J. of
Nı ı.
No. 29, pp. 7-16, 2003

مجله علوم و فنون هسته‌اي
شماره ۲۹، صفحات ۱٦- ۷، ۱۳۸۲

تولید پرتوهاي ایکس ترمزي مرجع در آزمایشگاه دزیمتري استاندارد

عبدالرضا سلیمانیان*، ارژنگ شاهور، مصطفي غفوري، آنیتا عالیپور
مركز تحقیقات کشاورزي و پزشكي هسته‌اي، سازمان انرژي اتمي ایران، صندوق پستي: ۴۳۹۵ - ۳۱۵۸۵، کرج- ایران

چکیده: تولید باریکه‌هاي مرجع پرتوهاي یونساز با انرژي و دُز مشخّص، در آزمایشگاههاي دزیمتري استاندارد از اهمیّت کاربردي زیادي برخوردار است. استانداردهاي معیّني در زمینة معرّفي و نحوة تولید این پرتوها، توسّط سازمانهاي بین‌المللي ذیربط، از جمله ISO و IAEA تدوین و منتشر شده‌اند. در این مقاله چگونگي تولید و تعیین مشخّصات بخشي از باریکه‌هاي پرتو ایکس مرجع در سطح پرتودرماني و حفاظت در برابر پرتوها را با استفاده از یك دستگاه مولّد ایکس نوع Philips RT250 و براساس استانداردهاي بین‌المللي موجود شرح داده و سعي کرده‌ایم تا پرتوهاي ایکس حاصل در حدّ امکان نزدیك به پرتوهاي ایکس مرجع و استاندارد باشند.

واژه‌هاي کلیدي: *سنجه‌بندي، باریکه ایکس مرجع، کیفیت باریکه، صافي ذاتي، صافي جاذب، ضریب همگني*

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*

تاريخ دريافت مقاله: ١٣٨١/٨/١٥ تاريخ پذيرش مقاله: ١٣٨٢/٧/٢١

*email: abdolreza_solimanian@yahoo.com

١- مقدمه

ميدانهاي مرجع پرتوهاي يونساز مبناي سنجه‌بندي و تعيين پاسخ دزيمترها بر حسب نوع و انرژي پرتو به شمار مي‌روند. مشخّصات و نحوة ايجاد ميدانهاي مرجع مناسب براي سنجه‌بندي انواع دزيمترهاي مورد استفاده در پرتودرماني و حفاظت در برابر پرتوها، توسّط آژانس بين‌المللي انرژي اتمي (IAEA) و سازمان استاندارد جهاني (ISO) تعيين شده‌اند [٣ - ١]. توليد ميدانهاي مرجع پرتوهاي يونساز مستلزم دسترسي به منابع مولّد آنها، مانند دستگاههاي مولّد پرتو ايكس و چشمه‌هاي پرتوزا است. در واقع ميدانهاي فوتوني مرجع مورد نياز براي سنجه‌بندي دزيمترهاي فوتون بر حسب كِرماي(١) هوا يا واحدهاي معادل دُز و تعيين پاسخ آنها بر حسب انرژي فوتون را مي‌توان برحسب منشأ توليد آنها در سه دستة كلّي طبقه‌بندي كرد: دستة اوّل پرتوهاي ايكس با طيف پيوسته تابش ترمزي(٢) هستند كه به وسيلة دستگاههاي مولّد پرتوهاي ايكس با ولتاژ بين ١٠ kV تا ٣٠٠ kV توليد مي‌شوند و با گذراندن آنها از صافي مناسب، كه موضوع اين كار تحقيقي است، مي‌توان به باريكه‌هاي ايكس مرجع و استاندارد دست يافت. دستة دوّم، عبارتند از پرتوهاي ايكس مشخّص (فلورسنت) يا باريكه‌هاي فوتون تك انرژي كه با تاباندن پرتوهاي ايكس ترمزي حاصل از يك لامپ مولّد پرتو ايكس به چند صفحة فلّزي خاص (تابش كننده‌ها)(٣) توليد مي‌شوند و در برخي از آزمايشگاههاي دزيمتري به عنوان پرتوهاي ايكس مرجع با انرژي كمتر از ١٠٠ keV بكار مي‌روند. دستة سوّم، فوتون‌هايي هستند كه يا از چشمه‌هاي پرتوزاي مشخّصي مانند (^{٦٠}Co, ^{١٣٧}Cs, ^{٢٤١}Am) ساطع مي‌گردند، يا به وسيلة واكنش‌هاي هسته‌اي توليد مي‌شوند. روش توليد فوتون‌هاي مرجع در گسترة انرژي بين ٤ MeV و ٩ MeV به وسيلة تعدادي واكنش‌هاي هسته‌اي خاص توسّط ISO عرضه شده است. انتخاب چنين گسترة انرژي بدين سبب است كه اوّلاً ميدانهاي فوتوني با انرژي حدود ٦ MeV در بسياري از تأسيسات هسته‌اي (به ويژه در رآكتورها) و منابع ديگر توليد انرژي بالا ايجاد مي‌شوند. ثانياً هيچگونه ناپيوستگي در تغييرات پاسخ بيشتر دزيمترها در اين گسترة انرژي و بالاتر از آن ديده نمي‌شود. با وجود اين، توليد فوتون‌هاي مرجع به وسيلة واكنشهاي هسته‌اي مستلزم داشتن امكانات و تجهيزات پيچيده‌اي است كه بسياري از آزمايشگاههاي دزيمتري فاقد آن هستند.

