت پرتو در منابع مرجع در دسترس است، یافته و فاکتور P_u را نیز حساب می‌کنیم. اکنون داده‌های لازم را برای تعیین نرخ دُز جذبی آب در عمق ۱۰ سانتیمتری فانتوم با استفاده از معادله ۴ در اختیار

داریم. پس از تعیین نرخ دُز جذبی، کپسولهای TLD را یکی پس از دیگری، مانند حالت ^{60}Co ، اما این بار در عمق ۱۰ سانتیمتری آب قرار داده و به اندازه ۲ Gy پرتو می‌دهیم.

۴-۳- نتایج دُزیمتری مقایسه‌ای

کپسولهای TLD پس از پرتودهی به وسیله باریکه‌های پرتو گاما و ایکس انرژی بالا، به آزمایشگاه دُزیمتری IAEA عودت داده شده و دُز جذب شده در آنها آنجا اندازه‌گیری می‌شود. درصد اختلاف مجاز مورد توافق بین دُز جذبی اندازه‌گیری شده توسط آزمایشگاه دُزیمتری IAEA و مقدار اعلام شده توسط SSDL، با توجه به خطای ذاتی در پاسخ دُزیمترهای TLD، $\pm 3/5\%$ است [۶]. شکل ۲ و جدولهای ۱ و ۲ نتایج حاصل از شرکت بخش دُزیمتری استاندارد را در دوره‌های متوالی برنامه دُزیمتری مقایسه‌ای IAEA طی سالهای ۷۶-۱۳۶۶ (۹۷-۱۹۸۷) نشان می‌دهد. آزمایشگاه دُزیمتری IAEA نتیجه دُزیمتری مقایسه‌ای را به صورت درصد انحراف نسبی دُز جذبی اعلام شده توسط آزمایشگاه SSDL (I_{SSDL}) از دُز جذبی اندازه‌گیری شده توسط IAEA (I_{IAEA}) به صورت $\Delta\% = \frac{I_{SSDL} - I_{IAEA}}{I_{IAEA}} \times 100$ گزارش می‌دهد. در جدولهای ۱ و ۲ تعداد آزمایشگاههای دُزیمتری شرکت‌کننده همراه با میانگین نتایج هر دوره

* - در مورد پرتو گامای ^{60}Co ، انرژی فوتونهای گسیل شده معلوم بوده (MeV) $1/132$ و $1/117$ و در نتیجه کیفیت باریکه کاملاً مشخص است. اما در مورد پرتوهای ایکس، با طیفی از انرژی فوتونها مواجه هستیم. کیفیت باریکه‌های ایکس با انرژی پایین و متوسط را با اندازه‌گیری HVL پرتو برحسب ضخامت از آلومینیوم یا مس تعیین می‌کنند. در مورد باریکه‌های ایکس با انرژی بالا (شتاب‌دهنده) تعیین کیفیت برحسب قدرت نفوذ باریکه در آب صورت می‌گیرد.

جدول ۱- نتایج کلی دُزیمتری مقایسه‌ای در میدان پرتوگاما ^{60}Co

Year	1987/88	1989/90	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Participants, n	35	42	49	41	42	59	43	50	
						(5)	(5)	(5)	
$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \% \pm 1\sigma$	-0.7 ± 2.1	-1.6 ± 2.4	-1.3 ± 1.7	-1.0 ± 2.2	-0.2 ± 1.5	-0.3 ± 1.8	-0.7 ± 1.2	-0.6 ± 1.3	
						(0.3 ± 1.3)	(-0.2 ± 1.2)	(0.5 ± 0.8)	
$\Delta_{\text{Iran}} \%$	-3.2	-2.8	-0.9	2.3	0.8	-0.7	-0.7	0.2	-1.5
			P1:0.1						
			P2:-1.0						
			IAEA:-0.5						

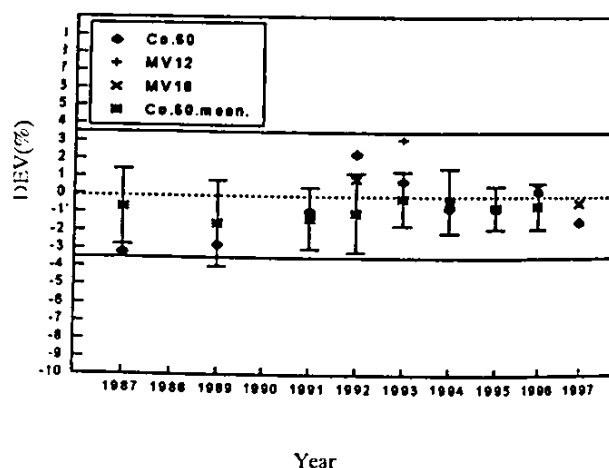
دُزیمتری مقایسه‌ای مندرج است. تعداد آزمایشگاه‌های دُزیمتری استاندارد اولیه شرکت‌کننده در دُزیمتری مقایسه‌ای و میانگین نتایج مربوط به آنها نیز در مواردی که در گزارش‌های IAEA به صراحت ذکر شده در همین جدولها در داخل پرانتز آمده است. بطوریکه ملاحظه می‌شود نتایج دُزیمتری مقایسه‌ای در مورد بخش دُزیمتری استاندارد همواره در محدوده $\pm 3/5\%$ قرار داشته و بجز دو مورد مربوط به ^{60}Co در سالهای ۱۹۸۷ و ۱۹۹۲ و یک مورد در سال ۱۹۹۳ مربوط به پرتو ایکس انرژی بالا (۱۲MV) از میانگین نتایج دُزیمتری کمتر از یک انحراف معیار ($\pm 1\sigma$) فاصله داشته است.

