J. of Nuclear Sci. and Tech.
No. 29, pp. 7-16, 2003

مجله علوم و فنون هسته‌ای
شماره ۲۹، صفحات ۱۶-۷، ۱۳۸۲

Archive of SID

تولید پرتوهای ایکس ترمزی مرجع در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد

عبدالرضا سلیمانیان*، ارژنگ شاهور، مصطفی غفوری، آنیتا عالیپور

مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۴۳۹۵ - ۳۱۵۸۵، کرج - ایران

چکیده: تولید باریکه‌های مرجع پرتوهای یونساز با انرژی و دُز مشخّص، در آزمایشگاههای دزیمتری استاندارد از اهمیّت کاربردی زیادی برخوردار است. استانداردهای معیّنی در زمینهٔ معرّفی و نحوهٔ تولید این پرتوها، توسّط سازمانهای بین‌المللی ذیربط، از جمله ISO و IAEA تدوین و منتشر شده‌اند. در این مقاله چگونگی تولید و تعیین مشخّصات بخشی از باریکه‌های پرتو ایکس مرجع در سطح پرتودرمانی و حفاظت در برابر پرتوها را با استفاده از یک دستگاه مولّد ایکس نوع Philips RT250 و براساس استانداردهای بین‌المللی موجود شرح داده و سعی کرده‌ایم تا پرتوهای ایکس حاصل در حدّ امکان نزدیک به پرتوهای ایکس مرجع و استاندارد باشند.

واژه‌های کلیدی: *سنجه‌بندی، باریکه ایکس مرجع، کیفیت باریکه، صافی ذاتی، صافی جاذب، ضریب همگنی*

Production of Reference Bremsstrahlung X-Radiations for Calibration of Dosimeters at Radiotherapy and Radiation Protection Levels

A. Solimanian*, A. Shahvar, M. Ghafoori, A. Alipoor

Nuclear Research Center for Agriculture and Medicine, AEOI, P.O.Box: 31585-4395, Karaj-Iran

Abstract: Reference x-radiations are of practical importance at the standard dosimetry laboratories. The specifications and the operational conditions required to produce reference x-radiations are described in the relevant standards, provided by the International Standards Organization (ISO) and the International Atomic Energy Agency (IAEA). In the present work, an x-ray generator, Philips RT250, has been used to produce medium energy reference filtered x-radiations. Attempts have been made to make the characteristics of the produced x-rays as close as possible to those of the standard beams.

Keywords: *calibration, Reference X-radiation, HVL, inherent filteration, absorber, homogeneity coefficient*

*email: abdolreza_solimanian@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۱/۸/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۲/۷/۲۱

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

میدانهای مرجع پرتوهای یونساز، مبنای سنجه‌بندی و تعیین پاسخ دزیمترها بر حسب نوع و انرژی پرتو به شمار می‌روند. مشخّصات و نحوهٔ ایجاد میدانهای مرجع مناسب برای سنجه‌بندی انواع دزیمترهای مورد استفاده در پرتودرمانی و حفاظت در برابر پرتوها، توسّط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) و سازمان استاندارد جهانی (ISO) تعیین شده‌اند [۳ - ۱]. تولید میدانهای مرجع پرتوهای یونساز مستلزم دسترسی به منابع مولّد آنها، مانند دستگاههای مولّد پرتو ایکس و چشمه‌های پرتوزا است. در واقع میدانهای فوتونی مرجع مورد نیاز برای سنجه‌بندی دزیمترهای فوتون بر حسب کِرمای[۱] هوا یا واحدهای معادل دُز و تعیین پاسخ آنها بر حسب انرژی فوتون را می‌توان برحسب منشأ تولید آنها در سه دستهٔ کلّی طبقه‌بندی کرد: دستهٔ اوّل پرتوهای ایکس با طیف پیوسته تابش ترمزی[۲] هستند که به وسیلهٔ دستگاههای مولّد پرتوهای ایکس با ولتاژ بین ۱۰ kV تا ۳۰۰ kV تولید می‌شوند و با گذراندن آنها از صافی مناسب، که موضوع این کار تحقیقی است، می‌توان به باریکه‌های ایکس مرجع و استاندارد دست یافت. دستهٔ دوّم، عبارتند از پرتوهای ایکس مشخّص (فلورسنت) یا باریکه‌های فوتون تک انرژی که با تاباندن پرتوهای ایکس ترمزی حاصل از یک لامپ مولّد پرتو ایکس به چند صفحهٔ فلّزی خاص (تابش کننده‌ها)[۳] تولید می‌شوند و در برخی از آزمایشگاههای دزیمتری به عنوان پرتوهای ایکس مرجع با انرژی کمتر از ۱۰۰ keV بکار می‌روند. دستهٔ سوّم، فوتون‌هایی هستند که یا از چشمه‌های پرتوزای مشخّصی مانند (^{241}Am, ^{137}Cs, ^{60}Co) ساطع می‌گردند، یا به وسیلهٔ واکنش‌های هسته‌ای تولید می‌شوند. روش تولید فوتون‌های مرجع در گسترهٔ انرژی بین ٤ MeV و ۹ MeV به وسیلهٔ تعدادی واکنش‌های هسته‌ای خاص توسّط ISO عرضه شده است. انتخاب چنین گسترهٔ انرژی بدین سبب است که اوّلاً میدانهای فوتونی با انرژی حدود ٦ MeV در بسیاری از تأسیسات هسته‌ای (به ویژه در رآکتورها) و منابع دیگر تولید انرژی بالا ایجاد می‌شوند. ثانیاً هیچگونه ناپیوستگی در تغییرات پاسخ بیشتر دزیمترها در این گسترهٔ انرژی و بالاتر از آن دیده نمی‌شود. با وجود این، تولید فوتون‌های مرجع به وسیلهٔ واکنشهای هسته‌ای مستلزم داشتن امکانات و تجهیزات پیچیده‌ای است که بسیاری از آزمایشگاههای دزیمتری فاقد آن هستند.

موضوع این کار پژوهشی، بهینه‌سازی خروجی یک دستگاه مولّد پرتو ایکس برای تولید پرتوهای ایکس مرجع است به طوری که کیفیتهای مناسب سنجه‌بندی دزیمترهای مختلف در سطوح پرتودرمانی و حفاظت در برابر پرتوها را دارا باشند. دستگاه مولّد پرتو ایکس موجود در بخش دزیمتری استاندارد (SSDL)، دستگاهی از نوع Philips RT250 است که پرتوهای ایکس متوسّط را در پنج ولتاژ ثابت ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوولت تولید می‌کند. این دستگاه، گرچه مشخّصات یک دستگاه مولّد پرتو ایکس مرجع مطلوب، یعنی امکان تغییر پیوستهٔ ولتاژ با دقّت ۱٪±، قابلّیت تثبیت ولتاژ دلخواه با دقّت ۰/۳٪± و یا تغییر پیوستهٔ جریان لامپ در یک گسترهٔ دلخواه را ندارد، ولی با استفاده از امکانات موجود سعی شده است کیفیت پرتوهای ایکس تولید شده در حدّ امکان نزدیک به کیفیت پرتوهای ایکس مرجع و استاندارد باشد.