موضوع اين كار پژوهشي، بهينه‌سازي خروجي يك دستگاه مولّد پرتو ايكس براي توليد پرتوهاي ايكس مرجع است به طوري كه كيفيتهاي مناسب سنجه‌بندي دزيمترهاي مختلف در سطوح پرتودرماني و حفاظت در برابر پرتوها را دارا باشند. دستگاه مولّد پرتو ايكس موجود در بخش دزيمتري استاندارد (SSDL)، دستگاهي از نوع Philips RT250 است كه پرتوهاي ايكس متوسّط را در پنج ولتاژ ثابت ٧٥، ١٠٠، ١٥٠، ٢٠٠ و ٢٥٠ كيلوولت توليد مي‌كند. اين دستگاه، گرچه مشخّصات يك دستگاه مولّد پرتو ايكس مرجع مطلوب، يعني امكان تغيير پيوستة ولتاژ با دقّت ±١% ، قابلّيت تثبيت ولتاژ دلخواه با دقّت ±٠/٣% و يا تغيير پيوستة جريان لامپ در يك گسترة دلخواه را ندارد، ولي با استفاده از امكانات موجود سعي شده است كيفيت پرتوهاي ايكس توليد شده در حدّ امكان نزديك به كيفيت پرتوهاي ايكس مرجع و استاندارد باشد.

۲- روش كار

براي توليد باريكه‌هاي ايكس مرجع، انتخاب ولتاژ، انتخاب صافي اضافي مناسب، تعيين كيفيت باريكه و اندازه‌گيري خروجي (نرخ كِرماي هوا) در نقطة سنجه‌بندي مورد نظر بوده است. انتخاب ولتاژ و صافي اضافي اصولاً بايد بر اساس استانداردهاي موجود باشد، ولي، به طوري كه در مقدمه بيان شد، دستگاه مولّد ايكس Philips RT250 تنها در پنج ولتاژ ثابت كار مي‌كند و استفاده از آنها اجتناب ناپذير بوده است. صافي اضافي، ضخامتي متشكّل از يك يا چند فلز معيّن است كه در مسير پرتو قرار داده مي‌شود و با توجّه به ولتاژ اعمال شده، باريكة ايكس با كيفيت مشخّص را توليد مي‌كند. كيفيت باريكة ايكس را با كميتي به نام "لاية نيم‌مقدار" (HVL)(٤) مي‌سنجند. منظور از لاية نيم‌مقدار ضخامتي از يك فلز است كه شدّت باريكة پرتو ايكس (تعداد فوتون‌ها) را پس از عبور از آن به نصف كاهش دهد و آنرا HVL اوّل مي‌نامند. ضخامتي از همان فلز كه بتواند به ضخامت فلز اوّل اضافه شود و شدّت همان باريكه را به ١/٤ كاهش دهد HVL دوّم مي‌نامند. نسبت HVL اوّل به دوّم را ضريب همگني باريكة پرتو ايكس «h» مي‌نامند. با توجّه به اينكه پرتوهاي ايكسي كه طيف پيوستة ترمزي دارند با عبور از صافي همواره سختتر مي‌شوند، بنابراين، اندازه‌گيري HVL دوّم و برآورد h (ضريب همگني)، كه ملاكي از پهناي طيف باريكة پرتو ايكس توليد شده است، در مورد پرتوهاي ايكس در سطح پرتودرماني مطلوب است ولي در سطح حفاظت در برابر پرتوها، به منظور مقايسه با همگني پرتوهاي مرجع، ضرورت دارد.

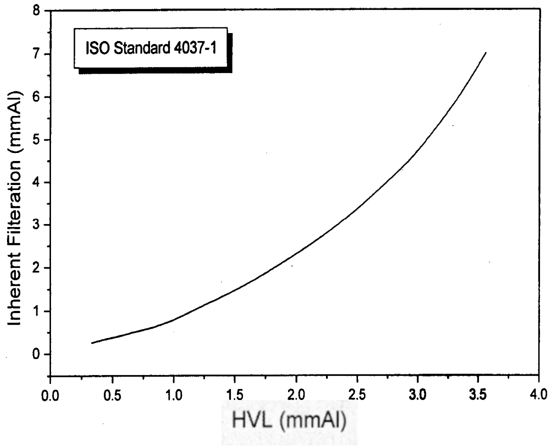
براي تعيين كيفيت باريكه‌هاي ايكس، شدّت عبور پرتو از صافي‌هاي آلومينيومي و مسي (صافي‌هاي جاذب A در شكل ١) با ضخامتهاي مختلف به وسيلة اتاقكهاي يونش اندازه‌گيري شده است. براي رسيدن به كيفيتهاي مرجع و استاندارد ايجاب مي‌كرد كه با هر ولتاژ، تركيب و ضخامت صافي‌هاي اضافي را به دفعات تغيير داده و اندازه‌گيري كيفيت انجام شود. لامپ دستگاه مولّد پرتو ايكسPhilips RT250، كه در هنگام كاربرد باليني روي يك پايه سوار و به لحاظ سهولت حركت قابل انعطاف است، در آزمايشگاه دزيمتري استاندارد (SSDL)، با يك كوليماتور (C) و يك شاتر(S) درون محفظة سربي به ابعاد ٧١cm×٤٧cm×٤٥cmتثبيت شده و باريكه‌هاي مخروطي پرتوهاي ايكس را در طول اتاقي به ابعاد m ×٤m ×٧ ١٤m ايجاد مي‌نمايد. فاصلة محور مركزي باريكه تا كف اتاق ١٢٣ cm و قطر ميدان پرتو، به وسيلة ديافراگم‌هاي D1 و D2 قابل تغيير است. محور مركزي باريكة پرتو، همچنين فاصلة هر نقطه روي محور مركزي باريكه تا كانون پرتو ايكس به ترتيب به وسيلة باريكه‌هاي ليزرL1 (ثابت) و L2 (متحرك) تعيين مي‌شوند (شكل١). جاي صافي اضافي ($F_{add.}$) بلافاصله پس از ديافراگم ثابت خروجي پرتو از محفظة سربي (ديافراگم اوّليه به قطر D_0 = ٨ cm) بوده و صافي‌هاي جاذب (A) نيز، كه هنگام تعيين كيفيت به كار مي‌روند، يا پس از ديافراگم‌هاي متغيرD1 و D2 (در فواصل اندازه‌گيري نزديك،

