

طراحی، ساخت و بررسی ویژگیهای «اتاقکهای یونش صفحه موازی»، برای دُزیمتری باریکه‌های الکترون مورد استفاده در پرتودرمانی

عبدالرضا سلیمانیان، محمدرضا انصاف، مصطفی غفوری، بخش دُزیمتری استاندارد (SSDL)

سازمان انرژی اتمی ایران

با همکاری:

آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA)

و

بخش پرتودرمانی مرکز پزشکی سیدالشهداء - اصفهان

اردیبهشت ۱۳۷۸

چکیده

اتاقکهای یونش، وسایل عملی و استاندارد برای دُزیمتری باریکه‌های فوتون و الکترون در پرتودرمانی به شمار می‌روند. بر این اساس، دستورالعملهایی به توسط نهادهای ملی و بین‌المللی، از جمله آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA)، در زمینه نحوه استفاده از اتاقکهای یونش مناسب برای تعیین دُز جذبی باریکه‌های فوتون و الکترون تدوین شده‌اند. در این دستورالعملها به لزوم استفاده از اتاقکهای یونش صفحه موازی^۱ در دُزیمتری باریکه‌های الکترون، به ویژه در انرژیهای کمتر از ۱۰ MeV تاکید شده است. با توجه به احتمال گسترش استفاده از شتابدهنده‌های الکترون در مراکز پرتودرمانی کشور، کوششهایی در جهت ساخت و استفاده از اتاقکهای یونش صفحه موازی در بخش دُزیمتری استاندارد (SSDL)^۲، طبق آخرین دستورالعمل دُزیمتری IAEA، بعمل آمده است که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود.

۱- مقدمه:

دستگاههای شتاب‌دهنده خطی الکترون و رادیوایزوتوپ Co-60 در زمان حاضر ابزارهای عمده و رایج پرتودرمانی خارجی در اکثر مراکز پرتودرمانی جهان بشمار می‌روند. تعیین هر چه دقیق‌تر دُز جذبی باریکه‌های فوتون و الکترون انرژی بالا، که به وسیله این دستگاهها تولید می‌شوند، در پرتودرمانی از اهمیت خاص برخوردار است. حداکثر خطای قابل قبول در ارائه مقدار دُز تجویز شده به بیماران ۵٪ برآورد می‌شود [۱] و در برخی از درمانها دقت بالاتری نیز مورد نظر است [۲].

تا سال ۱۳۶۰ دُزیمتری باریکه‌های فوتون و الکترون پر انرژی، یا به اصطلاح باریکه‌های مگاولتاژ، با استفاده از دستورالعملهای تدوین شده توسط نهادهای ملی یا بین‌المللی صورت

می‌گرفت [۳-۷]. در این دستورالعملها روشهای متعددی برای دُزیمتری باریکه‌های فوتون و الکترون در پرتودرمانی ارائه شده بوده ولی همه آنها یک وجه مشترک داشتند و آن استفاده از اتاقک یونش بود که در مورد پرتوگامای Co-60 یا پرتو ایکس ۲MV، در آزمایشگاه دُزیمتری استاندارد برحسب مقدار پرتودهی سنجه‌بندی (کالیبره) می‌شد. در این روشها، یا بطور کلی در روش حفرة سنجه‌بندی شده، مقدار یونش اندازه‌گیری شده در یک فانتوم راد باریکه‌های پر انرژی، با بکار بردن فاکتور سنجه‌بندی اتاقک یونش برحسب مقدار پرتودهی (N_x) و فاکتورهای تبدیل دُز مناسب به نام C_i (برای فوتون) و C_E (برای الکترون)، به دُز جذبی (D) تبدیل

1- Plane - parallel ionisation chambers

2- Secondary Standard Dosimetry Laboratory

می‌گردند:

$$D_m = M_x N_x C_x$$

$$D_m = M_E N_x C_E$$

استخراج فاکتورهای تبدیل دُز برای اندازه‌گیری پرتودهی در فانتوم بود کنار گذاشته شد و به جای آن فاکتور $N_{D,air}$ - فاکتور سنج‌بندی دُز جذبی هوای اتاقک یونش - (در دستورالعمل NACP) و یا N_{gas} - فاکتور سنج‌بندی گاز حفره - (در دستورالعمل AAPM) که هم‌ارز می‌باشند عرضه شد. علاوه بر این چون فاکتورهای تبدیل دُز (C_x برای فوتونها و C_E برای الکترونها) با طیفهایی که بوسیله باریکه‌های فوتون و الکترون در فانتوم ایجاد می‌شوند سازگار نبودند، استفاده از این فاکتورها نیز متوقف گردید^۲ و بجای آنها از نسبتهای توان متوقف‌سازی محیط اندازه‌گیری (آب) به هوا ($S_{w,air}$)، به‌مراه فاکتورهای دیگری که نشان‌دهنده تأثیر حضور اتاقک یونش در فانتوم، ابعاد اتاقک و تفاوت جنس دیواره آن و فانتوم دُزیمتری بودند، استفاده شد.

آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در سال ۱۹۸۷/۱۳۶۶ دستورالعمل بین‌المللی IAEA - TRS No.277 را برای تعیین دُز جذبی باریکه‌های فوتون و الکترون منتشر کرد [۱۳]. در این دستورالعمل نحوه تعیین دُز جذبی آب با استفاده از اندازه‌گیریهای انجام شده به وسیله اتاقک یونشی که برحسب کرمای هوا در انرژی پرتوگامای Co-60 سنج‌بندی می‌شود، شرح داده شده است. از هنگام انتشار این دستورالعمل، توصیه‌های متعددی در باره نحوه استفاده از اتاقکهای یونش صفحه موازی منتشر شده و همچنین اطلاعات بیشتری در مورد اتاقکهای یونش استوانه‌ای در دسترس قرار گرفته است. براین اساس، IAEA در ۱۳۷۱ یک گروه کار بین‌المللی را برای تجدیدنظر در دستورالعمل IAEA-TRS No.277 تشکیل داد. این گروه نیز تشکیل یک کمیسیون مشورتی را برای تهیه گزارش فنی در باره نحوه استفاده از اتاقکهای یونش صفحه موازی در دُزیمتری باریکه‌های الکترون و فوتون پر انرژی پیشنهاد کرد. ماحصل کار این کمیسیون تدوین گزارش IAEA-TRS NO.381 بود که در ۱۳۷۵ با عنوان «استفاده از اتاقکهای یونش صفحه موازی در باریکه‌های الکترون و فوتون پر انرژی» انتشار یافت [۱۴]. در این گزارش، که در واقع ادامه دستورالعمل IAEA-TRS NO.277 و مکمل آن است، روشهای

این شیوه نسبتاً ساده و تا اندازه‌ای دقیق و یکنواخت به مدت تقریباً دو دهه در سراسر مراکز پرتودرمانی جهان برای دُزیمتری باریکه‌های فوتون و الکترون پر انرژی بکار می‌رفت. با پیشرفت مفاهیم دُزیمتری و اصلاح داده‌ها و دستگاههای اندازه‌گیری، تجدیدنظر در نحوه تعیین دُز جذبی باریکه‌های پر انرژی اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسید. باید توجه داشت که روش حفره سنج‌بندی شده کاملاً متکی به سنج‌بندی اتاقک یونش برحسب مقدار پرتودهی است که در تحلیل نهایی، دُز هوای درون اتاقک را مشخص می‌کند بدون این که تأثیر مواد ساختاری و ابعاد اتاقک در این دُز منظور شوند. هنگام استفاده از C_x برای دُزیمتری باریکه‌های فوتون، فرض بر این بود که اولاً ماده درون اتاقک ترکیبی معادل هوا دارد ثانیاً فاکتورهای جایگزینی یکسانی برای تمام اتاقکها، بدون توجه به انرژی باریکه و یا عمق اندازه‌گیری در فانتوم، بکار می‌رفت. همچنین هنگام استفاده از C_E برای دُزیمتری باریکه‌های الکترون، فرض بر این بود که اتاقک ترکیبی معادل هوا دارد و تنها فاکتور تصحیح مورد نیاز، ضریب وابستگی انرژی الکترون به عمق فانتوم است. برای رفع این نواقص، پژوهشگران درصدد تجدیدنظر در مفاهیم و داده‌های مورد استفاده در دُزیمتری باریکه‌های پر انرژی و انجام اصلاحات لازم برآمدند.