۲- روش کار

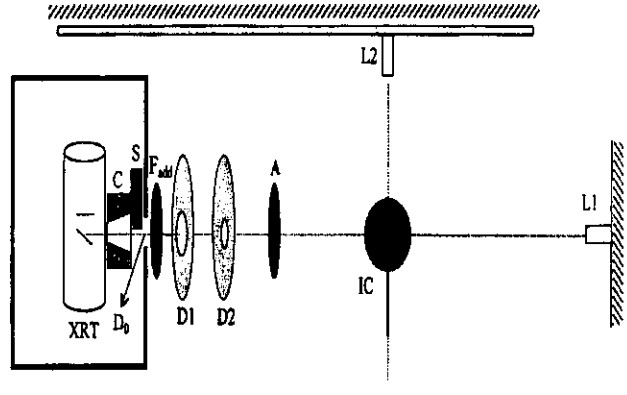
برای تولید باریکه‌های ایکس مرجع، انتخاب ولتاژ، انتخاب صافی اضافی مناسب، تعیین کیفیت باریکه و اندازه‌گیری خروجی (نرخ کِرمای هوا) در نقطهٔ سنجه‌بندی مورد نظر بوده است. انتخاب ولتاژ و صافی اضافی اصولاً باید بر اساس استانداردهای موجود باشد، ولی، به طوری که در مقدمه بیان شد، دستگاه مولّد ایکس Philips RT250 تنها در پنج ولتاژ ثابت کار می‌کند و استفاده از آنها اجتناب ناپذیر بوده است. صافی اضافی، ضخامتی متشکّل از یک یا چند فلز معیّن است که در مسیر پرتو قرار داده می‌شود و با توجّه به ولتاژ اعمال شده، باریکهٔ ایکس با کیفیت مشخّص را تولید می‌کند. کیفیت باریکهٔ ایکس را با کمیتی به نام "لایهٔ نیم‌مقدار" (HVL)[۱] می‌سنجند. منظور از لایهٔ نیم‌مقدار ضخامتی از یک فلز است که شدّت باریکهٔ پرتو ایکس (تعداد فوتون‌ها) را پس از عبور از آن به نصف کاهش دهد و آنرا HVL اوّل می‌نامند. ضخامتی از همان فلز که بتواند به ضخامت فلز اوّل اضافه شود و شدّت همان باریکه را به ۱/٤ کاهش دهد HVL دوّم می‌نامند. نسبت HVL اوّل به دوّم را ضریب همگنی باریکهٔ پرتو

www.SID.ir

Archive of SID

ایکس «h» می‌نامند. با توجّه به اینکه پرتوهای ایکسی که طیف پیوستهٔ ترمزی دارند با عبور از صافی همواره سخت‌تر می‌شوند، بنابراین، اندازه‌گیری HVL دوّم و برآورد h (ضریب همگنی)، که ملاکی از پهنای طیف باریکهٔ پرتو ایکس تولید شده است، در مورد پرتوهای ایکس در سطح پرتودرمانی مطلوب است ولی در سطح حفاظت در برابر پرتوها، به منظور مقایسه با همگنی پرتوهای مرجع، ضرورت دارد.

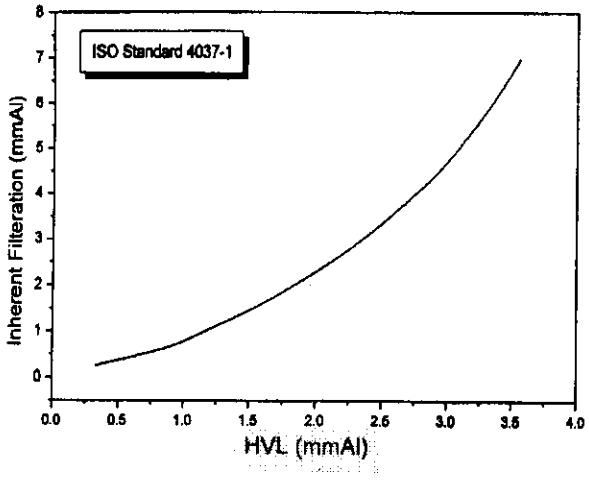
برای تعیین کیفیت باریکه‌های ایکس، شدّت عبور پرتو از صافی‌های آلومینیومی و مسی (صافی‌های جاذب A در شکل ۱) با ضخامتهای مختلف به وسیلهٔ اتاقکهای یونش اندازه‌گیری شده است. برای رسیدن به کیفیتهای مرجع و استاندارد ایجاب می‌کرد که با هر ولتاژ، ترکیب و ضخامت صافی‌های اضافی را به دفعات تغییر داده و اندازه‌گیری کیفیت انجام شود. لامپ دستگاه مولّد پرتو ایکسPhilips RT250، که در هنگام کاربرد بالینی روی یک پایه سوار و به لحاظ سهولت حرکت قابل انعطاف است، در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد (SSDL)، با یک کولیماتور (C) و یک شاتر(S) درون محفظهٔ سربی به ابعاد ۷۱cm×٤۷cm×٤٥cm تثبیت شده و باریکه‌های مخروطی پرتوهای ایکس را در طول اتاقی به ابعاد ٤m ×۷ m ×۱٤m ایجاد می‌نماید. فاصلهٔ محور مرکزی باریکه تا کف اتاق ۱۲۳ cm و قطر میدان پرتو، به وسیلهٔ دیافراگم‌های D1 و D2 قابل تغییر است. محور مرکزی باریکهٔ پرتو، همچنین فاصلهٔ هر نقطه روی محور مرکزی باریکه تا کانون پرتو ایکس به ترتیب به وسیلهٔ باریکه‌های لیزرL1 (ثابت) و L2 (متحرک) تعیین می‌شوند (شکل۱). جای صافی اضافی (F_{add}) بلافاصله پس از دیافراگم ثابت خروجی پرتو از محفظهٔ سربی (دیافراگم اوّلیه به قطر $D_0 = ۸$ cm) بوده و صافی‌های جاذب (A) نیز، که هنگام تعیین کیفیت به کار می‌روند، یا پس از دیافراگم‌های متغیرD1 و D2 (در فواصل اندازه‌گیری نزدیک، ۱۰۰- ۷۵ cm) و یا بین آنها (در فواصل دورتر) قرار می‌گیرند.



شکل ۱- ترکیب‌بندی استفاده شده به منظور به دست آوردن و اندازه‌گیری پرتوهای ایکس مرجع مورد نظر شامل C:کلیماتور S:شاتر F_{add}:صافی اضافی D_0:دیافراگم اوّلیه D1 و D2:دیافراگم‌های متغیّر A:صافی جاذب IC:اتاقک یونش L1:لیزر ثابت معرّف مرکز میدان پرتو L2:لیزر متحرّک تعیین فاصله XRT:لامپ مولّد پرتوهای ایکس

۳-اندازه‌گیری ضخامت صافی ذاتی لامپ مولّد پرتو ایکس

پرتوهای ایکس قبل از به کار بردن هرگونه صافی اضافی، به وسیلهٔ مواد متشکّلهٔ لامپ مولّد پرتو، از جمله شیشه و روغن خنک‌کننده، تا حدودی تصفیه می‌شوند. اندازه‌گیری ضخامت این صافی، که "صافی ذاتی" نامیده می‌شود، برای اطمینان از وضعیت رضایتبخش کارکرد لامپ مولّد پرتو ایکس به منظور استفاده از آن در دزیمتری و سنجه‌بندی ضرورت دارد. بر اساس استاندارد ISO-4073-1، ضخامت "صافی ذاتی" لامپ دستگاه مولّد پرتو ایکس مورد استفاده نباید از معادل ۳/٥ mmAl تجاوز کند. برای تعیین "صافی ذاتی"، توصیه شده است که کیفیت پرتو ایکس را در ولتاژ ٦۰ kV (بدون بکار بردن صافی اضافی دیگر) اندازه‌گیری کرده سپس با مراجعه به داده‌های ارائه شده در استاندارد مذکور، که ضخامت "صافی ذاتی" را برحسب تابعی از کیفیت پرتو به دست می‌دهد (شکل ۲)، ضخامت صافی ذاتی را بر حسب ضخامت آلومینیوم معادل آن برآورد کنیم. با آنکه ضخامت صافی ذاتی بر حسب تابعی از انرژی و بسته به عناصر