شكل ١- تركيب‌بندي استفاده شده به منظور به دست آوردن و اندازه‌گيري پرتوهاي ايكس مرجع مورد نظر شامل C:كليماتور S:شاتر F_{add}:صافي اضافي D_o:ديافراگم اوّليه D1 و D2 : ديافراگم‌هاي متغيّر A:صافي جاذب IC: اتاقك يونش L1:ليزر ثابت معرّف مركز ميدان پرتو L2:ليزر متحرّك تعيين فاصله XRT:لامپ مولّد پرتوهاي ايكس

۷۵ -۱۰۰ cm) و يا بين آنها (در فواصل دورتر) قرار مي‌گيرند.

٣- اندازه‌گيري ضخامت صافي ذاتي لامپ مولّد پرتو ايكس

پرتوهاي ايكس قبل از به كار بردن هرگونه صافي اضافي، به وسيلة مواد متشكّلة لامپ مولّد پرتو، از جمله شيشه و روغن خنك‌كننده، تا حدودي تصفيه مي‌شوند. اندازه‌گيري ضخامت اين صافي، كه "صافي ذاتي" ناميده مي‌شود، براي اطمينان از وضعيت رضايت‌بخش كاركرد لامپ مولّد پرتو ايكس به منظور استفاده از آن در دزيمتري و سنجه‌بندي ضرورت دارد. بر اساس استاندارد ISO-4073-1، ضخامت "صافي ذاتي" لامپ دستگاه مولّد پرتو ايكس مورد استفاده نبايد از معادل ٣/٥ mmAl تجاوز كند. براي تعيين "صافي ذاتي"، توصيه شده است كه كيفيت پرتو ايكس را در ولتاژ ٦٠ kV (بدون بكار بردن صافي اضافي ديگر) اندازه‌گيري كرده سپس با مراجعه به داده‌هاي ارائه شده در استاندارد مذكور، كه ضخامت "صافي ذاتي" را برحسب



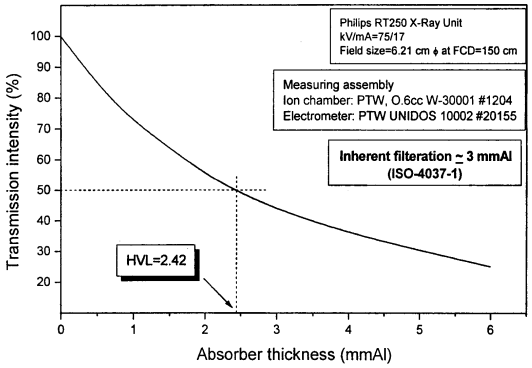
شكل ٢- تغييرات ضخامت صافي ذاتي نسبت به تغييرات HVL باريكة خروجي در ولتاژ ٦٠ kV

تشكيل دهندة آن متغيّر است، ولي در ولتاژهاي بالا هم با توجّه به تغييرات اندك آن در مقايسه با صافي‌هاي اضافي، همان مقدار تعيين شده در kV ٦٠ به كار مي‌رود. چون پايين‌ترين ولتاژ كار مولّد پرتو ايكس Philips RT250، kV ٧٥ است، براي تعيين صافي ذاتي آن، كيفيت پرتو ايكس در اين ولتاژ اندازه‌گيري شده است. در اين اندازه‌گيري، اتاقك يونش نوع W-30001، 0.6 cc، PTW در فاصلة ١٥٠ سانتي‌متري كانون پرتو ايكس بكار رفته و ديافراگم‌هاي D1 و D2 طوري انتخاب شده‌اند كه قطر ميدان در اين فاصله ٦/٢ سانتي‌متر باشد (به طور كلي در اندازه‌گيري‌هاي مربوط به تعيين كيفيت پرتوهاي ايكس، ابعاد ميدان پرتو بايد طوري انتخاب شود كه براي پوشش كامل و يكنواخت آشكارساز كافي باشد). فاصلة مركز "صافي جاذب" تا كانون پرتو ايكس نيز cm ٧٥ بوده است. منحني تغييرات شدّت پرتو عبوري اندازه‌گيري شده بر حسب ضخامت "صافي جاذب" آلومينيومي نشان مي‌دهد كه HVL در ضخامت ٢/٤٢ mmAl اتفاق مي‌افتد (شكل ٣). ضخامت صافي ذاتي متناظر با اين مقدارHVL در ولتاژ kV ٦٠، با استفاده از منحني شكل ٢ معادل با ٣/١٦ mmAl به دست آمده است. بنابراين مي‌توانيم نتيجه بگيريم كه ضخامت صافي ذاتي مولّد پرتو ايكس مورد استفاده كمتر از حدّاكثر مجاز ٣/٥ mmAl مي‌باشد و مي‌توان از آن براي توليد پرتوهاي ايكس مرجع استفاده كرد.