۵- سنجه‌بندی مقایسه‌ای اتاقک یونش

در برنامه سنجه‌بندی مقایسه‌ای IAEA، که تا بحال دو دوره در سالهای ۱۹۹۵ و ۱۹۹۷ به اجرا درآمده است، از طرف بخش دُزیمتری استاندارد نیز یک اتاقک یونش از نوع فارمر با دیواره گرافیتی و با مشخصه 0.6 cc NE 2505/3 در میدان پرتوگامای ^{60}Co برحسب کرمای هوا و دُز جذبی آب، در مقایسه با استاندارد فعلی بخش در سطح پرتودرمانی، سنجه‌بندی شده و به آزمایشگاه دُزیمتری IAEA ارسال گردید. نحوه سنجه‌بندی و نتایج آن در

جدول ۲- نتایج کلی دُزیمتری مقایسه‌ای در باریکه‌های پرتو ایکس انرژی بالا (شتابدهنده)

Year	1992	1993	1996	1997
Participants, n	33	30	32	
			(7)	
$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \% \pm 1\sigma$	0.1 ± 4.0	0.2 ± 2.6	-0.3 ± 1.4	
			(-0.2 ± 0.4)	
$\Delta_{\text{Iran}} \%$	0.9(18MV)	3.1(12MV)	0.5(18MV)	-0.4(18MV)



شکل ۲- نتایج دُزیمتری مقایسه‌ای پرتوهای گاما و ایکس در مورد بخش دُزیمتری استاندارد. میانگین نتایج همه آزمایشگاه‌های SSDL شرکت‌کننده در هر دوره برنامه دُزیمتری مقایسه‌ای در مورد ^{60}Co با یک انحراف معیار با علامت «*» نشان داده شده است.

مقایسه با سنج‌بندی انجام شده در IAEA، به شرحی که بدنبال می‌آید، کیفیت مطلوب بخش دُزیمتری استاندارد را در ارائه خدمات دُزیمتری و سنج‌بندی در سطح پرتودرمانی تایید می‌کند.

۵-۱- سنج‌بندی برحسب کرمای هوا

سنج‌بندی اتاقک یونش فارمر برحسب کرمای هوا، در باریکه پرتو گامای ^{60}Co در مقایسه با دستگاه دُزیمتری استاندارد ثانویه NPL با روش جایگزینی (Substitution) انجام شده است. به این ترتیب که ابتدا نرخ کرمای هوا، $K_{\text{air}}(\text{Gy/min})$ ، را در نقطه مرجعی در هوا روی محور مرکزی باریکه پرتو گامای دستگاه ^{60}Co Picker V9 به وسیله اتاقک یونش استاندارد NPL اندازه‌گیری و سپس با گذاشتن اتاقک یونش فارمر به جای آن، پاسخ دُزیمتر در مقابل پرتو گاما، یعنی ضریب سنج‌بندی آن برحسب کرمای هوا، N_K ، تعیین شده است. آزمایشگاه دُزیمتری نیز در شرایط نسبتاً مشابهی اتاقک یونش مذکور را سنج‌بندی کرده است. ضریب‌های سنج‌بندی برحسب کرمای هوا که توسط دو آزمایشگاه دُزیمتری SSDL و IAEA ارائه شده‌اند بشرح زیر است.

سال	$N_{KSSDL}(\text{mGy/nC})$	$N_{KIAEA}(\text{mGy/nC})$
۱۹۹۵ (۱۳۷۴)	$40/55 \pm 0/40$	$40/75 \pm 0/25$
۱۹۹۷ (۱۳۷۶)	$40/50 \pm 0/30$	$40/75$

بطوریکه ملاحظه می‌شود اختلاف نسبی ضریب‌های سنج‌بندی ارائه شده کمتر از ۵٪ و در حد خطای اندازه‌گیریها است.

۵-۲- سنج‌بندی برحسب دز جذبی آب

برای سنج‌بندی اتاقک یونش فارمر برحسب دز جذبی

آب، ابتدا نرخ دز جذبی آب، $D_w(\text{mGy/min})$ ، را در نقطه مرجعی در فانتوم آب ($d_w = 5 \text{ cm}$)، در میدان پرتو گامای ^{60}Co دستگاه Picker V9 طبق آنچه که در بند ۴-۱ شرح داده شد، با اتاقک استاندارد بدست می‌آوریم. سپس اتاقک فارمر موردنظر را به جای اتاقک استاندارد گذاشته ضریب سنج‌بندی $N_{D,w,Co} = D_w/M$ را برحسب دز جذبی آب برای آن تعیین می‌کنیم.