شکل ۲- تغییرات ضخامت صافی ذاتی نسبت به تغییرات HVL باریکهٔ خروجی در ولتاژ ٦۰ kV

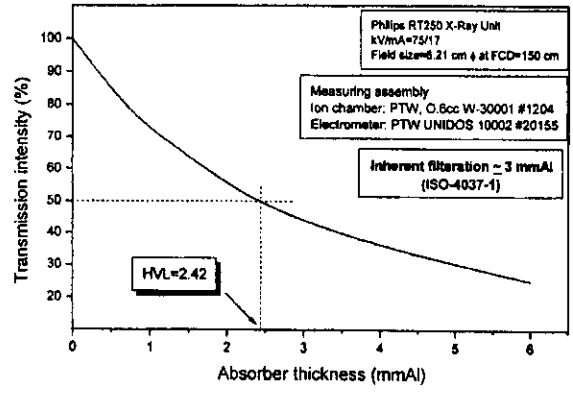
www.SID.ir

Archive of SID

تشکیل دهندهٔ آن متغیّر است، ولی در ولتاژهای بالا هم با توجّه به تغییرات اندک آن در مقایسه با صافی‌های اضافی، همان مقدار تعیین شده در ۶۰ kV به کار می‌رود. چون پایین‌ترین ولتاژ کار مولّد پرتو ایکس Philips RT250، ۷۵ kV است، برای تعیین صافی ذاتی آن، کیفیت پرتو ایکس در این ولتاژ اندازه‌گیری شده است. در این اندازه‌گیری، اتاقک یونش نوع W-30001، 0.6 cc، PTW در فاصلهٔ ۱۵۰ سانتی‌متری کانون پرتو ایکس بکار رفته و دیافراگم‌های D1 و D2 طوری انتخاب شده‌اند که قطر میدان در این فاصله ۶/۲ سانتی‌متر باشد (به طور کلی در اندازه‌گیری‌های مربوط به تعیین کیفیت پرتوهای ایکس، ابعاد میدان پرتو باید طوری انتخاب شود که برای پوشش کامل و یکنواخت آشکارساز کافی باشد). فاصلهٔ مرکز "صافی جاذب" تا کانون پرتو ایکس نیز ۷۵ cm بوده است. منحنی تغییرات شدّت پرتو عبوری اندازه‌گیری شده بر حسب ضخامت "صافی جاذب" آلومینیومی نشان می‌دهد که HVL در ضخامت ۲/۴۲ mmAl اتفاق می‌افتد (شکل ۳). ضخامت صافی ذاتی متناظر با این مقدار HVL در ولتاژ ۶۰ kV، با استفاده از منحنی شکل ۲ معادل با ۳/۱۶ mmAl به دست آمده است. بنابراین می‌توانیم نتیجه بگیریم که ضخامت صافی ذاتی مولّد پرتو ایکس مورد استفاده کمتر از حداکثر مجاز ۳/۵ mmAl می‌باشد و می‌توان از آن برای تولید پرتوهای ایکس مرجع استفاده کرد.

۴- تولید پرتوهای ایکس مرجع در سطح پرتودرمانی

مشخّصات پرتوهای ایکس مرجع برای سنجه‌بندی مناسب دزیمترها در سطح پرتودرمانی، در گزارش فنی IAEI TRS # 374 مندرج است [۲]. کیفیتهای این پرتوها، که در واقع از آزمایشگاه ملّی فیزیک انگلیس (NPL) اقتباس شده‌اند، گستره‌ای بین HVL = ۰/۰۲۴ mmAl تا HVL = ۴ mmCu را دربرمی‌گیرند. این گسترهٔ کیفیت، با اعمال ولتاژهایی بین ۸/۵ kV تا ۲۸۰ kV و به کار بردن صافی‌های اضافی مناسب ایجاد شده است. نحوهٔ تصفیه پرتوهای ایکس در هر ولتاژ طوری انجام گرفته است که نمودار کیفیت پرتوها برحسب تابعی از ولتاژ اعمال شده، در مقیاس لگاریتمی، خط راست باشد. این روش مناسب‌ترین شیوهٔ انتخاب کیفیت‌های مرجع برای سنجه‌بندی دزیمترها، چه در سطح پرتودرمانی و چه در سطح حفاظت در برابر پرتوها، شناخته شده است [۴].



شکل ۳- طریقهٔ تعیین صافی ذاتی دستگاه مولّد ایکس Philips RT250

با توجّه به اینکه دستگاه مولّد پرتو ایکس Philips RT250 تنها می‌تواند این پرتوها را در پنج ولتاژ ثابت بین ۷۵ kV و ۲۵۰ kV تولید کند، سعی شده است، پرتوهای ایکس در هر ولتاژ طوری تصفیه شوند که اوّلاً کیفیت پرتوهای ایجاد شده در گسترهٔ قابل قبول کیفیت پرتوهای ایکس مرجع در سطح پرتودرمانی قرار گیرند، ثانیاً نرخ کرمای هوا در مورد همهٔ آنها در نقطهٔ سنجه‌بندی تقریباً یکسان باشد [۴]. برای اندازه‌گیری کیفیت و نرخ کرمای هوا از اتاقک یونش استاندارد ثانویهٔ NPL o.325cc NE2561 #117 در فاصلهٔ ۱۰۰ سانتی‌متری کانون پرتو ایکس استفاده شده است. قطر میدان پرتو در این فاصله، هنگام اندازه‌گیری کیفیت پرتوها حدود ۴/۲ cm و هنگام اندازه‌گیری نرخ کرمای هوا حدود ۱۱/۷ cm بوده است. نتایج اندازه‌گیریها، شامل اندازه‌گیریهای مربوط به کیفیت و نرخ کرمای هوا، تغییرات نرخ کرمای هوا نسبت به تغییرات جریان لامپ مولّد پرتو ایکس، همچنین مقایسهٔ نمودار کیفیت پرتوهای تولید شده بر حسب تابعی از ولتاژ با گسترهٔ ارائه شده توسّط IAEA، در جدول ۱ و شکل‌های ۴ و ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند.

۵- تولید پرتوهای ایکس مرجع در سطح حفاظت در برابر پرتوها

پرتوهای ایکس مرجع تصفیه شده برای سنجه‌بندی دزیمترهای مورد استفاده در حوزهٔ حفاظت در برابر پرتوها، در چهار سری متمایز از هم در استاندارد ISO-4037-1 در جدول ۲ معرّفی شده‌اند: پرتوهای سری L دارای باریک‌ترین طیف و کمترین نرخ کرمای هوا هستند و به شرط سازگار بودن با گسترهٔ

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- مشخّصات پرتوهای ایکس مرجع تولید شده در سطح پرتودرمانی

ولتاژ (kV)	شدّت جریان (mA)	صافی اضافی (mm)	کیفیت (mm Al یا Cu بر حسب HVL)	ضریب همگنی h (HVL1/HVL2)	انرژی مؤثّر* (keV)	نرخ کرمای هوا** (mGy/min)
۷۵	۱۷	۰/۳۷۵ Al	۲/۶ Al	۰/۶۹	۳۳/۶۳	۴۹/۵۲
۱۰۰	۱۸	۳ Al	۰/۲ Cu	۰/۵۶	۴۴/۴۲	۴۹/۸۸
۱۵۰	۱۷	۰/۶ Cu + ۱ Al	۰/۸۹ Cu	۰/۷۰	۷۹/۰۶	۵۰/۶۹
۲۰۰	۱۶	۲/۱ Cu + ۱ Al	۲/۲۶ Cu	۰/۷۹	۱۲۵/۶	۴۹/۶۵
۲۵۰	۱۲	۱ Sn + ۱ Cu + ۱ Al	۳/۵ Cu	۰/۸۷	۱۵۹/۷۶	۵۰/۷۹