در سال ۱۳۵۹ (۱۹۸۰م) انجمن فیزیک پزشکی کشورهای اروپای شمالی (NACP) دستورالعمل واحدی را برای دُزیمتری باریکه‌های فوتون و الکترون از ۱ تا ۵۰ مگا الکترون ولت) منتشر کرد [۸] و در ۱۳۶۰ نیز متممی برای دُزیمتری الکترونها کمتر از ۱۵ MeV به منظور استفاده از اتاقکهای یونش صفحه موازی به آن افزود [۹]. در سال ۱۳۶۲ انجمن فیزیک پزشکی امریکا (AAPM) نیز دستورالعمل جامعی با عنوان «دستورالعمل تعیین دُز جذبی باریکه‌های فوتون و الکترون پر انرژی» انتشار داد که در آن اصلاحات اساسی، برای بالابردن دقت دُزیمتری بعمل آمده است [۱۰]. از جمله، فاکتور سنج‌بندی پرتودهی N_x که اساس

۲- انجمن فیزیک پزشکی انگلیس (HPA) در سالهای ۱۹۸۲ و ۱۹۸۵ دو دستورالعمل جداگانه را برای دُزیمتری باریکه‌های فوتون [۱۱] و الکترون [۱۲] در پرتودرمانی منتشر کرد. در این دستورالعملها، برای سهولت محاسبات دُزیمتری، فاکتورهای C_x و C_E منحصر برای چند اتاقک رایج در مراکز پرتودرمانی انگلیس ارائه شده‌اند.

سنج‌بندی اتاقک‌های یونش صفحه موازی برای باریکه‌های الکترون و فوتون (Co-60) و استفاده از آنها در تعیین دُز جذبی شرح داده شده است.

پس از انتشار دستورالعمل IAEA-TRS No.381، بخش دُزیمتری IAEA از دست‌اندرکاران امور دُزیمتری در پرتودرمانی درخواست کرد که با اجرای دستورالعمل جدید، دقت داده‌ها و روش‌های مندرج در آنرا بررسی کنند. IAEA در جهت تاکید بر اهمیت موضوع، برنامه تحقیقاتی سازمان یافته (CRP^۲) را نیز در سال ۱۳۷۵ به آن اختصاص داد. بخش دُزیمتری استاندارد سازمان انرژی اتمی ایران، که همواره شرکت در برنامه‌های بین‌المللی دُزیمتری و سنج‌بندی مقایسه‌ای IAEA را به عنوان یکی از شاخص‌های عمده کنترل کیفی دنبال کرده و تا به حال هم‌کارنامه مطلوبی چه از لحاظ نتایج شرکت در برنامه‌های مذکور و چه از لحاظ تأمین پیوندهای لازم مراکز پرتودرمانی با استانداردهای بین‌المللی اندازه‌گیری پرتوهای یونساز داشته است [۱۵ و ۱۶]، بر آن شد تا ضمن بکار بستن دستورالعمل اخیر کوشش‌هایی نیز در جهت ساخت اتاقک‌های صفحه موازی بعمل آورد. به این منظور طی مراحل که شرح آن بدنبال خواهد آمد، ابتدا نمونه‌هایی از اتاقک‌های یونش صفحه موازی با رعایت مشخصات مناسب این نوع اتاقک‌ها ساخته شد و آزمون‌های اولیه در مورد آنها انجام گرفت. سپس پاسخ دو نمونه از اتاقک‌های مذکور در مقابل پرتوگامای Co-60 تعیین گردید، و در آخر باریکه‌های الکترون یک دستگاه شتاب‌دهنده خطی پرتودرمانی، براساس دستورالعمل جدید و با استفاده از یک نمونه تجاری اتاقک یونش صفحه موازی دُزیمتری شد و پاسخ یکی از دو اتاقک ساخته شده نیز در باریکه‌های الکترون مورد آزمون قرار گرفت.

ساخت اتاقک‌های یونش تجربه ارزشمندی است که اهمیت آن بر دست‌اندرکاران امور دُزیمتری پوشیده نیست. امید می‌رود که با تکمیل برخی از جنبه‌های تکنیکی و کارگاهی، نتایج بهتری در این زمینه بدست آید.

۲- طراحی و ساخت اتاقک‌های یونش صفحه موازی

مزایای کاربرد اتاقک‌های یونش صفحه موازی در دُزیمتری باریکه‌های مورد استفاده برای پرتودرمانی، بویژه باریکه‌های الکترون با انرژی کمتر از ۱۰ MeV، در اکثر دستورالعمل‌های ملی و

بین‌المللی به صراحت عنوان شده است. طراحی و مشخصات هندسی اتاقک یونش صفحه موازی طوری است که این اتاقک را برای اندازه‌گیری‌های یونش در نواحی که میزان افزایش یا کاهش دُز زیاد است و همچنین به حداقل رساندن خطا در محل نقطه مؤثر اندازه‌گیری، به حد مطلوب می‌رساند.

۲-۱- ویژگی‌های کلی

جزئیات ساختمانی اتاقک‌های یونش صفحه موازی به قرار زیر است [۱۴]:

- شکل هندسی حجم هوای اتاقک، استوانه قائم دیسک ماندی است که یک طرف آنرا پنجره ورودی پرتو تشکیل می‌دهد (شکل ۱). سطح داخلی پنجره ورودی (و در پاره‌ای از موارد دیواره جانبی استوانه) رسانا بوده و الکتروود خارجی را تشکیل می‌دهد (w). الکتروود داخلی، دیسک مدور رسانایی است (b) که در بدنه عایق اتاقک (a) قرار می‌گیرد و در طرف دیگر استوانه، مقابل پنجره ورودی است. حجم مؤثر اتاقک بخشی از حجم کل است که خطوط نیروی الکتریکی بین الکتروودهای داخلی و خارجی از آن می‌گذرند.

- الکتروودهای داخلی و خارجی در بدنه اتاقک، که کابل هم به آن وصل می‌شود، سوار می‌شوند. کابل معمولاً به موازات پنجره ورودی از بدنه اتاقک خارج می‌شود (c).

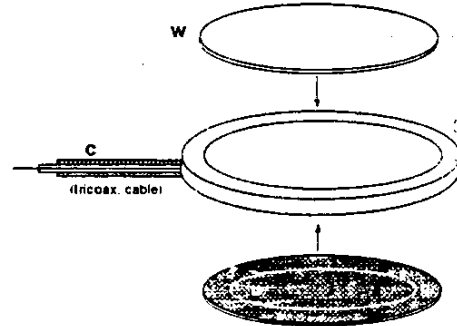
- حجم مؤثر اتاقک معمولاً بین ۵۰۰ cc تا ۵۰۰۰ cc است.

- ولتاژ قطبش به الکتروود خارجی اعمال می‌شود و با الکتریکی تولید شده در حجم اتاقک از طریق الکتروود داخلی جمع‌آوری می‌گردد.

- معمولاً الکتروود سومی (g) به نام الکتروود محافظ وجود دارد که از لحاظ الکتریکی به هیچیک از الکتروودهای دیگر متصل نیست ولی طوری طراحی می‌شود که در همان پتانسیل الکتروود داخلی نگهداشته شود. در طراحی اتاقک کاملاً حفاظت شده، این الکتروود در حجم هوای اتاقک به صورت حلقه‌ای در اطراف الکتروود داخلی تعبیه می‌شود و کار آن جمع‌آوری بار ناشی ناشی از ولتاژ بالا روی

4- IAEA CRP E2 - RC - 641. Dose determination with plane - parallel ionization chambers in therapeutic electron and photon beams.

الکتروود خارجی است.



شکل ۱ - اجزای اصلی اتاقک یونش صفحه موازی: a. بدنه اتاقک، w. پنجره ورودی پرتو، b. الکتروود داخلی، g. الکتروود محافظ و c. کابل اتصال

ابعاد اتاقکهای صفحه موازی مناسب برای باریکه‌های الکترون و همچنین باریکه‌های فوتون ^{60}Co و ایکس پرتو عبارتند از: ضخامت پنجره ورودی ۱mm یا کمتر، فاصله بین الکتروودهای داخلی و خارجی ۲mm یا کمتر، قطر الکتروود داخلی ۲۰mm یا کمتر.

۲-۲ - ویژگیهای اتاقکهای یونش صفحه موازی برای باریکه‌های الکترون

اتاقکهای یونش صفحه موازی برای اندازه‌گیری باریکه‌های الکترون با انرژی کمتر از ۱۰MeV توصیه شده‌اند و برای انرژیهای کمتر از ۵MeV حتماً باید بکار روند. این نوع اتاقکها برای انرژیهای بالاتر از ۱۰MeV نیز مناسبند.

این اتاقکها ترجیحاً طوری ساخته می‌شوند که امکان استفاده از آنها در فانتومهای آب نیز میسر باشد و بدنه آنها تا حد امکان همگن بوده و هم ارز آب عمل کند، یعنی توانهای متوقف‌سازی جرمی و خطی آنها همانند آب باشد. اتاقکهایی که برای دزیمتری در فانتوم‌های جامد طراحی می‌شوند باید تا حد امکان از همان جنس فانتوم مورد استفاده ساخته شوند. اگر اتاقک از مواد مختلفی ساخته شود و در نتیجه بسیار ناهمگن باشد در این صورت روش ساده‌ای برای انتخاب جنس فانتوم وجود نخواهد داشت.