٤- توليد پرتوهاي ايكس مرجع در سطح پرتودرماني

مشخّصات پرتوهاي ايكس مرجع براي سنجه‌بندي مناسب دزيمترها در سطح پرتودرماني، در گزارش فني IAEI TRS # 374 مندرج

،



شكل ۳- طريقة تعيين صافي ذاتي دستگاه مولّد ايكس Philips RT250

در واقع از آزمايشگاه ملّي فيزيك انگليس(NPL) اقتباس‌شده اند، گستره اي بين HVL = ۰/۰۲۴ mmAl تا HVL = ۴ mmCu را دربرمي‌گيرند. اين گسترة كيفيت، با اِعمال ولتاژهايي بين ۸/۵ kV تا ۲۸۰ kV و به كار بردن صافي‌هاي اضافي مناسب ايجاد شده است. نحوة تصفيه پرتوهاي ايكس در هر ولتاژ طوري انجام گرفته است كه نمودار كيفيت پرتوها برحسب تابعي از ولتاژ اِعمال شده، در مقياس لگاريتمي، خط راست باشد. اين روش مناسبترين شيوة انتخاب كيفيت‌هاي مرجع براي سنجه‌بندي دزيمترها، چه در سطح پرتودرماني و چه در سطح حفاظت در برابر پرتوها، شناخته شده است [۴].

با توجّه به اينكه دستگاه مولّد پرتو ايكس Philips RT250 تنها مي‌تواند اين پرتوها را در پنج ولتاژ ثابت بين ۷۵ kV و ۲۵۰ kV توليد كند، سعي شده است، پرتوهاي ايكس در هر ولتاژ طوري تصفيه شوند كه اوّلاً كيفيت پرتوهاي ايجاد شده در گسترة قابل قبول كيفيت پرتوهاي ايكس مرجع در سطح پرتودرماني قرار گيرند، ثانياً نرخ كِرماي هوا در مورد همة آنها در نقطة سنجه‌بندي تقريباً يكسان باشد [۴]. براي اندازه‌گيري كيفيت و نرخ كرماي هوا از اتاقك يونش استاندارد ثانوية NPL o.325cc NE2561 #117 در فاصلة ۱۰۰ سانتي‌متري كانون پرتو ايكس استفاده شده است. قطر ميدان پرتو در اين فاصله، هنگام اندازه‌گيري كيفيت پرتوها حدود ۴/۲ cm و هنگام اندازه‌گيري نرخ كِرماي هوا حدود ۱۱/۷ cm بوده است. نتايج اندازه‌گيريها، شامل اندازه‌گيريهاي مربوط به كيفيت و نرخ كِرماي هوا، تغييرات نرخ كِرماي هوا نسبت به تغييرات جريان لامپ مولّد پرتو ايكس، همچنين مقايسة نمودار كيفيت پرتوهاي توليد شده بر حسب تابعي از ولتاژ با گسترة ارائه شده توسّط IAEA، در جدول ۱ و شكل‌هاي ۴ و ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند.

۵- توليد پرتوهاي ايكس مرجع در سطح حفاظت در برابر پرتوها

پرتوهاي ايكس مرجع تصفيه شده براي سنجه‌بندي دزيمترهاي مورد استفاده در حوزة حفاظت در برابر پرتوها، در چهار سري متمايز از هم در استاندارد ISO-4037-1 در جدول ۲ معرّفي شده‌اند: پرتوهاي سري L داراي باريكترين طيف و كمترين نرخ كِرماي هوا هستند و به شرط سازگار بودن با گسترة

جدول ۱- مشخّصات پرتوهاي ايكس مرجع توليد شده در سطح پرتودرماني

ولتاژ (kV)	شدّت جريان (mA)	صافي اضافي (mm)	كيفيت (HVL بر حسب mm)	ضريب همگني «h» (HVL1/HVL2)	انرژي مؤثّر* (keV)	نرخ كِرماي 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 Cu + ۱ Al ۱ Sn	۳/۵ Cu	۰/۸۷	۱۵۹/۷۶	۵۰/۷۹

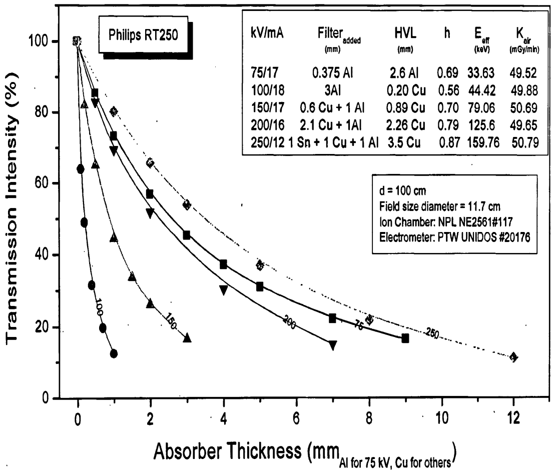
* منظور از انرژي مؤثّر پرتو ايكس ترمزي، انرژي يك باريكة ايكس (فوتون) تك انرژي است كه همان HVL پرتو ايكس ترمزي را داشته باشد. براي برآورد انرژي موثّر باريكه‌هاي ايكس، E_{eff}، ابتدا ضريب تضعيف هر باريكه از رابطة $\mu = 0.693/HVL$ حساب شده، سپس با مراجعه به داده‌هاي موجود [۵]، كه ضرايب تضعيف جرمي فوتون‌ها، يعني «μ/ρ» را در عناصر و مواد مختلف برحسب انرژي فوتون عرضه مي‌دارند، انرژي موثّر برآورد شده است.