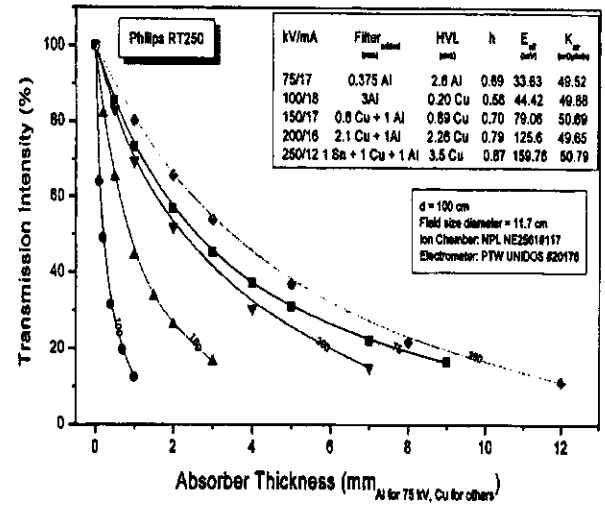
* منظور از انرژی مؤثّر پرتو ایکس ترمزی، انرژی یک باریکهٔ ایکس (فوتون) تک انرژی است که همان HVL پرتو ایکس ترمزی را داشته باشد. برای برآورد انرژی موثّر باریکه‌های ایکس، E_{eff}، ابتدا ضریب تضعیف هر باریکه از رابطهٔ $\mu = 0.693/HVL$ حساب شده، سپس با مراجعه به داده‌های موجود [۵]، که ضرایب تضعیف جرمی فوتون‌ها، یعنی μ/ρ، را در عناصر و مواد مختلف برحسب انرژی فوتون عرضه می‌دارند، انرژی موثّر برآورد شده است.

**فاصله از کانون پرتو ایکس ۱۰۰ cm، قطر میدان پرتو ۱۱/۷ cm.

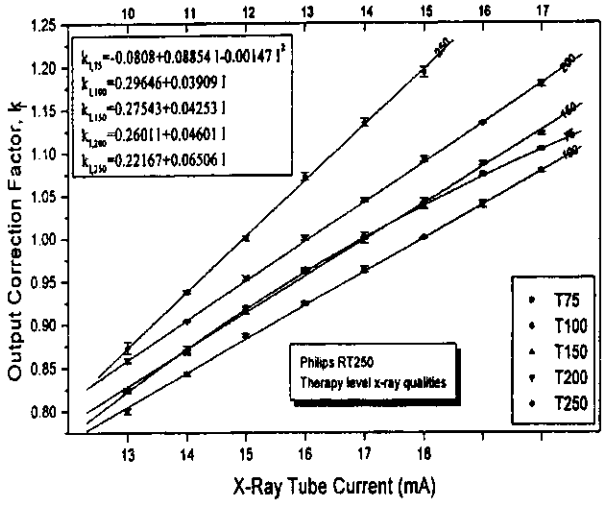
جدول ۲- مشخّصات کلی پرتوهای پیوستهٔ ایکس مرجع (ISO-4037)

نام سری	گسترهٔ کیفیت HVL (mm)	ضریب همگنی (h=HVL1/HVL2)	نرخ کرمای هوا (*Gy/h)
نرخ پایین کرمای هوا (L)	۰/۰۵۸ Al – ۵/۲۶ Cu	۱/۰	۳×۱۰^{-۴}
طیف باریک (N)	۰/۰۴۷ Al – ۶/۱۲ Cu	۰/۷۵ – ۱/۰	$۱۰^{-۳} - ۱۰^{-۲}$
طیف پهن (W)	۰/۱۸ Cu – ۵/۲۰ Cu	۰/۶۷ – ۰/۹۸	$۱۰^{-۲} - ۱۰^{-۱}$
نرخ بالای کرمای هوا (H)	۰/۰۳۶ Al – ۳/۴ Cu	۰/۶۴ – ۰/۸۶	$۱۰^{-۱} - ۰/۵$

*در فاصلهٔ ۱ متری و جریان ۱ mA



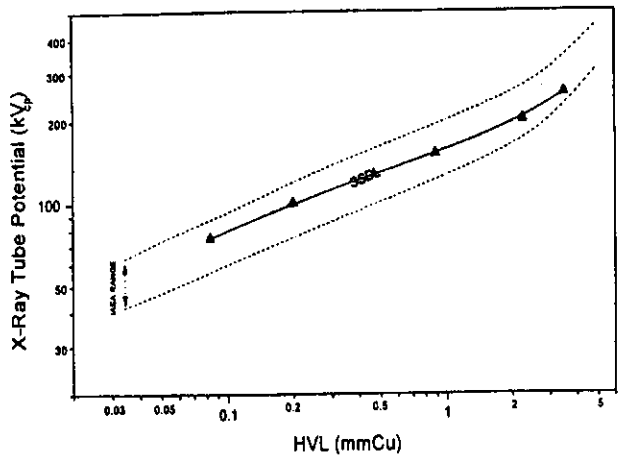
شکل ٤- نمودار تغییرات شدّت عبور پرتو بر حسب ضخامت صافی جاذب برای تعیین کیفیت باریکه‌های ایکس مرجع در سطح پرتودرمانی در ولتاژهای مختلف با صافی‌های اضافی معیّن



شکل ۵- تغییرات ضریب‌های تصحیح خروجی پرتوهای ایکس در سطح پرتودرمانی بر حسب جریان لامپ. نتایج اندازه‌گیری برای ولتاژهای ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ kV به ترتیب در جریان‌های ۱۷، ۱۸، ۱۷ و ۱۶ میلی آمپر (مقیاس پایین شکل) و برای ۲۵۰ kV در ۱۲ میلی آمپر (مقیاس بالای شکل) بهنجار شده‌اند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٦- مقایسهٔ کیفیت پرتوهای ایکس تولید شده در سطح پرتودرمانی با گسترهٔ قابل قبول کیفیت پرتوهای ایکس معرّفی شده توسّط (IAEA)

اندازه‌گیری دُزیمتر مورد آزمون، باید برای تعیین پاسخ آن برحسب انرژی فوتون به کار روند. در مقابل، پرتوهای سری H، پهن‌ترین طیف و بیشترین نرخ کِرمای هوا را دارند و برای تعیین ویژگیهای خارج از ظرفیت اندازه‌گیری (گرانباری)[٥] بعضی دزیمترها مناسب هستند.

با توجّه به محدودیت ولتاژهای موجود دستگاه Philips RT250، تنها بخشی از پرتوهای سری N، W و H، از ولتاژ ٧٥ kV به بالا، تولید شده و به علّت اختلاف اکثر ولتاژهای بکار رفته در ISO-4037-1 با ولتاژهای موجود و در دسترس نبودن صافی‌های اضافی مناسب، از تولید سری طیف L صرفنظر شده است. مشخّصات پرتوهای ایکس تولید شدهٔ سری N، W و H در جدول ٣ درج و در شکل‌های ٧، ١٠ و ١٣ نشان داده شده‌اند. اندازه‌گیری نرخ کِرمای هوا در مورد پرتوهای ایکس سری‌های N و W در فاصلهٔ ٣ متری از کانون پرتو ایکس و با استفاده از اتاقک یونش کروی نوع LS01, 1000cc انجام گرفته و قطر میدان پرتو در این فاصله تقریباً ٢٤ cm بوده است. در مورد پرتوهای ایکس سری H، اندازه‌گیری نرخ کرمای هوا در ولتاژهای ٧٥ kV و ١٠٠ kV با استفاده از اتاقک یونش NPL, 0.325cc, NE2561 در فاصلهٔ ٧٥ cm، و در ولتاژهای ٢٠٠ kV و ٢٥٠ kV با استفاده از اتاقک یونش LS01 در فاصلهٔ ٢٢٥ cm صورت گرفته است. برای تخمین E_{eff}، یعنی انرژی مؤثّر باریکه‌های ایکس، ابتدا ضریب تضعیف هر باریکه با استفاده از رابطهٔ $\mu = 0.693/HVL$ حساب شده، سپس به کمک داده‌های موجود [٥]، که ضرایب تضعیف جرمی فوتون‌ها، (μ/ρ)، را در عناصر و مواد مختلف برحسب انرژی فوتون ارائه می‌دهند، انرژی مؤثّر برآورد شده است.