یکی از مزایای عمده استفاده از اتاقکهای یونش صفحه موازی، که علت اصلی رجحان آن بر اتاقکهای استوانه‌ای در دزیمتری

باریکه‌های الکترون ($< 10\text{MeV}$) به شمار می‌رود، امکان به حداقل رساندن اختلال ناشی از اثر حفره اتاقک بر شاریدگی الکترون در فانتوم است. اتاقکهای صفحه موازی را می‌توان طوری طراحی کرد که در واقع شاریدگی الکترون را از طریق پنجره ورودی نمونه‌گیری کند و در نتیجه ورود الکترونها از دیواره‌های جانبی ناچیز شود. این طرح، در نظر گرفتن مکان نقطه موثر اندازه‌گیری (P_{eff}) را در مرکز سطح جلویی حفره هوا (مرکز الکتروود خارجی) توجیه می‌کند (برای اینگونه اتاقکها فرض بر این است که وضعیت P_{eff} با انرژی تغییر نمی‌کند). به دلایل عملی، انتخاب نقطه مرجع اتاقک نیز در همان وضعیت مناسب است. برای اینکه ضرب تصحیح اختلال ناشی از وجود حفره اتاقک در فانتوم (P_{cov}) به حداقل برسد و P_{eff} نیز با تقریب مستدلی در وضعیت یاد شده (یعنی مرکز سطح جلویی اتاقک) باشد، لازم است که اتاقک صفحه موازی دارای حفره هوای تخت باشد، یعنی نسبت قطر حفره به ارتفاع آن زیاد باشد (در حد بزرگی ۱۰). ارتفاع حفره (یعنی ضخامت حفره هوا) که همان فاصله بین دو الکتروود داخلی و خارجی است، نباید از ۲mm تجاوز کند و الکتروود داخلی نیز باید با الکتروود محافظی که پهنای آن کمتر از ۱/۵ برابر ارتفاع حفره نباشد، محصور گردد. رعایت این ابعاد تاثیر اختلال حضور اتاقک در فانتوم اندازه‌گیری را به حد کافی کاهش می‌دهد. از این گذشته، برای کاستن اثر عدم یکنواختی میدان پرتو، قطر الکتروود داخلی نباید از ۲۰mm تجاوز کند. علاوه بر این، ضخامت پنجره ورودی اتاقک باید حداکثر ۱mm باشد تا اندازه‌گیری در عمقهای اندک فانتوم میسر گردد. همچنین لازم است که حفره هوا دارای منفذ تهویه باشد تا با فشار و دمای خارج زودتر به تعادل برسد.

۲-۳ - ساخت اتاقکهای یونش صفحه موازی در بخش دزیمتری استاندارد

با توجه به مشخصات مناسب اتاقکهای صفحه موازی که شرح داده شد، اقدام به ساخت این گونه اتاقکها با استفاده از امکانات کارگاهی مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای گردید. بدنه اتاقکها و همچنین الکتروودها، همه از جنس پرمپکس (PMMA) انتخاب شده‌اند و فقط پوشش نازکی از گرافیت ($< 0.02\text{mm}$) روی

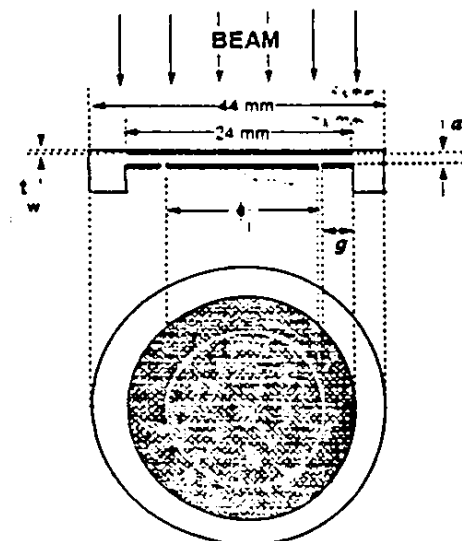
صفحات الکترودها ایجاد شده است. بنابراین با تقریب خوبی می‌توان فرض کرد که ساختمان اتاقکها کاملاً همگن بوده و هنگام استفاده از آنها در فانتوم‌های پرسپکس، که برای انرژیهای کمتر از ۱۰ MeV مناسب هستند، اختلال ناشی از اختلاف جنس دیواره اتاقکها با محیط اندازه‌گیری به کمترین مقدار می‌رسد.

زاویه ورودی باریکه می‌شود. ابعاد دو اتاقک (PP2 و PP1) ساخته شده موضوع این گزارش در مقایسه با حدود ابعاد توصیه شده و همچنین ابعاد یک نمونه اتاقک صفحه موازی تجاری، PTW,W-34001، که در سنج‌بندی اتاقکها از آن استفاده شده به قرار زیر است (شکل ۲ را نیز ببینید).

PTW,W-34001	PP2	PP1	توصیه شده	ابعاد مورد نظر
۱	۱	۱	≤ 1	ضخامت پنجره ورودی، t_w (mm)
۱۵/۶	۱۴	۱۳/۵	≤ 20	قطر الکترو داخلی، ϕ_i (mm)
۲	۲	۱/۸	≤ 2	ارتفاع حفره هوا، a (mm)
۲	۲/۴	۲/۸	$\geq 1/5$	نسبت پهنای الکترو محافظ به ارتفاع حفره، $\frac{g}{a}$
۰/۳۵	۰/۳۰۸	۰/۲۵۸	۰/۰۵-۰/۱۵	حجم حساس (cm^3)

در تمام اندازه‌گیریها از یک الکترومتر نوع PTW-UNIDOS 10002 استفاده شده است. حساسیت این الکترومتر برای اندازه‌گیری بار الکتریکی، $0.01 pC$ (۱۰-۱۴ کولن) و جریان، $0.001 pA$ (۱۰-۱۵ آمپر) است. ولتاژ قطبش را می‌توان از صفر تا ۴۰۰V ولت، با گامهای ۵۰V ولت، تغییر داد. امکان تغییر قطبیدگی (پلاریته) نیز وجود دارد. از یک دستگاه Co-60 Picker V9 Therapy Unit، که در بخش دُزیمتری استاندارد موجود است بعنوان منبع پرتو استفاده شده است. در تمام آزمونها، بجز آزمون پاسخ اتاقک نسبت به زاویه ورودی تابش که در هوا انجام شده، اتاقکها در عمق ۴/۵cm در فانتوم پلاستیک (تقریباً معادل عمق ۵cm آب) قرار داشته‌اند. فانتوم پلاستیک از صفحات پرسپکس با ابعاد $30cm \times 30cm$ و ضخامت از ۱mm تا ۲۰mm ساخته شده است. ملاک پذیرش آزمونها مقایسه آنها با معیارهای معرفی شده در IEC731 بوده است [۱۸].

بهره جمع‌آوری بار الکتریکی به وسیله اتاقکها و اثر قطبیدگی که از شاخصهای کنترل کیفی اتاقکهای یونش، به ویژه در باریکه‌های تپی (پالسی) و تپی-رویشی (پالس-اسکن، شتابدهنده) به شمار می‌روند، در جریان سنج‌بندی اتاقکها بررسی شده‌اند و نتایج آن متعاقباً عرضه خواهد شد.



شکل ۲ - ابعاد اساسی اتاقکهای یونش صفحه موازی شامل ضخامت پنجره ورودی پرتو t_w ، ارتفاع حفره هوا a ، قطر الکترو داخلی ϕ_i و پهنای الکترو محافظ g .

۳- آزمونهای اولیه اتاقکهای صفحه موازی

قبل از سنج‌بندی اتاقک یونش و استفاده از آن لازم است اندازه‌گیریهای مقدماتی برای ارزیابی قابلیت آن، به عنوان یک اتاقک یونش، انجام شود. این اندازه‌گیریها حداقل شامل تعیین جریان ناشی، پایداری کوتاه مدت پاسخ اتاقک، بررسی تاثیر کابل اتصال اتاقک به الکترومتر، و بالاخره تغییرات پاسخ اتاقک نسبت به

۱-۳- اندازه‌گیری جریان ناشی

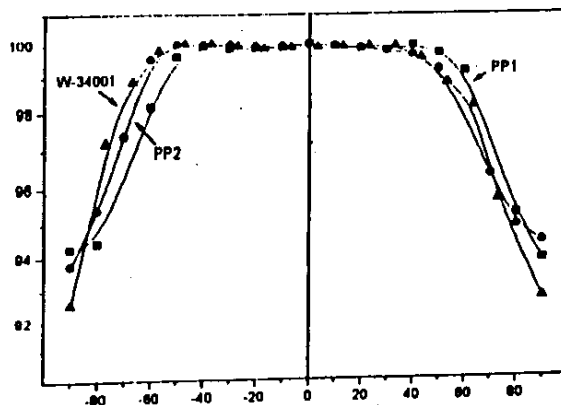
جریان ناشی اتاقکهای یونش، طی اندازه‌گیریهای متعددی که قبل از پرتودهی و بعد از آن به عمل آمده همواره ناچیز بوده است. جریان ناشی اتاقکها قبل از پرتودهی حدود $5 \times 10^{-10} A$ \pm و بعد از پرتودهی $5 \times 10^{-12} A$ \pm بوده است. همچنین جریان ناشی اتاقکها ۵ ثانیه بعد از قطع پرتودهی کمتر از ۰/۵٪ جریان اصلی (هنگام پرتودهی) بوده است.