**فاصله از کانون پرتو ايکس ١٠٠ cm، قطر ميدان پرتو ١١/٧ cm.

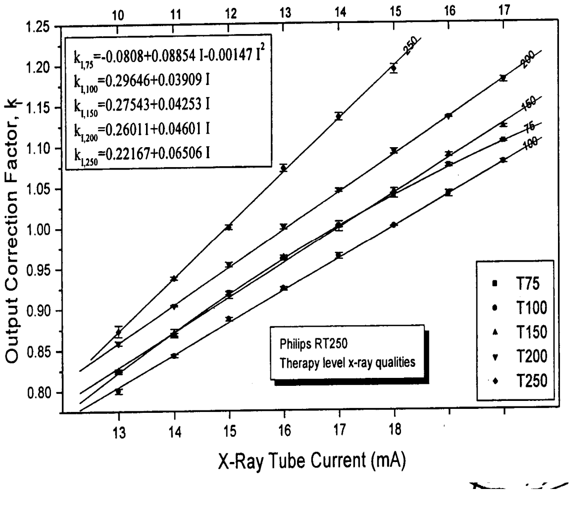
جدول ٢- مشخّصات کلي پرتوهاي پيوستة ايکس مرجع (ISO-4037)

نام سري	گسترة کيفيت HVL (mm)	ضريب همگني (h=HVL1/HVL2)	نرخ کِرماي هوا (Gy/h*)
نرخ پايين کِرماي هوا (L)	٠/٠٥٨ Al - ٥/٢٦ Cu	١/٠	٣×١٠^{-٤}
طيف باريك (N)	٠/٠٤٧ Al - ٦/١٢ Cu	٠/٧٥ - ١/٠	$١٠^{-٣}$ - $١٠^{-٢}$
طيف پهن (W)	٠/١٨ Cu - ٥/٢٠ Cu	٠/٦٧ - ٠/٩٨	$١٠^{-٢}$ - $١٠^{-١}$
نرخ بالاي کِرماي هوا (H)	٠/٠٣٦ Al - ٣/٤ Cu	٠/٦٤ - ٠/٨٦	$١٠^{-١}$ - ٠/٥

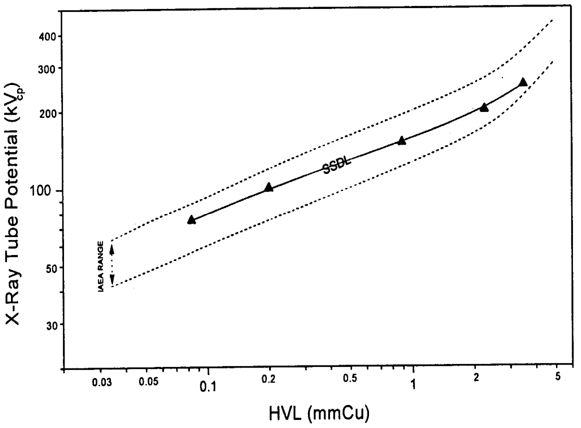
*در فاصلة ١ متري و جريان ١ mA



شکل ٤- نمودار تغييرات شدّت عبور پرتو بر حسب ضخامت صافي جاذب براي تعيين کيفيت باريکه‌هاي ايکس مرجع در سطح پرتودرماني در ولتاژهاي مختلف با صافي‌هاي اضافي معيّن



شکل ٥- تغييرات ضريب‌هاي تصحيح خروجي پرتوهاي ايکس در سطح پرتودرماني بر حسب جريان لامپ. نتايج اندازه‌گيري براي ولتاژهاي ٧٥، ١٠٠، ١٥٠ و ٢٠٠ kV به ترتيب در جريان‌هاي ١٧، ١٨، ١٧ و ١٦ ميلي آمپر (مقياس پايين شکل) و براي kV ٢٥٠ در ١٢ ميلي آمپر (مقياس بالاي شکل) بهنجار شده اند.



شکل ٦- مقايسة کيفيت پرتوهاي ايکس توليد شده در سطح پرتودرماني با گسترة قابل قبول کيفيت پرتوهاي ايکس معرّفي شده توسط (IAEA)

اندازه‌گيري دُزيمتر مورد آزمون، بايد براي تعيين پاسخ آن برحسب انرژي فوتون به کار روند. در مقابل، پرتوهاي سري H، پهن‌ترين طيف و بيشترين نرخ کِرماي هوا را دارند و براي تعيين ويژگيهاي خارج از ظرفيت اندازه‌گيري (گرانباري)(٥) بعضي دزيمترها مناسب هستند.

با توجّه به محدوديت ولتاژهاي موجود دستگاه Philips RT250، تنها بخشي از پرتوهاي سري N، W و H، از ولتاژ ۷۵ kV به بالا، توليد شده و به علّت اختلاف اكثر ولتاژهاي بكار رفته در ISO-4037-1 با ولتاژهاي موجود و در دسترس نبودن صافي‌هاي اضافي مناسب، از توليد سري طيف L صرفنظر شده است. مشخّصات پرتوهاي ايكس توليد شدة سري N، W و H در جدول ۳ درج و در شكل‌هاي ۷، ۱۰ و ۱۳ نشان داده شده‌اند. اندازه‌گيري نرخ كِرماي هوا در مورد پرتوهاي ايكس سري‌هاي N و W در فاصلة ۳ متري از كانون پرتو ايكس و با استفاده از اتاقك يونش كروي نوع 1000cc, LS01 انجام گرفته و قطر ميدان پرتو در اين فاصله تقريباً ۲۴ cm بوده است. در مورد پرتوهاي ايكس سري H، اندازه‌گيري نرخ كِرماي هوا در ولتاژهاي ۷۵ kV و ۱۰۰ kV با استفاده از اتاقك يونش NE2561 NPL, 0.325cc, در فاصلة ۷۵ cm، و در ولتاژهاي ۲۰۰ kV و ۲۵۰ kV با استفاده از اتاقك يونش LS01 در فاصلة ۲۲۵ cm صورت گرفته است براي تخمين E_{eff}، يعني انرژي مؤثّر باريكه‌هاي ايكس، ابتدا ضريب تضعيف هر باريكه با استفاده از رابطة $\mu = 0.693/HVL$ حساب شده، سپس به كمك داده‌هاي موجود [۵]، كه ضرايب تضعيف جرمي فوتون‌ها، (μ/ρ)، را در عناصر و مواد مختلف برحسب انرژي فوتون ارائه مي‌دهند، انرژي مؤثّر برآورد شده است.