برای سنجه‌بندی دُزیمترهای محیطی و فردی بر حسب واحدهای عملی معادل دُز $H^*(d)$، $H'(d,\Omega)$، و $H_p(d)$، لازم است کِرمای هوا را تحت شرایط معیّنی به معادل دُز تبدیل کنیم. برای این منظور در استاندارد ISO 4073-3، ضریبهای تبدیل کِرمای هوا (Gy) به معادل دُز (Sv) بر حسب انرژی میانگین طیف پرتوهای ایکس مرجع عرضه شده‌اند [٦]. با استفاده از روش درونیابی این داده‌ها، ضریب‌های تبدیل مذکور برای پرتوهای ایکس تولید شده، بر حسب انرژی مؤثّر هر باریکه حساب و در جدول ٤ درج شده‌اند. در مورد پرتوهای ایکس طیف‌های N و W، چون درجهٔ همگنی آنها بالا است، انرژی‌های میانگین و مؤثّرشان نزدیک به هم هستند؛ به همین جهت از انرژی مؤثّر حساب شده برای برآورد ضرایب تبدیل کِرما به معادل دُز استفاده شده است. در مورد پرتوهای ایکس طیف H، انرژی بکار رفته، انرژی مؤثّر متناظر با انرژی میانگین هر باریکه است.

نمودارهای تغییرات نسبی "نرخ کِرمای هوا" برای پرتوهای ایکس تولید شده بر حسب تابعی از جریان لامپ، همچنین مقایسهٔ کیفیت این پرتوها با کیفیت‌های استاندارد ISO-4037-1، برحسب تابعی از ولتاژهای بکار رفته، در شکل‌های ٨، ٩، ١١، ١٢، ١٤ و ١٥ نشان داده شده‌اند. کاهش نسبی "نرخ کرمای هوا" در ولتاژهای ٧٥ kV و ١٠٠ kV در سری N با افزایش جریان جالب توجّه است (شکل ٨). این کاهش احتمالاً در نتیجهٔ اُفت کیفیت پرتو بر اثر افزایش جریان در یک ولتاژ ظاهراً ثابت رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، طیف فوتونهای تولید شده در یک ولتاژ ثابت و صافی اضافی معیّن، هنگام افزایش جریان لامپ به سمت انرژی‌های پایین‌تر سوق داده می‌شود. در نتیجه تعداد نسبی فوتونهای جذب شده در صافی اضافی، با افزایش جریان زیادتر شده و سبب می‌شود که آهنگ افزایش "نرخ کِرمای هوا" به ازای افزایش جریان لامپ در ولتاژهای بالاتر از ١٠٠ kV، کند شود و در ولتاژهای ٧٥ kV و١٠٠ kV با صافی‌های اضافی، به

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳- مشخصات پرتوهای ایکس مرجع تولید شده در سطح حفاظت در برابر پرتوها

نام طیف	ولتاژ (kV)	جریان (mA)	صافی اضافی (mm)	کیفیت پرتو (HVL در mmCu)	ضریب همگنی (HVL1/HVL2)	انرژی مؤثر (keV)	نرخ کرمای هوا * (mGy/h)
N	۷۵	۱۵	۱/۶ Cu + ۱ Al	۰/۵۰۸	۰/۹۸	۶۳/۲	۳/۴۸۷۸
	۱۰۰	۱۵	۵ Cu + ۱ Al	۱/۱۱۶	۰/۹۲	۸۶/۲	۱/۵۴۴۴
	۱۵۰	۱۵	۲/۵ Sn + ۱ Al	۲/۴۳۸	۰/۹۲	۱۳۰/۳	۱۴/۷۱۳۸
	۲۰۰	۱۵	۱ Pb + ۱ Sn + ۱ Al	۴/۰۰	۰/۹۸	۱۷۱/۲	۱۱/۹۷۹
	۲۵۰	۱۲	۲/۵ Pb +۱ Sn + ۱ Al	۵/۳۶	۰/۹۸	۲۲۹/۸	۹/۲۶۷۶
W	۷۵	۱۶	۰/۴ Cu + ۱ Al	۰/۳۲۳	۰/۹۱	۵۳/۳	۳۷/۳۳۲
	۱۰۰	۱۶	۱/۵ Cu + ۱ Al	۰/۷۵۴	۰/۸۹	۷۴/۴	۲۴/۸۵۲
	۱۵۰	۱۶	۱ Sn + ۱ Al	۱/۸۹۱	۰/۸۸	۱۱۳/۴	۶۴/۷۷۶
	۲۰۰	۱۶	۲ Sn + ۱ Al	۳/۲۴۲	۰/۹۰	۱۵۳/۸	۱۱۸/۲۳
	۲۵۰	۱۲	۴ Sn + ۱ Al	۴/۵۲۲	۰/۹۶	۱۹۳/۲	۱۱۱/۲۸۲
H	۷۵	۱۶	۰/۱ Cu + ۱ Al	۰/۱۸۰	۰/۶۹	۴۲/۴	۱۹۳۰/۸
	۱۰۰	۱۶	۰/۲ Cu + ۱ Al	۰/۳۴۶	۰/۷۳	۵۴/۱۶	۳۰۳۴/۸
	۲۰۰	۱۶	۱/۱ Cu + ۱ Al	۱/۷۰	۰/۶۹	۱۰۶/۶۰	۸۷۶/۶
	۲۵۰	۱۲	۱/۶ Cu + ۱ Al	۲/۵۶۴	۰/۷۳	۱۳۴/۵	۱۰۲۰/۶

* اندازه‌گیری نرخ کرمای هوا در مورد پرتوهای ایکس سری‌های N و W، در فاصلهٔ ۳ متری از کانون پرتو ایکس به وسیلهٔ اتاقک یونش کروی نوع LS01 1000 cc انجام گرفته و قطر میدان پرتو در این فاصله تقریباً ۲۴ cm بوده است. در مورد پرتوهای ایکس سری H، اندازه‌گیری نرخ کرمای هوا در ولتاژهای ۷۵ kV و ۱۰۰ kV با استفاده از اتاقک یونش NPL, 0.325 cc, NE2561 در فاصلهٔ ۷۵ cm، و در ولتاژهای ۲۰۰ kV و ۲۵۰ kV با استفاده از اتاقک یونش LS01 در فاصلهٔ ۲۲۵ cm صورت گرفته است.

جدول ۴- ضریب‌های تبدیل کرمای هوا به واحدهای معادل دُز محیطی و فردی در شرایط تابش عمودی پرتوهای ایکس مرجع تولید شده