۲-۳- پایداری کوتاه مدت پاسخ اتاقکها

در مدت تمام اندازه‌گیریها، انحراف معیار نسبی هر سری ده تایی اندازه‌گیری در هر نوبت، که ملاکی از پایداری کوتاه مدت پاسخ اتاقکها و الکترومتر است، در اکثر موارد کمتر از ۰/۵٪ بوده است.

۳-۳- بررسی اثر کابل

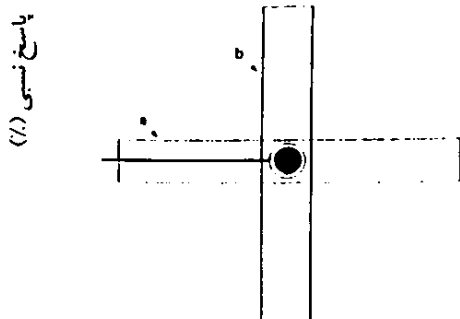
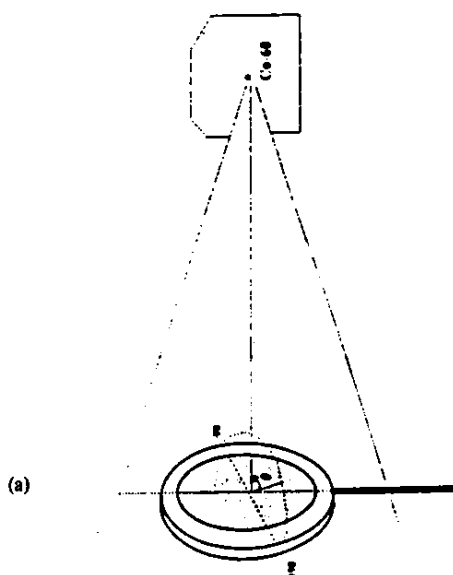
برای بررسی تاثیر کابل اتصال اتاقکها به الکترومتر در پاسخ آنها، اتاقکها را در داخل فانتوم در دو نوبت تحت تابش میدان مستطیل شکل $22/5 \text{ cm} \times 4/5 \text{ cm}$ در سطح فانتوم پرتوگامای Co-60 قرار داده‌ایم. ابتدا میدان تابش را طوری تنظیم کرده‌ایم که درازای آن به موازات کابل قرار گیرد (شکل ۳a)، سپس اندازه‌گیری را در حالتی که درازای میدان تابش عمود بر کابل باشد (شکل ۳b) تکرار کرده‌ایم. پهنای میدان تابش در محل اتاقک تنها اندکی (حدود ۱cm) از قطر کل اتاقکها بیشتر بوده است. اختلاف نسبی پاسخ اتاقکها در دو حالت کمتر از ۱٪ بوده است.



شکل ۳- نحوه استفاده از میدان در دو حالت مختلف تابش گاما برای بررسی اثر کابل در پاسخ اتاقکها

۴-۳- تغییرات پاسخ اتاقکها نسبت به زاویه ورودی تابش

برای بررسی تغییرات پاسخ اتاقکهای صفحه موازی نسبت به زاویه ورودی تابش، آنها را در میدان پرتوگاما در هوا قرار داده و اندازه‌گیریهایی در زوایای مختلف بین محور مرکزی میدان تابش و بردار عمود بر پنجره اتاقکها از 90° تا $+90^\circ$ ، طبق شکل ۴a، انجام داده‌ایم. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که پاسخ تمام اتاقکها، حداقل از زاویه 45° تا $+45^\circ$ ، در مقایسه با پاسخ اتاقکها در وضعیت عادی اندازه‌گیری (زاویه صفر) مطلوب بوده است (شکل ۴b).



شکل ۴- نحوه اندازه‌گیری (a) و نتایج پاسخ اتاقکها (b) در قبال تغییر زاویه ورودی پرتو.

۴- بهره جمع آوری بار الکتریکی

معمولاً تمام بار الکتریکی که پرتو یونساز در حفره هوای اتاقک یونش ایجاد می‌کند به وسیله الکترودها جمع آوری نمی‌شود، زیرا تعدادی از یونهای تولید شده دوباره با هم ترکیب می‌شوند. در تحلیل نهایی برای تعیین دقیق تر دُز جذبی در یک میدان پرتو، باید بهره جمع آوری بار به وسیله اتاقک یونش، یعنی نسبت بار جمع آوری شده، Q' ، به بار تولید شده، Q ، ($f=Q'/Q$) در حجم حساس اتاقک معلوم باشد. برای تعیین بهره جمع آوری بار به وسیله اتاقکهای یونش، هم برای تابش پیوسته و هم برای تابش های تپی (پالسی) و تپی-رویشی (پالس-اسکن)، راه حل های نظری ارائه شده است [۱۹]؛ ولی به علت تفاوت های موجود بین شرایط ایده آل روش های نظری و مشخصات پیچیده هندسی اتاقکهای یونش در عمل، توصیه شده است که بهره جمع آوری بار الکتریکی در هر شرایط اندازه گیری خاص، به طریق تجربی تعیین شود. به عبارت دیگر، مقدار بار خوانده شده توسط الکترومتر در شرایط خاص اندازه گیری، باید در قبال ترکیب دوباره یونها در همان شرایط تصحیح گردد. برای این کار ما از روش موسوم به روش دو ولتاژ استفاده کرده ایم، به این ترتیب که اندازه گیری ها را در میدان تابش گامای دستگاه Co-60 Picker V9 (بخش دُزیمتری استاندارد) و باریکه های تپی-رویشی (پالس-اسکن) الکترون شتاب دهنده پرتو درمانی CGR Saturn 20 (مرکز پزشکی سیدالشهدا اصفهان)، در دو ولتاژ قطبیده مختلف V_1 و V_2 انجام داده ایم. ما این نسبت را ۴ انتخاب کرده ایم ($V_1 = -200V$, $V_2 = 50V$). با در دست داشتن نسبت بارهای الکتریکی خوانده شده روی الکترومتر، یعنی Q_1/Q_2 ، و نوع پرتو (پیوسته، تپی یا تپی-رویشی) و مراجعه به دستورالعمل های دُزیمتری IAEA-TRS Nos. 277 & 381، فاکتور تصحیح مربوط به ترکیب دوباره یونها، P_s ، را استخراج کرده ایم و در اندازه گیری باریکه های الکترون از رابطه (۱) استفاده شده است:

$$P_s = \alpha_0 + \alpha_1 \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) + \alpha_2 \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^2 \quad (1)$$

ضرایب این معادله برای باریکه های تپی و تپی-رویشی با نسبت های مختلف V_1/V_2 تعیین گردیده اند. برای باریکه های تپی-رویشی و نسبت $V_1/V_2 = 4$ که مورد نظر ما است، $\alpha_0 = 1/468$

$\alpha_1 = -1/200$ و $\alpha_2 = 0/734$ است.