براي سنجه‌بندي دُزيمترهاي محيطي و فردي بر حسب واحدهاي عملي معادل دُز $H^*(d)$، $H'(d,\Omega)$، و $H_p(d)$، لازم است كِرماي هوا را تحت شرايط معيّني به معادل دُز تبديل كنيم. براي اين منظور در استاندارد ISO 4073-3، ضريبهاي تبديل كِرماي هوا (Gy) به معادل دُز (Sv) بر حسب انرژي ميانگين طيف پرتوهاي ايكس مرجع عرضه شده‌اند [۶]. با استفاده از روش درونيابي اين داده‌ها، ضريب‌هاي تبديل مذكور براي پرتوهاي ايكس توليد شده، بر حسب انرژي مؤثّر هر باريكه حساب و در جدول ۴ درج شده‌اند. در مورد پرتوهاي ايكس طيف‌هاي N و W، چون درجة همگني آنها بالا است، انرژي‌هاي ميانگين و مؤثّرشان نزديك به هم هستند؛ به همين جهت از انرژي مؤثّر حساب شده براي برآورد ضرايب تبديل كِرما به معادل دُز استفاده شده است. در مورد پرتوهاي ايكس طيف H، انرژي بكار رفته، انرژي مؤثّر متناظر با انرژي ميانگين هر باريكه است.

نمودارهاي تغييرات نسبي “نرخ كِرماي هوا” براي پرتوهاي ايكس توليد شده بر حسب تابعي از جريان لامپ، همچنين مقايسة كيفيت اين پرتوها با كيفيت‌هاي استاندارد ISO-4037-1، برحسب تابعي از ولتاژهاي بكار رفته، در شكل‌هاي ۸، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده‌اند. كاهش نسبي “نرخ كِرماي هوا” در ولتاژهاي ۷۵ kV و ۱۰۰ kV در سري N با افزايش جريان جالب توجّه است (شكل ۸). اين كاهش احتمالاً در نتيجة اُفت كيفيت پرتو بر اثر افزايش جريان در يك ولتاژ ظاهراً ثابت رخ مي‌دهد. به عبارت ديگر، طيف فوتونهاي توليد شده در يك ولتاژ ثابت و صافي اضافي معيّن، هنگام افزايش جريان لامپ به سمت انرژي‌هاي پايين‌تر سوق داده مي شود. در نتيجه تعداد نسبي فوتونهاي جذب شده در صافي اضافي، با افزايش جريان زيادتر شده و سبب مي‌شود كه آهنگ افزايش “نرخ كِرماي هوا” به ازاي افزايش جريان لامپ در ولتاژهاي بالاتر از ۱۰۰ kV، كند شود و در ولتاژهاي ۷۵ kV و ۱۰۰ kV با صافي‌هاي اضافي، به

جدول ۳- مشخّصات پرتوهاي ايكس مرجع توليد شده در سطح حفاظت در برابر پرتوها

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

* اندازه‌گیري نرخ كِرماي هوا در مورد پرتوهاي ايكس سري‌هاي N و W، در فاصلة ۳ متري از كانون پرتو ايكس به وسيلة اتاقك يونش كروي نوعLS01 1000 cc انجام گرفته و قطر ميدان پرتو در اين فاصله تقريباً ۲۴ cm بوده است. در مورد پرتوهاي ايكس سري H، اندازه‌گيري نرخ كرماي هوا در ولتاژهاي ۷۵ kV و ۱۰۰ kV با استفاده از اتاقك يونش NPL, 0.325 cc, NE2561 در فاصلة ۷۵ cm، و در ولتاژهاي ۲۰۰ kV و ۲۵۰ kV با استفاده از اتاقك يونشLS01 در فاصلة ۲۲۵ cm صورت گرفته است.

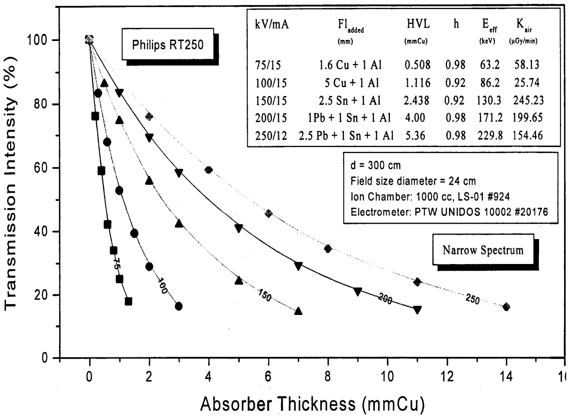
جدول ۴- ضريب‌هاي تبديل كِرماي هوا به واحدهاي معادل دُز محيطي و فردي در شرايط تابش عمودي پرتوهاي ايكس مرجع توليد شده

نام طیف	کیفیت پرتو (HVL در mmCu)	انرژي مؤثّر E_{eff}(keV)	ضريب تبديل كِرماي هوا به معادل دُز، (Sv/Gy)					
			$H'(0.07)/K_a$	$H^*(10)/K_a$	فانتوم تخت* (Slab)		فانتوم ستوني* (Pillar)	فانتوم ميله اي* (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

*فانتوم‌هاي استاندارد مورد استفاده براي سنجه‌بندي دزيمترهاي فردي: ۱) فانتوم تخت (آب)، نمايانگر تمام بدن، به ابعاد ۱۵ cm × ۳۰ cm × ۳۰ cm. ديواره‌هاي فانتوم از جنس پرپكس (PMMA) به ضخامت ۱۰ mm (بجز صفحة جلويي با ضخامت ۲/۵mm).