نام طیف	کیفیت پرتو (HVL در mmCu)	انرژی مؤثر E_{eff}(keV)	ضریب تبدیل کرمای هوا به معادل دُز، (Sv/Gy)				
			$H'(0.07)/K_a$	$H^*(10)/K_a$	فانتوم تخت * (Slab)		فانتوم ستونی * (Pillar)	فانتوم میله‌ای * (Rod)
					$H_p(0.07)/K_a$	$H_p(10)/K_a$	$H_p(0.07)/K_a$	$H_p(0.07)/K_a$
N	۰/۵۰۸	۶۳/۲	۱/۵۹	۱/۷۳	۱/۷۱	۱/۸۷	۱/۳۹	۱/۱۴
	۱/۱۱۶	۸۶/۲	۱/۵۹	۱/۷۰	۱/۷۱	۱/۸۷	۱/۳۷	۱/۱۷
	۲/۴۳۸	۱۳۰/۳	۱/۴۷	۱/۵۴	۱/۵۷	۱/۶۸	۱/۳۰	۱/۱۷
	۴/۰۰	۱۷۱/۲	۱/۳۸	۱/۴۴	۱/۴۸	۱/۵۵	۱/۲۶	۱/۱۶
	۵/۳۶	۲۲۹/۸	۱/۳۲	۱/۳۷	۱/۴۰	۱/۴۵	۱/۲۳	۱/۱۴
W	۰/۳۲۳	۵۳/۳	۱/۵۰	۱/۶۰	۱/۵۹	۱/۷۰	۱/۳۴	۱/۱۲
	۰/۷۵۴	۷۴/۴	۱/۵۹	۱/۷۱	۱/۷۱	۱/۸۷	۱/۳۸	۱/۱۵
	۱/۸۹۱	۱۱۳/۴	۱/۵۰	۱/۵۸	۱/۶۱	۱/۷۳	۱/۳۲	۱/۱۶
	۳/۲۴۲	۱۵۳/۸	۱/۳۹	۱/۴۷	۱/۵۰	۱/۵۸	۱/۲۸	۱/۱۵
	۴/۵۲۲	۱۹۳/۲	۱/۳۵	۱/۴۰	۱/۴۳	۱/۴۹	۱/۲۴	۱/۱۵
H	۰/۱۸۰	۴۲/۴	۱/۴۰	۱/۴۱	۱/۴۷	۱/۴۹	۱/۲۸	۱/۱۰
	۰/۳۴۶	۵۴/۱۶	۱/۵۰	۱/۵۸	۱/۵۹	۱/۶۹	۱/۳۳	۱/۱۳
	۱/۷۰	۱۰۶/۶۰	۱/۴۹	۱/۵۹	۱/۶۰	۱/۷۲	۱/۳۲	۱/۱۶
	۲/۵۶۴	۱۳۴/۵	۱/۴۳	۱/۵۱	۱/۵۳	۱/۶۳	۱/۲۹	۱/۱۶

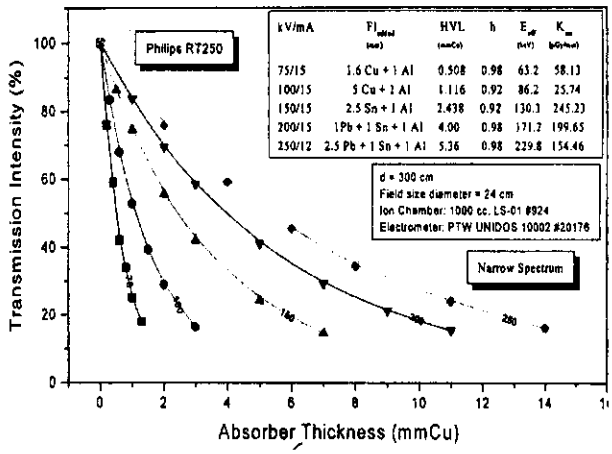
*فانتوم‌های استاندارد مورد استفاده برای سنجه‌بندی دزیمترهای فردی: ۱) فانتوم تخت (آب)، نمایانگر تمام بدن، به ابعاد ۱۵ cm × ۳۰ cm × ۳۰ cm، دیواره‌های فانتوم از جنس پرپکس (PMMA) به ضخامت ۱۰ mm (بجز صفحهٔ جلویی با ضخامت ۲/۵mm).

۲) فانتوم ستونی (آب)، نمایانگر ساعد یا ساق پا، استوانه‌ای به قطر ۷۳mm و به طول ۳۰۰mm، جنس دیواره‌ها PMMA، ضخامت مدور ۲/۵mm، انتها ۱۰ mm.

۳) فانتوم میله‌ای نمایانگر انگشت از جنس PMMA به قطر ۱۹ mm و به طول ۳۰۰ mm.

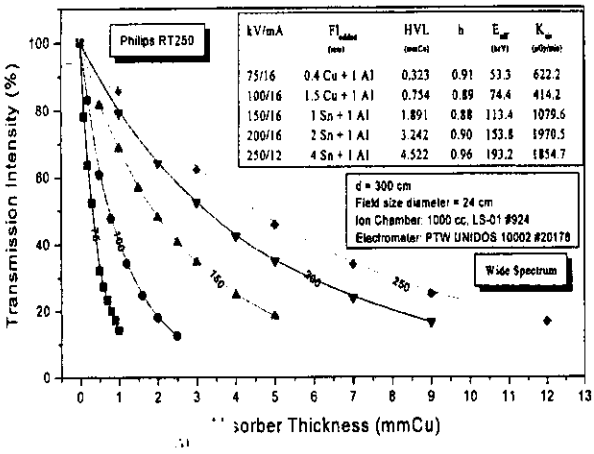
www.SID.ir

Archive of SID



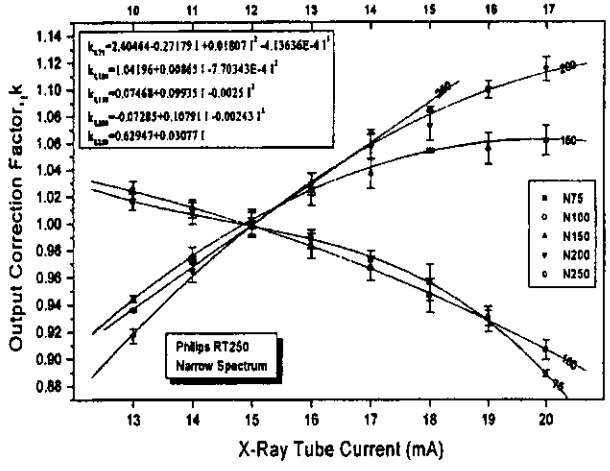
kV/mA	Fl added (mm)	HVL (mmCu)	h	E_{eff} (keV)	K_{air} (μGy/mAs)
75/15	1.6 Cu + 1 Al	0.508	0.98	63.2	58.13
100/15	5 Cu + 1 Al	1.116	0.92	86.2	25.74
150/15	2.5 Sn + 1 Al	2.438	0.92	130.3	245.23
200/15	1Pb + 1 Sn + 1 Al	4.00	0.98	171.2	199.65
250/12	2.5 Pb + 1 Sn + 1 Al	5.36	0.98	229.8	154.46

شکل ۷- نمودار تغییرات نسبی شدّت پرتو بر حسب ضخامت صافی جذب‌کننده برای تعیین کیفیت باریکه‌های پرتو ایکس مرجع دارای طیف باریک (Narrow Spectrum) در ولتاژهای مختلف با صافی اضافی معیّن

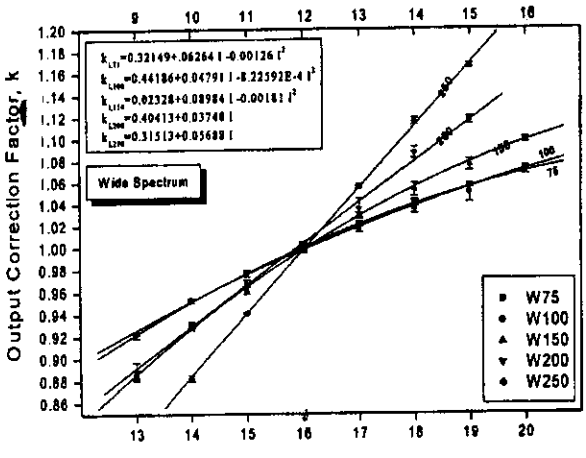


kV/mA	Fl added (mm)	HVL (mmCu)	h	E_{eff} (keV)	K_{air} (μGy/mAs)
75/16	0.4 Cu + 1 Al	0.323	0.91	53.3	622.2
100/16	1.5 Cu + 1 Al	0.754	0.89	74.4	414.2
150/16	1 Sn + 1 Al	1.891	0.88	113.4	1079.6
200/16	2 Sn + 1 Al	3.242	0.90	153.8	1970.5
250/12	4 Sn + 1 Al	4.522	0.96	193.2	1854.7

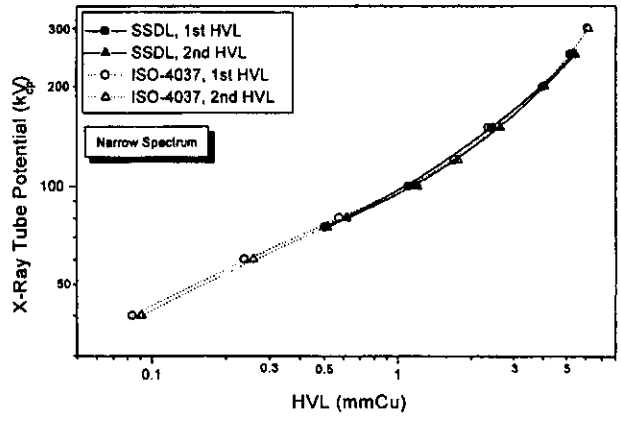
شکل ۱۰- نمودار تغییرات نسبی شدّت عبور پرتو اندازه‌گیری شده برحسب ضخامت صافی جاذب برای باریکه‌های پرتو ایکس مرجع طیف پهن (Wide Spectrum) بخش SSDL در ولتاژهای مختلف با صافی اضافی معیّن.