فاکتور P_s ، که در واقع عکس بهره جمع آوری بار الکتریکی است، برای اتاقکهای صفحه موازی موضوع این گزارش در باریکه های گاما و الکترون چنین برآورد شده است:

مقدار P_s			نوع باریکه	
PP1	PP2	W-34001	Co-60	
۱/۰۱	۱/۰۰۵	۱/۰۰۲		
-	-	۱/۰۱۵		الکترون ۱۷MeV
-	۱/۰۱۲	۱/۰۰۸		الکترون ۱۳MeV
-	۱/۰۱۲	۱/۰۰۹		الکترون ۹MeV
-	۱/۰۰۵	۱/۰۰۷	الکترون ۶MeV	

۵- سنجه بندی اتاقکهای یونش صفحه موازی

دُز جذبی باریکه های الکترون در یک فانتوم آب با استفاده از اتاقک یونش صفحه موازی، براساس دستورالعمل دُزیمتری IAEA-TRS No.381 چنین تعیین می‌شود:

چنانچه اتاقک برحسب دُز جذبی هوای حفره آن سنجه بندی شده باشد:

$$D_{w,Q}(z_{ref}) = M_Q^{PP} N_{D,air}^{PP} (S_{w,air})_Q P_Q \quad (2)$$

و در صورتی که اتاقک برحسب دُز جذبی آب سنجه بندی شده باشد:

$$D_{w,Q}(z_{ref}) = M_Q^{PP} N_{D,W,Co}^{PP} \frac{(S_{w,air})_Q}{(S_{w,air})_{Co}} \frac{P_Q}{P_{wall,Co}} \quad (3)$$

در این روابط، $D_{w,Q}(z_{ref})$ مقدار دُز جذبی باریکه الکترون با کیفیت Q در عمق مرجع z_{ref} در فانتوم آب است (منظور از کیفیت باریکه الکترون، انرژی متوسط باریکه در سطح فانتوم یعنی \bar{E}_0 است). M_Q^{PP} مقدار خوانده شده روی الکترومتر است که تصحیحات لازم، نظیر تصحیح دما و فشار محیط اندازه گیری نسبت به دما و فشار مرجع P_{TP} ، تصحیح مربوط به بهره جمع آوری بار، P_s ، و قطبیدگی، در مورد آن اعمال شده باشد. $N_{D,W,Co}^{PP}$ ، $N_{D,air}^{PP}$ به ترتیب فاکتورهای سنجه بندی اتاقک برحسب دُز جذبی هوای حفره اتاقک و دُز جذبی آب هستند. $(S_{w,air})_Q$ نسبت توان متوقف سازی آب به هوادر باریکه الکترون با کیفیت Q است و تابعی از انرژی متوسط باریکه در سطح فانتوم،

$$6- P_{TP} = \frac{T(^{\circ}C) + 273.2}{293.2} \times \frac{1013.25}{P(mb)}$$

اتاقکهای یونش استوانه‌ای PTW,W-30001 و NE 2571 هر دو دارای گواهینامه سنجه‌بندی از آزمایشگاه دزیمتری IAEA برحسب کرمای هوا (N_K) و دز جذبی آب ($N_{D,w}$) در انرژی پرتو گامای Co-60 هستند. چون ما برای سنجه‌بندی اتاقکهای صفحه موازی برحسب دز جذبی هوای اتاقک، به فاکتورهای $N_{D,air}$ اتاقکهای استوانه‌ای نیاز داریم، ابتدا باید این فاکتورها را تعیین کنیم. فاکتور $N_{D,air}$ اتاقک استوانه‌ای با فاکتور سنجه‌بندی برحسب کرمای هوا، N_K ، رابطه زیر را دارد:

$$N_{D,air} = N_K (1-g) k_{att} k_m k_{cel} \quad (4)$$

که در آن g کسری از انرژی باریکه است که به صورت پرتو ترمزی (بر مشترالونگ) از محیط اندازه‌گیری خارج می‌شود، k_{att} ضریب مربوط به تضعیف پرتو در دیواره اتاقک است و k_m و k_{cel} هم به ترتیب ضریبهای مربوط به هم‌ارز نبودن دیواره و الکتروود مرکزی اتاقک با هوا هستند. ضریبهای k_m و k_{att} برای اتاقکهای مختلف در دسترس هستند و ضریب k_{cel} فقط برای اتاقکهای استوانه‌ای نوع فارمر حساب شده است ($k_{cel} = 1/0.06 \pm 0.01$). فاکتورهای $N_{D,air}$ اتاقکهای PTW,W-30001 و NE 2571، با توجه به مقادیر فاکتورهای کرمای هوا از گواهینامه اتاقکها و همچنین در نظر گرفتن مقادیر k_{cel} ، k_m و k_{att} به قرار جدول زیر خواهند بود.

1-1-5 روش تعیین $N_{D,air}$ در باریکه پرتو Co-60

ابتدا پاسخ اتاقک صفحه موازی W-34001 را با پاسخ دو اتاقک یونش استوانه‌ای W-30001 و NE2571 در باریکه پرتو Co-60 دستگاه پرتودرمانی Co-60 Picker V9 موجود در بخش دزیمتری استاندارد، در فانتوم آب مقایسه کرده‌ایم. در شرایط اندازه‌گیری، فاصله چشمه تا سطح فانتوم: 100cm، ابعاد میدان تابش در سطح فانتوم 10cmx10cm و عمق آب $d_w = 5$ cm بوده است

\bar{E}_0 و عمق اندازه‌گیری، z_{ref} ، به شمار می‌رود. $(S_{w,air})_{Co}$ همان نسبت در مورد پرتوگامای Co-60 است که ثابت و برابر 1/133 است. P_Q فاکتور کلی تصحیح اختلال ناشی از حضور اتاقک در محیط اندازه‌گیری (فانتوم) است که حاصلضرب عاملهای مختلف، مانند اثر حجم (P_{cav}) و اثر دیواره اتاقک (P_{wall}) می‌باشد (در مورد اتاقکهای استوانه‌ای اثرهای مربوط به الکتروود مرکزی، P_{cel} ، و اختلاف وضعیت نقطه مؤثر اندازه‌گیری تا مرکز اتاقک، P_{dis} ، نیز اعمال می‌شود). $P_{wall,Co}$ فاکتور تصحیح اختلال اتاقک صفحه موازی در باریکه Co-60 است.

1-5 تعیین فاکتور $N_{D,air}$ اتاقکهای یونش صفحه موازی

برای تعیین $N_{D,air}$ اتاقکهای صفحه موازی، یا به عبارت دیگر، سنجه‌بندی آنها برحسب دز جذبی هوای حفره اتاقک، روشهای مختلفی شامل سنجه‌بندی در باریکه الکترون و سنجه‌بندی در باریکه پرتوگامای Co-60، هم در فانتوم و هم در هوا، پیشنهاد شده است.

در حال حاضر، توصیه عمده دستورالعمل دزیمتری IAEA-TRS No.381 و بیشتر دستورالعملهای دیگر دزیمتری برای تعیین $N_{D,air}$ یک اتاقک صفحه موازی، مقایسه پاسخ آن اتاقک در باریکه الکترون با پاسخ اتاقک مرجعی است که فاکتور $N_{D,air}$ آن معلوم باشد. اگر امکان انجام این توصیه میسر نباشد بناچار باید یکی از روشهای سنجه‌بندی در مقابل Co-60 را به بهای تقبل خطای بیشتر در مقدار $N_{D,air}$ انتخاب کرد.

برای تعیین $N_{D,air}$ اتاقکهای یونش صفحه موازی موضوع این گزارش، هر سه اتاقک PP1، W-34001 و PP2 در فانتومهای آب و پرسپکس در مقایسه با اتاقکهای استوانه‌ای PTW,W-30001 و NE 2571 در باریکه Co-60 سنجه‌بندی شده‌اند. سنجه‌بندی در باریکه الکترون، با توجه به محدودیت دسترسی به شتابدهنده پرتودرمانی الکترون، فقط در مورد اتاقکهای W-34001 و PP2 انجام گرفته است.

اتاقک یونش	N_k (mGy/nC)	$k_{att}k_m$	$N_{D,air}$ (mGy/nC)
PTW,W-30001	47.4 ± 0.6	0.972 ± 0.1	46.21 ± 0.12
Ne 2571	41.1 ± 0.5	0.985 ± 0.1	40.60 ± 0.11

شعاع اتاقک برحسب میلیمتر است. برای اتاقک W-30001، $P_{dis} = 0/9878$ و برای اتاقک NE2571، $P_{dis} = 0/9874$ برآورد می شود. برای تخمین ضریب اختلال P_{wall}^{PP} مربوط به اتاقکهای صفحه موازی رابطه‌ای تحلیلی نظیر رابطه (۶) که برای اتاقکهای استوانه‌ای بکار می‌رود، وجود ندارد و در این مورد این ضریب بطور تجربی تعیین می‌شود. مقدار P_{wall}^{PP} برای اتاقک W-34001 در باریکه گامای Co-60 و در فانتوم آب $1/003$ تخمین زده می‌شود.

با قرارداد دادن مقادیر کمیتها و ضرایب ذکر شده در رابطه (۵)، فاکتور $N_{D,air}^{PP}$ اتاقک صفحه موازی W-34001 چنین تعیین گردیده است:

در مقایسه با اتاقک استوانه‌ای W-34001

$$N_{D,air}^{PP} = 72/78 \text{ mGy/nC} \pm 2/52$$

در مقایسه با اتاقک استوانه‌ای NE2571

$$N_{D,air}^{PP} = 72/69 \text{ mGy/nC} \pm 2/47$$

با توجه به مقدار خطای ذکر شده در $N_{D,air}^{PP}$ (تا یک انحراف معیار)، اختلاف معنی داری بین فاکتورهای تعیین شده با دو اتاقک استوانه‌ای مرجع مشاهده نمی‌شود.