۲) فانتوم ستوني (آب)، نمايانگر ساعد يا ساق پا، استوانه‌اي به قطر ۷۳mm و به طول ۳۰۰mm. جنس ديواره‌ها PMMA، ضخامت مدور ۲/۵mm، انتها ۱۰ mm .

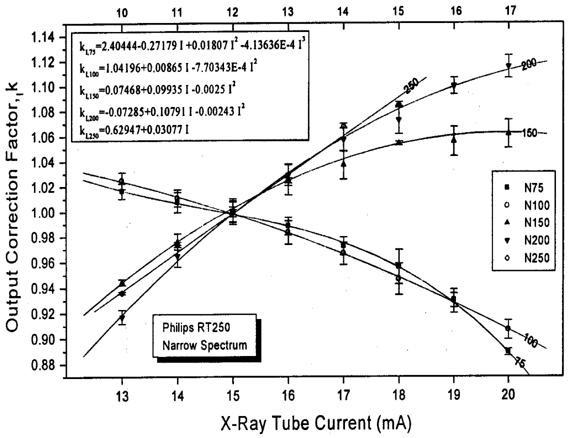
۳) فانتوم ميله‌اي نمايانگر انگشت از جنس PMMA به قطر ۱۹ mm و به طول ۳۰۰ mm .



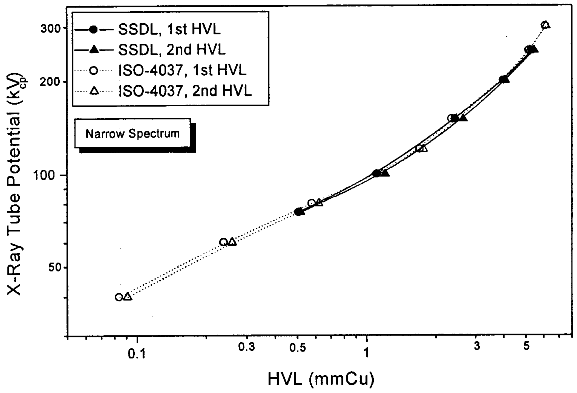
kV/mA	Fl_{added} (mm)	HVL (mmCu)	h	E_{eff} (keV)	K_{air} (µGy/min)
75/15	1.6 Cu + 1 Al	0.508	0.98	63.2	58.13
100/15	5 Cu + 1 Al	1.116	0.92	86.2	25.74
150/15	2.5 Sn + 1 Al	2.438	0.92	130.3	245.23
200/15	1Pb + 1 Sn + 1 Al	4.00	0.98	171.2	199.65
250/12	2.5 Pb + 1 Sn + 1 Al	5.36	0.98	229.8	154.46

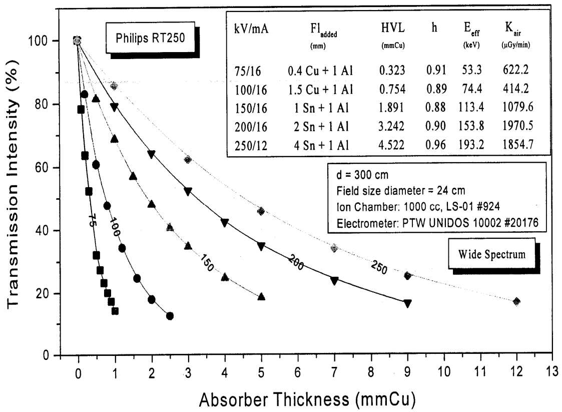
d = 300 cm
Field size diameter = 24 cm
Ion Chamber: 1000 cc, LS-01 #924
Electrometer: PTW UNIDOS 10002 #20176

شکل ۷- نمودار تغييرات نسبي شدّت پرتو بر حسب ضخامت صافي جذبکننده براي تعيين کيفيت باريکه‌هاي پرتو ايکس مرجع داراي طيف باريک (Narrow Spectrum) در ولتاژهاي مختلف با صافي اضافي معيّن



شکل ۸- تغييرات خروجي پرتوهاي ايکس سري طيف باريک (Narrow Spectrum) بخش SSDL بر حسب جريان لامپ. نتايج اندازه‌گيري براي پرتوهاي N75-N200 در جريان ۱۵ mA (مقياس پايين شکل) و براي N250 در جريان ۱۲ mA (مقياس بالاي شکل) بهنجار شده‌اند.

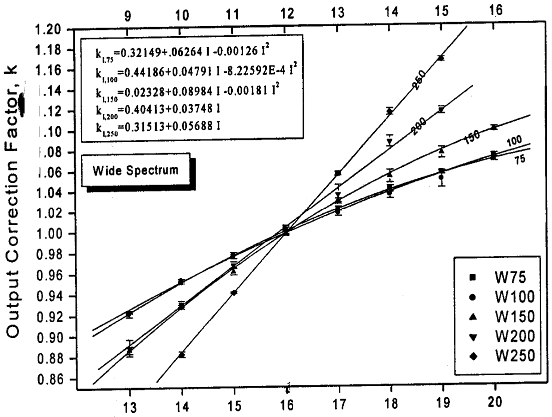




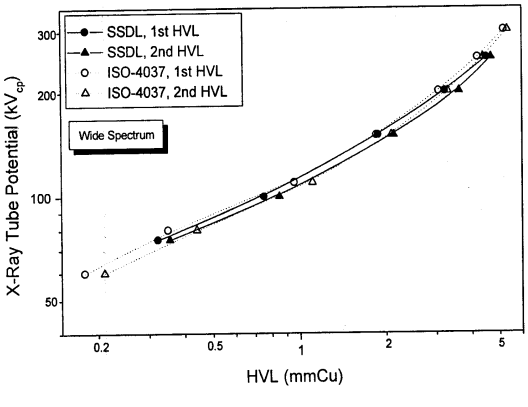
kV/mA	Fl_{added} (mm)	HVL (mmCu)	h	E_{eff} (keV)	K_{air} (µGy/min)
75/16	0.4 Cu + 1 Al	0.323	0.91	53.3	622.2
100/16	1.5 Cu + 1 Al	0.754	0.89	74.4	414.2
150/16	1 Sn + 1 Al	1.891	0.88	113.4	1079.6
200/16	2 Sn + 1 Al	3.242	0.90	153.8	1970.5
250/12	4 Sn + 1 Al	4.522	0.96	193.2	1854.7