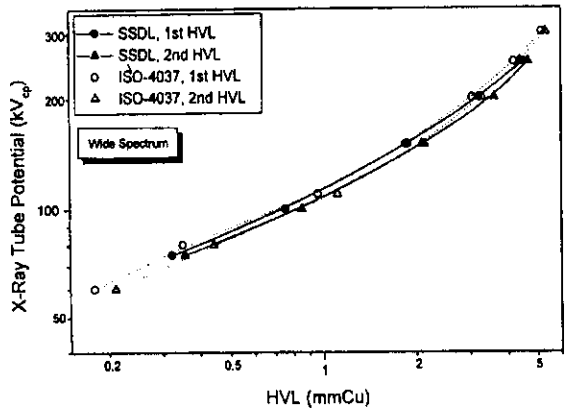
شکل ۸- تغییرات خروجی پرتوهای ایکس سری طیف باریک (Narrow Spectrum) بخش SSDL بر حسب جریان لامپ. نتایج اندازه‌گیری برای پرتوهای N75-N200 در جریان ۱۵ mA (مقیاس پایین شکل) و برای N250 در جریان ۱۲ mA (مقیاس بالای شکل) بهنجار شده‌اند.



شکل ۱۱- تغییرات خروجی پرتوهای ایکس دستهٔ طیف پهن(Wide Spectrum) بخش SSDL بر حسب جریان لامپ. نتایج اندازه‌گیری برای پرتوهای W75 تا W200 در جریان ۱۶ mA (مقیاس پایین شکل) و برای W250 در ۱۲ mA (مقیاس بالای شکل) بهنجار شده‌اند.



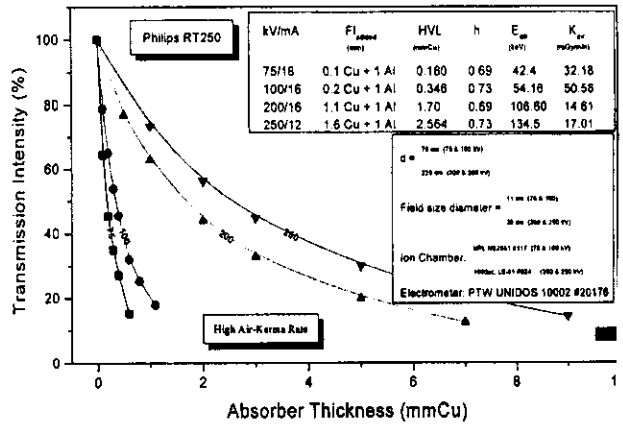
شکل ۹- مقایسهٔ کیفیت پرتوهای ایکس تولید شدهٔ سری طیف باریک (Narrow Spectrum) با پرتوهای ایکس معرّفی شده دراستاندارد ISO-4037-1 در بخش SSDL.



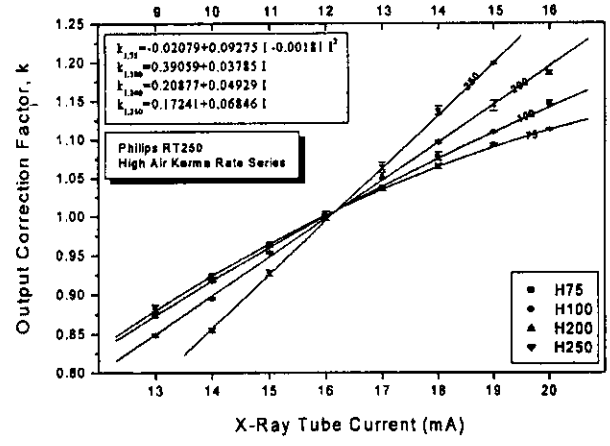
شکل ۱۲- مقایسهٔ کیفیت پرتوهای ایکس تولید شده دسته طیف پهن (Wide Spectrum) بخش SSDL با پرتوهای معرّفی شده در استاندارد ISO-4037-1.

www.SID.ir

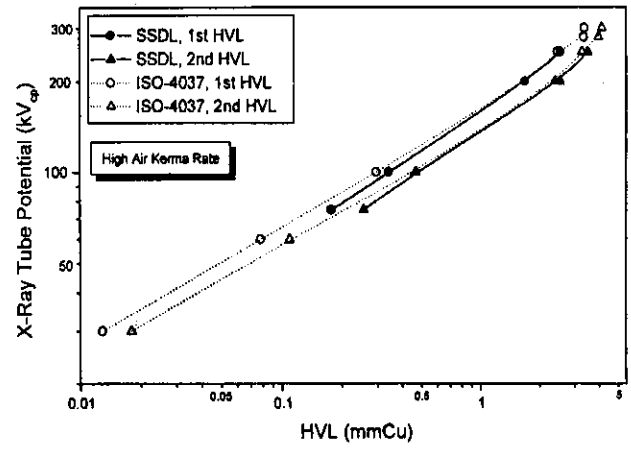
Archive of SID



شکل ۱۳- نمودار تغییرات نسبی شدّت عبور پرتو اندازه‌گیری شده بر حسب ضخامت صافی جاذب برای باریکه‌های پرتو ایکس مرجع با نرخ کرمای هوا (High Air Kerma Rate Series) بخش SSDL با ولتاژهای مختلف و صافی اضافی معیّن



شکل ۱۴- تغییرات خروجی پرتوهای ایکس با نرخ بالای کرمای هوا (High Air Kerma Rate Series) بخش SSDL بر حسب جریان لامپ. نتایج اندازه‌گیری برای پرتوهای H75 تا H200 در جریان ۱۶ mA (مقیاس پایین شکل) و برای H250 در ۱۲ mA (مقیاس بالای شکل) بهنجار شده‌اند.



شکل ۱۵- مقایسهٔ کیفیت پرتوهای ایکس تولید شده با نرخ بالای کرمای هوا (High Air Kerma Rate Series) بخش SSDL با پرتوهای معرّفی شده در استاندارد ISO-4037-1.

ترتیب بیشتر از ۱/۲ mmCu و ٤ mmCu، ابتدا متوقف گردیده سپس حتّی کاهش یابد. این پدیده در دستگاه مولّد پرتو ایکس دیگر از نوع hilips RT250 هم مشاهده شده، ولی در دستگاه مولّد پرتو ایکس از نوع ISOVOLT IV، که قابلیت تغییر پیوستهٔ ولتاژ و جریان دارد، این اثر بسیار کمتر دیده شده و بی‌اهمیّت بوده است.