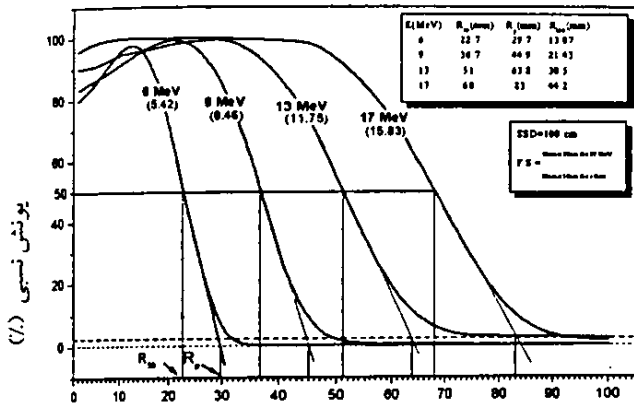
اتاقکهای PP1 و PP2 در وضعیت فعلی، ضد آب نبوده و برای استفاده در فانتوم آب مناسب نیستند. بنابراین فاکتورهای $N_{D,air}$ این اتاقکها را در باریکه گامای Co-60 با استفاده از فانتوم پرسپکس و مقایسه پاسخ آنها با پاسخ اتاقک W-34001، که فاکتور $N_{D,air}$ آنرا در مقایسه با اتاقکهای استوانه‌ای تعیین کردیم، بدست آورده‌ایم. شرایط اندازه گیری، یعنی فاصله و ابعاد میدان تابش در سطح فانتوم همانهاست که قبلاً ذکر شده‌اند؛ فقط عمق اندازه گیری در فانتوم پرسپکس $d_{pl} = 4/6 \text{ cm}$ بوده است که تقریباً معادل $5/2 \text{ cm}$ آب می‌باشد. ابعاد هندسی و جنس بدنه و همچنین ضخامت پنجره ورودی پرتو اتاقکهای pp1 و pp2 با اتاقک W-34001، PTW، تقریباً یکسان هستند. بنابراین با تقریب خوبی می‌توانیم بنویسیم:

(در مورد اتاقکهای استوانه‌ای، فاصله سطح آب تا مرکز اتاقکها ۵cm و در مورد اتاقک صفحه موازی W-34001 فاصله سطح آب تا جدار داخلی پنجره ورودی پرتو ۵cm بوده است).
بستگی فاکتور $N_{D,air}^{PP}$ اتاقک صفحه موازی با فاکتور اتاقک استوانه‌ای از رابطه (۵) معین می‌شود:

$$N_{D,air}^{PP} = N_{D,air}^{ref} \frac{M^{ref}}{M^{PP}} \frac{P_{wall}^{ref} P_{cel}^{ref} P_{dis}}{P_{wall}^{PP}} \quad (5)$$

M^{ref} و M^{PP} به ترتیب پاسخهای اتاقکهای استوانه‌ای و صفحه موازی هستند که با توجه به مقادیر خوانده شده روی الکترومتر و تصحیح این مقادیر در قبال تغییرات دما و فشار محیط اندازه گیری نسبت به دما و فشار مرجع (P_{TP})، بهره جمع آوری بار (P_s) و اثر قطبیدگی بدست می‌آیند. P_{wall}^{ref} ضریب اختلال ناشی از هم ارز نبودن جنس دیواره اتاقک استوانه‌ای با محیط اندازه گیری (آب) است که به کمک رابطه سه مؤلفه‌ای (۶) حساب می‌شود، که در آن α و τ به ترتیب کسری از یونهای تولید شده در اثر برخورد پرتو به دیواره اتاقک و پوشش ضد آب آن (sleeve) ایجاد می‌شوند و می‌توان آنها را به کمک روابط $\alpha(t_w) = 1 - e^{-11.88t_w}$ و $\tau(t_s) = e^{-11.88t_w}(1 - e^{-11.88t_s})$ ، $S_{sleeve,air}$ ، $S_{wall,air}$ برآورد کرد. $S_{med,air}$ نیز به ترتیب نسبتهای توان متوقف سازی دیواره اتاقک به هوا، پوشش ضد آب اتاقک به هوا و محیط اندازه گیری به هوا هستند. $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{med,wall}$ و $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{med,sleeve}$ هم به ترتیب نسبت ضرایب تضعیف جرمی محیط اندازه گیری به دیواره اتاقک و محیط اندازه گیری به پوشش ضد آب اتاقک هستند. مقدار P_{wall}^{ref} با استفاده از رابطه (۶) برای اتاقک W-30001، برابر $0/99943$ و برای اتاقک NE 2571، برابر $0/9924$ برآورد شده است. P_{cel} ضریب تصحیح مربوط به اثر الکترومتر مرکزی اتاقک استوانه‌ای در اندازه گیریهای درون فانتوم است که برای اتاقکهای نوع فارمر با الکترومتر آلومینیومی به قطر 1mm در حدود $0/994$ برآورد می‌شود. P_{dis} ضریب تصحیح مربوط به جابجایی نقطه مؤثر اندازه گیری از مرکز اتاقک است که با رابطه $P_{dis} = 1 - 0/0042$ تخمین زده می‌شود.

$$P_{wall}^{ref} = \frac{\alpha S_{wall,air} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{med,wall} + \tau S_{sleeve,air} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{med,sleeve} + (1 - \alpha - \tau) S_{med,air}}{S_{med,air}} \quad (6)$$



شکل ۵ - منحنی‌های توزیع یونش باریکه‌های الکترون

شتابدهنده پرتودرمانی CGR Saturn 20 که به وسیله اتاقک یونش صفحه موازی PTW, W-34001 در عمق فانتوم آب دست آمده آمده‌اند.

با استفاده از این رابطه و منحنی‌های توزیع یونش در عمق فانتوم آب (شکل ۵)، مشخصات باریکه‌های الکترون شتابدهنده پرتودرمانی به قرار زیر است:

E (MeV)	\bar{E}_0 (MeV)	R_{100} (cm)	R_{50} (cm)	R_p (cm)
17	15/83	4/42	6/8	8/3
13	11/75	3/05	5/1	6/38
9	8/46	2/14	3/67	4/49
6	5/42	1/31	2/27	2/97

انرژی متوسط یک باریکه الکترون مناسب برای سنج‌بندی در سطح فانتوم باید $25 \text{ MeV} \leq \bar{E} \leq 15 \text{ MeV}$ باشد. بنابراین برای سنج‌بندی اتاقک صفحه موازی W-34001، باریکه الکترون با انرژی اسمی 17 MeV را انتخاب کرده‌ایم. برای این کار نقاط مؤثر اندازه‌گیری اتاقک W-34001 و اتاقک استوانه‌ای W-30001 را در عمق مرجع یکسانی، $Z_{ref} = 4/5 \text{ cm} = R_{100}$ ، در فانتوم آب قرار داده‌ایم (شکل ۶). فاکتور $N_{D,air}$ اتاقک صفحه موازی چنین حساب می‌شود:

$$N_{D,air}^{PP} = N_{D,air}^{ref} \frac{M^{ref}}{M^{PP}} \frac{P_{wall}^{ref} P_{cav} P_{cel}^{ref}}{P_{wall}^{PP} P_{cav}^{PP}} \quad (9)$$

$$N_{D,air}^{PP} = N_{D,air}^{W-34001} \left(\frac{M^{W-34001}}{M^{PP1,2}} \right) \quad (7)$$

فاکتورهای $N_{D,air}$ که به این طریق برای اتاقکهای PP1 و PP2 تعیین شده‌اند، چنین هستند:

$$N_{D,air}^{PP1} = 10.7/60 \text{ mGy/nC} \pm 1.2/62 \quad \text{اتاقک PP1}$$

$$N_{D,air}^{PP2} = 8.0/66 \text{ mGy/nC} \pm 1.2/62 \quad \text{اتاقک PP2}$$

۵-۲-۱-۵ روش تعیین $N_{D,air}$ در باریکه الکترون

برای تعیین فاکتور $N_{D,air}$ اتاقکهای صفحه موازی در باریکه الکترون، طبق توصیه دستورالعمل IAEA-TRS No. 381 و بیشتر دستورالعملهای دیگر کنونی، ابتدا $N_{D,air}$ اتاقک صفحه موازی W-34001 را با مقایسه پاسخ آن با پاسخ اتاقک استوانه‌ای W-30001 در باریکه الکترون و با استفاده از فانتوم آب بدست آورده‌ایم. سپس فاکتور $N_{D,air}$ اتاقک PP2 را با مقایسه پاسخ آن با پاسخ اتاقک در فانتوم پرسپکس تعیین کرده‌ایم. برای تمام اندازه‌گیریها از شتابدهنده پرتودرمانی الکترون CGR Saturn 20 متعلق به مرکز پزشکی سیدالشهدای اصفهان استفاده شده است. این شتابدهنده در تاریخ اندازه‌گیری (آذر ۱۳۷۷)، قادر بوده که باریکه‌های الکترون با انرژیهای اسمی ۶، ۹، ۱۳ و ۱۷ مگا الکترون-ولت را تامین نماید.