ضریب‌های سنج‌بندی برحسب دز جذبی آب، که توسط دو آزمایشگاه دُزیمتری SSDL و IAEA ارائه شده‌اند و اختلاف نسبی آنها در حد ۵٪ به شرح زیر است:

سال	$N_{D,w,SSDL}(\text{mGy/nC})$	$N_{D,w,IAEA}(\text{mGy/nC})$
۱۹۹۵ (۱۳۷۴)	$43/70 \pm 0/50$	$43/94 \pm 0/45$
۱۹۹۷ (۱۳۷۶)	$44/30 \pm 0/60$	$44/5$

لازم به توضیح است که در حال حاضر آژانس بین‌المللی انرژی اتمی ارائه ضریب‌های سنج‌بندی دُزیمترها را برحسب دز جذبی آب برای مصارف درمانگاهی توصیه نمی‌کند [۱۱]. اندازه‌گیری دز جذبی آب در باریکه‌های فوتون و الکترون طبق دستور کار IAEA براساس استفاده از ضریب سنج‌بندی دز جذبی هوای اتاقک یونش، $N_{D,air}$ ، قرار دارد که از ضریب سنج‌بندی اتاقک برحسب کرمای هوا، N_K ، محاسبه می‌شود. اندازه‌گیری دز جذبی آب با استفاده از فاکتور $N_{D,w}$ در مقایسه با تعیین دز جذبی با روش IAEA در مورد پرتو گامای ^{60}Co منجر به اختلاف غیر موجهی در حد ۱٪ می‌شود. این اختلاف در مورد باریکه‌های فوتون با انرژی بالا (شتابدهنده) بیشتر است. از اینرو کاربرد $N_{D,w}$ در حال حاضر منحصر به آزمایشگاه‌های دُزیمتری است.

References

1. ICRU Report 24, "Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by means of X or Gamma Rays in Radioterapy Procedures", (1976).
2. IAEA Safety Series No. 115, "International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources", Vienna, (1996).
3. IAEA Publication, "Secondary Standard Dosimetry Laboratories; Developments and Trends", Vienna, (1985).
4. SSDL Newsletter, No. 36, (1997).
- ۵- عبدالرضا سلیمانیان، «گزارش تحلیلی فعالیتهای بخش دُزیمتری استاندارد در زمینه کنترل کیفی در پرتودرمانی»، نشریه انرژی هسته‌ای، شماره ۲۰، تابستان ۱۳۷۶.
6. SSDL Newsletter, No. 33, (1995).
7. IAEA-TRS No. 277, "Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams: An International Code of Practice", Vienna, (1987).
8. F.H. Attix, "Radiological Physics and Radiation Dosimetry (1986): Tables of stopping powers and ranges of electrons and positrons, By M. J. Berger, and S.M. Seltzer, (1983), NBSIR-82-2550-A, National Bureau of Standards, Washington, DC. 20234".
9. AAPM, Task Group 21, "A Protocol for the Determination of Absorbed Dose for High Energy Photon and Electron Beams", Med. Phys. 10 (1983) 741.
10. IAEA-TRS No. 381, "Use of Plane Parallel Ionization Chambers in High Energy Electron and Photon Beams", Vienna, (1997).
11. SSDL Newsletter No. 35, (1996).

Abbreviations

AAPM	American Association of Physicists in Medicine
BIPM	Bureau International des Poids Mesures
CARE	Coherence and Accuracy of Reference Instrumentation
IAEA	International Atomic Energy Agency
NPL	National Physical Laboratory
PSDL	Primary Standard Dosimetry Laboratory
SSDL	Secondary Standard Dosimetry Laboratory
TLD	Thermoluminescence Dosimeter
WHO	World Health Organization

**INTERNATIONAL EVALUATION OF RADIATION MEASURING
STANDARDS AT THE SECONDARY STANDARD DOSIMETRY
LABORATORY OF IRAN (SSDL)**

*A. Solimanian, M. Gavahi, M. Ghafoori, A. Shahvar, A. Alipoor
Nuclear Research Center for Agriculture and Medicine
Atomic Energy Organization of Iran*

Abstract

SSDLs have the responsibility to provide the radiation users, in particular at therapy and protection levels, with the radiation standards traceable to the international measurement system. The IAEA Dosimetry Laboratory has developed two measurement assurance programmes, TLD Postal Dose International and Ionization Chamber Calibration Factors Intercomparison, to monitor the quality of therapy level standards disseminated by the members of the IAEA/WHO Network of SSDLs. This paper describes the performance of Dosimetry and calibration intercomparisons in Co-60 and high energy X-ray beams at the SSDL of Iran, and represents the capability of this laboratory in maintaining and issuing therapy level radiation standards according to the results of the IAEA quality assurance programmes during 1987-1997.