٦- بررسی خطاها و تأثیر پراکندگی پرتو

ارزیابی خطای کلّی[٦] در تعیین "نرخ کرمای هوا" براساس استاندارد ISO/TAG 4/WG3 صورت گرفته است [۷]. بر این اساس خطای کلّی در تعیین "نرخ کرمای هوا" در مورد باریکه‌های پرتو ایکس تولید شده در سطح پرتودرمانی در نقطهٔ سنجه‌بندی (۱۰۰ cm) و دو باریکهٔ H75 و H100* (در ۷۵ cm)، با در نظر گرفتن خطای فاکتور سنجه‌بندی اتاقک یونش NPL NE2561 در کیفیت باریکه‌های پرتو ایکس مورد نظر (±۱/۲٪)، خطای تنظیم مرکز اتاقک یونش در نقطهٔ سنجه‌بندی (±۱mm)، خطای تعیین دمای محیط اندازه‌گیری (±۱°C)، خطای تعیین فشار هوا (±۱mb)، انحراف معیار مقادیر خوانده شده الکترومتر هنگام اندازه‌گیری (±۰/۵٪) و همچنین با در نظرگرفتن ضریب پوششی[۷] k = ۲/۵، در حدود ۳/۵٪ برآورد شده است. به همین طریق، خطای کلّی در تعیین نرخ کرمای هوای باریکه‌های پرتو ایکس تولید شده در سطح حفاظت در برابر اشعه (بجز H75 و H100) در نقطهٔ سنجه‌بندی (۳۰۰ cm)، با در نظر گرفتن خطای فاکتور سنجه‌بندی اتاقک یونش LS 01 در تعیین کیفیت باریکه‌های پرتو ایکس مورد نظر (۱٪)، خطای تنظیم مرکز اتاقک یونش در نقطهٔ سنجه‌بندی (±۰/۵ cm)، خطای تعیین دما و فشار هوای محیط اندازه‌گیری (به ترتیب ±۱°C و ±۱mb)، انحراف معیار مقادیر خوانده شدهٔ الکترومتر هنگام اندازه‌گیری (±۱٪)، همچنین با در نظر گرفتن ضریب پوششی k=۲/۵، جمعاً حدود ٤٪ برآورد شده است.

برای ارزیابی سهم پراکندگی پرتو در باریکه‌های اصلی پرتوهای ایکس تولید شده، بنا بر توصیهٔ ISO-4037-1، نرخ کرمای هوا در فواصل مختلف از کانون این پرتوها واقع بر محور مرکزی، در همهٔ باریکه‌های مرجع تولید شده، در سطوح پرتودرمانی و حفاظت در برابر پرتوها اندازه‌گیری و نتایج حاصل

* منظور از H75 و H100، باریکهٔ طیف H در ولتاژ ۷۵ kV و ۵۵ kV است.

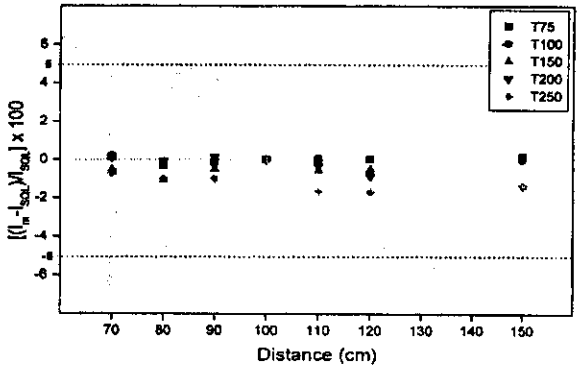
www.SID.ir

Archive of SID

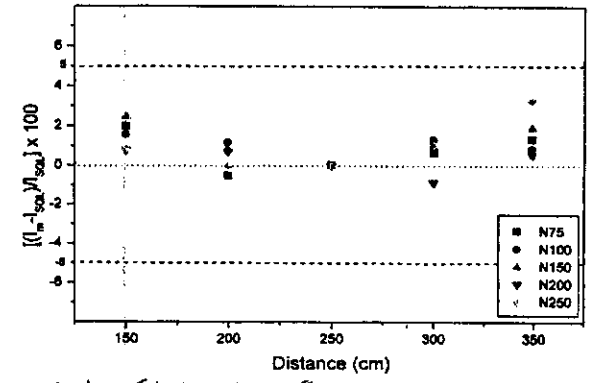
با مقادیر حساب شده به نسبت عکس مجذور فاصله از نقاط سنجه‌بندی مقایسه گردیده‌اند. اختلاف نسبی نتایج اندازه‌گیری با مقادیر حساب شده در همهٔ موارد از ۵٪ (حداکثر اختلاف قابل قبول در استاندارد مذکور) همواره کمتر بوده است. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نتایج این اندازه‌گیریها را به ترتیب در مورد پرتوهای ایکس مرجع در سطح پرتودرمانی و پرتوهای ایکس مرجع طیف باریک[۸] نشان می‌دهند.

۷- نتیجه گیری

تأمین میدانهای مرجع پرتوهای یونساز از اهمّ ضروریات یک آزمایشگاه دزیمتری استاندارد به شمار می‌رود. در این مقاله، نحوهٔ تولید پرتوهای تصفیه شدهٔ ایکس مرجع، در سطوح پرتودرمانی و حفاظت در برابر پرتوها، به وسیلهٔ دستگاه مولّد پرتو ایکس از نوع Philips RT250 و براساس استانداردهای بین‌المللی موجود شرح داده شده است. با توجّه به محدود بودن ولتاژهایی که در دسترسند، تنها بخشی از پرتوهای ایکس مرجع



شکل ۱۶- درصد انحراف خروجی اندازه‌گیری شدهٔ پرتوهای ایکس تولید شده در سطح پرتودرمانی در فواصل مختلف (I_m) از مقادیر خروجی محاسبه شده به نسبت عکس مجذور فاصله (I_{SQL}) از نقطهٔ سنجه‌بندی (۱۰۰ cm).



شکل ۱۷- درصد انحراف خروجی اندازه‌گیری شدهٔ پرتوهای ایکس تولید شده طیف N در فواصل مختلف (I_m) از مقادیر محاسبه شده خروجی به نسبت عکس مجذور فاصله (I_{SQL}) از نقطهٔ سنجه‌بندی (۲۵۰ cm).

ISO و IAEA تولید شده است. روش‌های بکار رفته معمولاً کلّی هستند. چناچه یک، یا ترجیحاً دو دستگاه مولّد پرتو ایکس (یکی برای ولتاژهای کمتر از ۱۰۰ kV و دیگری برای ولتاژهای ۳۰۰kV - ۱۰۰) با قابلیت تغییر پیوستهٔ ولتاژ و جریان، همچنین امکانات طیف‌سنجی و نصب اتاقک یونش ناظر[۹] در مسیر پرتو تأمین شوند، می‌توان به باریکه‌های پرتو ایکس به مراتب مطلوب‌تری از لحاظ گسترهٔ انرژی و انطباق با باریکه‌های استاندارد دست یافت.

پی‌نوشت‌ها:

۱ - Kerma
۲ - Bremsstrahlung
۳ - Radiators
٤ - **HVL:** (Half Value Layer)
٥ - Overload
٦ - Overall Uncertainty
۷ - Coverage Factor
۸ - Narrow Spectrum
۹ - Monitor Chamber

References:

1. International Atomic Energy Agency, "Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments," IAEA Safety Reports Series No. 16 (2000).

2. International Atomic Energy Agency, "Calibration of Dosimeters Used in Radiotherapy," IAEA Technical Reports Series No. 374 (1994).

3. International Standards Organization, X and Gamma Reference Radiations for Calibrating Dose Meters and Dose Rate Meters and for Determining Their Response as a Function Photon Energy – Characteristics of the Radiations and their Methods of Production, ISO Standard 4037-1,Geneva (1995).

4. J. E. Burns, X-Ray Calibration Qualities, IAEA SSDL Newsletter, No. 39, July (1998).

5. F. M. Khan, The Physics of Radiation Therapy, Williams & Wilkins, Baltimore (1984).

6. International Standards Organization, "Reference Photon Radiations – Calibration of Area and Personnel Dosemeters and the Determination of their Response as a Fuction of Energy and Angle of Incidence," ISO/DIS 4037-3, Geneva (1995).

7. International Standards Organization, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," ISO/G4/WG3, Geneva (1992).

www.SID.ir