سنج‌بندی اتاقکهای صفحه موازی در باریکه الکترون، ایجاب می‌کند که کیفیت باریکه تعیین شود. منظور از کیفیت باریکه الکترون، انرژی متوسط آن در سطح فانتوم، \bar{E}_0 ، است که با بُرد الکترون ارتباط دارد. کمیت \bar{E}_0 نقش عمده را در تعیین کمیتهای پارامترهای مورد استفاده در رابطه تعیین دُز جذبی، به ویژه در انتخاب نسبت توان متوقف‌سازی آب به هوا، $S_{w,air}$ ، دارد.

برای تعیین کیفیت باریکه‌های الکترون، توزیع یونش ایجاد شده در عمق فانتوم آب را به وسیله اتاقک صفحه موازی W-34001، که برای این کار بسیار مناسب است، بدست آورده‌ایم (شکل ۵). در تمام اندازه‌گیریها $SSD = 100 \text{ cm}$ بوده است. برای تامین یک باریکه پهن و مناسب، به طوری که بتوانیم توزیع یونش را تقریباً مستقل از ابعاد میدان تابش در نظر بگیریم، ابعاد میدان تا انرژی 13 MeV برابر $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ و برای انرژی 17 MeV مساوی $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ انتخاب شده است.

انرژی متوسط باریکه در سطح فانتوم با عمق 50٪ یونش، R_{50} ، را می‌توان از رابطه تجربی زیر حساب کرد:

$$\bar{E}_0 (\text{MeV}) = 0.1818 + 1.9335 R_{50} + 0.140 (R_{50})^2 \quad (8)$$

محیط اندازه گیری نسبت به دما و فشار مرجع (PTP)، ضریب تصحیح ترکیب دوباره یونها (P_s) و اثر قطبیدگی بدست می آیند. برای تعیین P_s ، چنانکه قبلاً گفته شد، از روش دو ولتاژ استفاده شده است.

با قراردادن مقادیر کمیتهها و ضرایب ذکر شده در رابطه ۹، فاکتور $N_{D,air}$ اتاقک صفحه موازی در باریکه الکترون چنین تعیین گردیده است:

$$N_{D,air}^{W-34001} = 70/48 \text{ mGy/nC} \pm 1/85$$

اختلاف نسبی فاکتور اخیر با فاکتور بدست آمده در میدان گامای Co-60 در حدود ۲/۵٪ است.

فاکتور $N_{D,air}$ اتاقک PP2، با مقایسه پاسخ آن با پاسخ اتاقک W-34001 در باریکه های الکترون ۹ MeV و ۱۳ MeV در فانتوم پرسپکس، و باریکه الکترون ۶ MeV در فانتوم آب چنین بدست آمده است:

$$E = 13 \text{ MeV} : N_{D,air}^{PP2} = 80/10 \text{ mGy/nC} \pm 2/1$$

$$E = 9 \text{ MeV} : N_{D,air}^{PP2} = 78/30 \text{ mGy/nC} \pm 2/1$$

$$E = 6 \text{ MeV} : N_{D,air}^{PP2} = 74/04 \text{ mGy/nC} \pm 2/1$$

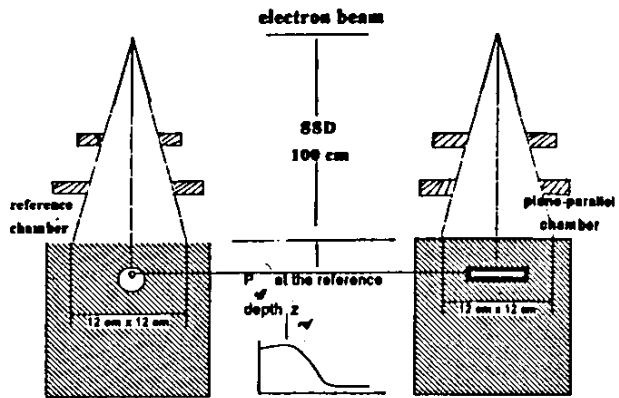
اختلاف نسبی این مقادیر بایکدیگر و همچنین با فاکتور بدست آمده در میدان گامای Co-60 در حد انحراف معیار فاکتورها است.

۲-۵- تعیین $N_{D,w,Co}$ اتاقکهای صفحه موازی

برای سنجه بندی اتاقکهای صفحه موازی برحسب دز جذبی آب، ابتدا فاکتور $N_{D,w,Co}$ اتاقک صفحه موازی W-34001 را با مقایسه پاسخ آن با پاسخ اتاقکهای استوانه ای W-30001 و NE2571، در میدان پرتوگامای Co-60 و در فانتوم آب تعیین کرده ایم. برای این کار از همان داده هایی که برای تعیین $N_{D,air}$ در ۱-۱-۵ بدست آمده است استفاده کرده ایم:

$$N_{D,w,Co}^{PP} = N_{D,w,Co}^{ref} \frac{M^{ref}}{M^{PP}} \quad (12)$$

با در نظر گرفتن فاکتورهای سنجه بندی اتاقکهای استوانه ای،



شکل ۶ - نحوه تنظیم اتاقکهای یونس استوانه ای (مرجع) و صفحه موازی در باریکه الکترون و در فانتوم آب برای سنجه بندی اتاقک صفحه موازی.

در روش سنجه بندی با باریکه الکترون، فاکتورهای P_{wall}^{ref} ، P_{cav}^{PP} و P_{wall}^{PP} برابر ۱ در نظر گرفته می شوند. در باریکه الکترون، برای اتاقک استوانه ای با الکترو آلومینیومی به قطر ۱ میلی متر، $P_{cav} = 0/998$ است. P_{cav} ، که فاکتور تصحیح اختلال ناشی از حفره موای اتاقک در شاریدگی الکترون در فانتوم است، برای اتاقکهای استوانه ای چنین حساب می شود:

$$P_{cav}^{ref}(\bar{E}_0, r) = 1 - 0.0215r e^{-0.1224\bar{E}_z} \quad (10)$$

r شعاع اتاقک برحسب میلی متر و \bar{E}_z انرژی متوسط باریکه الکترون در عمق z است که با رابطه تقریبی زیر تخمین زده می شود:

$$\bar{E}_z \approx \bar{E}_0 (1 - z/R_p) \quad (11)$$

R_p بُرد عملی باریکه است. با در نظر گرفتن شعاع اتاقک $R_p = 8/3 \text{ cm}$ ، عمق مرجع $z_{ref} = 4/5 \text{ cm}$ ، بُرد عملی $r = 3/05 \text{ mm}$ و $\bar{E}_0 = 15/8 \text{ MeV}$ از روابط (۱۰) و (۱۱) نتیجه می گیریم که $P_{cav}^{ref} = 0/97$ است. M^{ref} و M^{PP} با توجه به مقادیر خوانده شده به وسیله الکترومتر و در نظر گرفتن فاکتورهای تصحیح دما و فشار

خطاهای مشترکی که در هر یک از روشهای تعیین دز جذبی وجود دارند چنین برآورد می‌شوند:

تخمین خطا (%)

- ۱ تنظیم وضعیت هندسی اندازه‌گیری ۱
- مقدار خوانده شده روی الکترومتر
- ۱ بعد از تصحیحات لازم، M^{PP} ۱
- پایداری درازمدت پاسخ اتاقکها:
- ۱ در مورد اتاقک W-34001 ۱
- ۲ در مورد اتاقکهای PP1 و PP2 ۲
- در صورتی که از فاکتور $N_{D,air}$ و رابطه (۲) برای تعیین دز جذبی استفاده شود، خطاهای زیر را باید اعمال کنیم:

تخمین خطا (%)

- مقدار نظری ۰/۷
- نسبت توان متوقف‌سازی آب به هوا $S_{w,air}$ مقدار انتخاب شده، ۱
- فاکتور کلی تصحیح اختلال حضور اتاقک در فانتوم، P_Q ۱
- اگر از فاکتور $N_{D,w,Co}$ و رابطه (۳) برای تعیین دز جذبی استفاده شود، خطاهای زیر را باید در نظر گرفت:

تخمین خطا (%)

- نسبت $\frac{(S_{w,air})_Q}{(S_{w,air})_{Co}}$ ۱/۳
- نسبت $\frac{P_Q}{P_{wall,Co}}$ ۲/۴
- با درج موارد این خطاها در روابط محاسبه دز جذبی می‌توانیم خطای کلی را در تعیین دز جذبی باریکه‌های الکترون با استفاده از هر یک از اتاقکهای صفحه موازی تخمین بزنیم. نتایج نهایی بررسی خطاها در جدول زیر خلاصه شده است:

$$N_{D,w,Co}^{W-30001} = 51/87 \text{ mGy/nC} \pm 1\%$$

$$N_{D,w,Co}^{NE 2571} = 45/1 \pm \text{mGy/nC} \pm 1/10\%$$

که در آزمایشگاه دزیمتری IAEA تعیین گردیده است، چنین نتیجه می‌گیریم:

در مقایسه با اتاقک W-30001

$$N_{D,w,Co}^{W-34001} = 82/78 \text{ mGy/nC} \pm 1/3\%$$

در مقایسه با اتاقک NE2571

$$یا = 83/17 \text{ mGy/nC} \pm 1/3\%$$

چنانکه ملاحظه می‌شود اختلاف نسبی فاکتورهای بدست آمده در محدوده انحراف از معیار آنها است.

فاکتورهای سنج‌بندی اتاقکهای صفحه موازی PP1 و PP2 برحسب دز جذبی آب با مقایسه پاسخ آنها با پاسخ اتاقک W-34001 در فانتوم پرسپکس چنین تعیین گردیده‌اند:

$$N_{D,w,Co}^{PP1} = 123/15 \text{ mGy/nC} \pm 1/64\%$$

$$N_{D,w,Co}^{PP2} = 91/59 \text{ mGy/nC} \pm 1/64\%$$

۶- بررسی خطاها در تعیین دز جذبی باریکه‌های الکترون

برای تخمین خطای کلی در تعیین دز جذبی باریکه‌های الکترون براساس دستورالعمل دزیمتری IAEA-TRS No.381، لازم است علاوه بر خطای فاکتورهای سنج‌بندی $N_{D,air}$ یا $N_{D,w,Co}$ ، خطاهای موجود در تنظیم وضعیت هندسی اندازه‌گیری، مانند عمق فانتوم، فاصله SSD، میدان تابش و همچنین خطای کمیتهای دیگر را نیز در روابط محاسبه دز جذبی (۲) یا (۳) در نظر بگیریم.

برحسب $N_{D,w,Co}$			برحسب $N_{D,air}$				نحوه سنج‌بندی اتاقک صفحه موازی
PP2	PP1	W-34001	در باریکه الکترون		در باریکه Co-60		
			PP2	W-34001	PP2	PP1	W-34001
۴/۰۲	۴/۰۲	۳/۴۸	۳/۵۹	۳/۰۰	۳/۹۲	۳/۹۲	۳/۴۴
							خطای کلی در تعیین دز جذبی در باریکه‌های الکترون (%)

نتایج امید بخشی را به همراه داشت. امیدواریم که مهارت‌های کسب شده در این زمینه بتواند در توسعه کیفی فعالیتهای بخش دُزیمتری استاندارد، که انتقال استانداردهای اندازه گیری پرتوهای یونساز از مراکز بین‌المللی اندازه گیری به مراکز پرتودرمانی کشور را به عنوان یکی از وظایف تعریف شده خود به عهده دارد، مثمرتر واقع شود. در پایان از همه کسانی که به هر نحو، چه از لحاظ فراهم آوردن امکانات و تسهیلات و چه از لحاظ صرف وقت و ارائه پیشنهادات و نظرات، در انجام این کار پژوهشی - کاربردی ما را یاری داده‌اند، بویژه جناب آقای دکتر آفریده ریاست وقت مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای، همکاران بخش دُزیمتری استاندارد و کارگاه تراشکاری این مرکز، همچنین کارکنان بخش پرتودرمانی مرکز پزشکی سیدالشهدای اصفهان، بویژه خانم دکتر شکرانی و آقایان گلستانی و منادی تشکر و قدردانی نموده توفیق آنان را از قادر متعال خواستاریم.

ملاحظه می‌شود که خطای کلی در تعیین دُز جذبی در باریکه‌های الکترون، در حالتی که سنج‌بندی اتانک صفحه‌موازی در باریکه الکترون صورت گرفته باشد، کمتر از موارد دیگر است.

۷- نتیجه گیری

در سالهای اخیر، بهبود روشهای دُزیمتری در پرتودرمانی نوین لزوم استفاده از اتاقکهای یونش صفحه موازی را برای تعیین دُز جذبی باریکه‌های الکترون، بویژه در انرژیهای کمتر از ۱۰ MeV ایجاب کرده است. بر این اساس و با توجه به احتمال گسترش استفاده از شتابدهنده‌های الکترون در مراکز پرتودرمانی کشور اقدام به طراحی، ساخت و سنج‌بندی اتاقکهای یونش صفحه موازی در بخش دُزیمتری استاندارد بر طبق استانداردهای معرفی شده به توسط IEC و دستورالعمل بین‌المللی دُزیمتری IAEA-TRS No.381 گردید و بر طبق شرحی که در این مقاله داده شده است

References

1. ICRU Report No. 24, "Determination of Absorbed Dose in a patient Irradiated by Means of X or Gamma Ray in Radiotherapy Procedures" , (1976).
2. A. Brahme, "Accuracy Requirements and Quality Assurance of External Beam Therapy with Photons and Electrons", Acta. Oncol. Suppl. 1(1988).
3. Hospital Physicist's Association(HPA), Physics. Med. Biol. 14, 1 (1969).
4. ICRU Report No. 21, "Radiation Dosimetry: Electron with Initial Energies between 1 and 50 MeV (ICRU, Washington, D.C., 1972).
5. Nordic Association of clinical Physics (NACP), Acta. Radiol. Ther. Phys. Biol. (1971).
6. Subcommittee on Radiation Dosimetry, AAPM, Phys. Med. Biol. 16, 379(1971).
7. Subcommittee on Radiation Dosimetry , AAPM, Phys. Med. Biol., 11,505 (1966).
8. NACP, "Procedures in external radiotherapy dosimetry with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV" , Acta. Radiol. Oncol. 19, 55 (1980).
9. NACP, "Electron Beams with Energies at the Phantom Surface below 15 MeV", Acta. Radiol.Oncol. 20, Fasc.6(1981).
10. AAPM, Task Group 21, "A protocol for the determination of absorbed dose from high - energy photon and electron beams", Med. Phys. 10, 741 (1983).
11. HPA, "Revised code of practice for dosimetry of Practice 2 to 35 MeV x-ray and of Cs-137 and Co-60 gamma-ray beams", Phys. Med. Biol. 28, 1097-1104(1983).
12. HPA, "Code of practice for electron beams dosimetry in radiotherapy", Phys. Med. Biol. 30, 1169-1194 (1985).
13. IAEA-TRS. No. 277, "Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams:An International

Code of Practice", IAEA, Vienna(1987).

14. IAEA - TRS. No.381, "The Use of Plane - Parallel Ionization Chambers in High -Energy Electron and photon Beams: An International Code of Practice for Dosimetry", IAEA, Vienna (1996).

۱۵. عبدالرضا سلیمانیان و همکاران، ارزیابی بین‌المللی استاندارد اندازه‌گیری پرتوهای ایکس و گاما در بخش دُزیمتری استاندارد (SSDL)، نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۱۶، ۲۶-۱۵، ۱۳۷۷.

۱۶. عبدالرضا سلیمانیان، گزارش تحلیلی فعالیتهای بخش دُزیمتری استاندارد در زمینه کنترل کیفی در پرتودرمانی، نشریه انرژی هسته‌ای، شماره ۲۰، تابستان ۱۳۷۶.

17. A. Solimanian, M. Ghafoori, "Results of a National Quality Audit Programme for Radiotherapy Centers in Iran", IAEA SSDL Newsletter, No. 38, 20-28 (1998).

18. International Electrotechnical Commission (IEC), "Medical electrical equipment. Dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy", Geneva, IEC 731 (1987).

19. Attix, F.H., Radiation dosimetry, pp. 334-339(1986).

Design, Construction and characteristics of Plane - Parallel Ionization Chambers for Dosimetry of Electron Beams Used in Radiotherapy

*Solimanian, A., Ensaf, M.R., Ghafoori, M.
Secondary Standard Dosimetry Laboratory (SSDL)
Atomic Energy Organization of Iran (IAEA)
P.O.Box 31585 - 4395 Karag / IRAN*

Abstract

The practical and standard procedure for dosimetry of photon and electron beams used in radiotherapy involves the use of ionization chambers. Accordingly, there are a number of codes of practice, protocols and reports by national and international organizations, including IAEA, which provide physicists with a systematic approach to dosimetry of photon and electron beams using proper ionization chambers. Most of these dosimetry recommendations have explicitly recognized the advantages of using plane- parallel (or parallel - plate) ionization chambers (PPIC) for the dosimetry of therapeutic beams, especially for electron beams with energies less than 10 MeV. Regarding the possibility of employing medical electron accelerators in many radiotherapy centers in Iran, attempts have been made at the Secondary Standard dosimetry Laboratory (SSDL) of Iran to construct and make use of PPICs according to the last IAEA dosimetry code of practice. This paper presents the details of the construction and calibration of PPICs at the SSDL, as well as the uncertainties in the absorbed dose determination of electron beams by these chambers.