d = 300 cm
Field size diameter = 24 cm
Ion Chamber: 1000 cc, LS-01 #924
Electrometer: PTW UNIDOS 10002 #20176

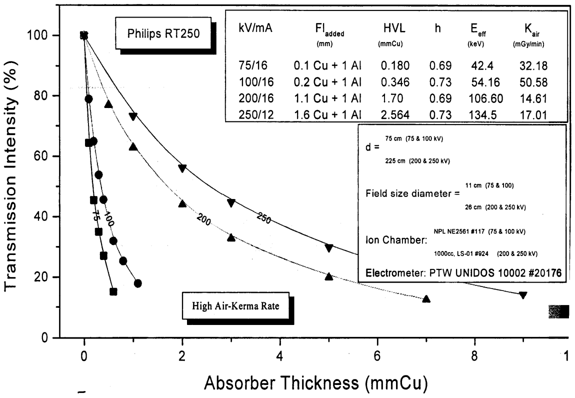
شکل ۱۰- نمودار تغييرات نسبي شدّت عبور پرتو اندازه‌گيري شده برحسب ضخامت صافي جاذب براي باريکه‌هاي پرتو ايکس مرجع طيف پهن (Wide Spectrum) بخش SSDL در ولتاژهاي مختلف با صافي اضافي معيّن.



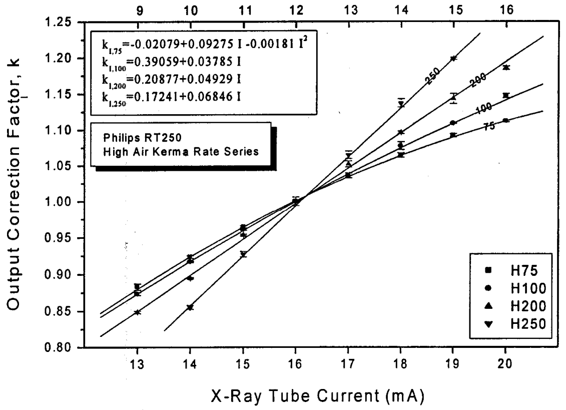
شکل ۱۱- تغييرات خروجي پرتوهاي ايکس دستهٔ طيف پهن(Wide Spectrum) بخش SSDL بر حسب جريان لامپ. نتايج اندازه‌گيري براي پرتوهاي W75 تا W200 در جريان ۱۶ mA (مقياس پايين شکل) و براي W250 در ۱۲ mA (مقياس بالاي شکل) بهنجار شده‌اند.



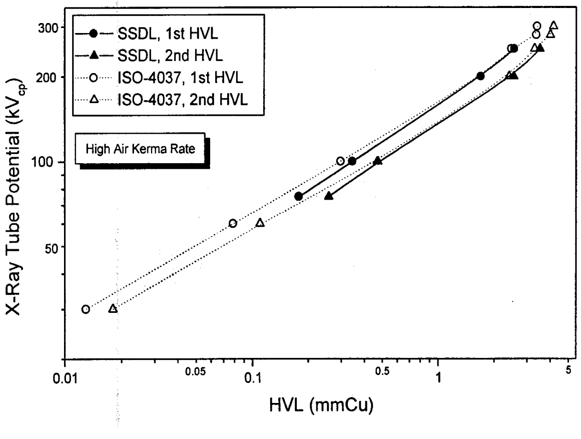
شکل ١٢- مقايسة كيفيت پرتوهاي ايكس توليد شده دسته طيف پهن (Wide Spectrum) بخش SSDL با پرتوهاي معرّفي شده در استاندارد ISO-4037-1..



شکل ١٣- نمودار تغييرات نسبي شدّت عبور پرتو اندازه‌گيري شده بر حسب ضخامت صافي جاذب براي باريكه‌هاي پرتو ايكس مرجع با نرخ كرماي هوا (High Air Kerma Rate Series) بخش SSDL با ولتاژهاي مختلف و صافي اضافي معيّن



شکل ١٤- تغييرات خروجي پرتوهاي ايكس با نرخ بالاي كرماي هوا (High Air Kerma Rate Series) بخش SSDL بر حسب جريان لامپ. نتايج اندازه‌گيري براي پرتوهاي H75 تا H200 در جريان mA ١٦ (مقياس پايين شكل) و براي H250 در mA ١٢ (مقياس بالاي شكل) بهنجار شده اند.



شکل ١٥- مقايسة كيفيت پرتوهاي ايكس توليد شده با نرخ بالاي كِرماي هوا (High Air Kerma Rate Series) بخش SSDL با پرتوهاي معرّفي شده در استاندارد ISO-4037-1..

ترتيب بيشتر از mmCu ١/٢ و mmCu ٤، ابتدا متوقف گرديده سپس حتّي كاهش يابد. اين پديده در دستگاه مولّد پرتو ايكس ديگر از نوع hilips RT250 هم مشاهده شده، ولي در دستگاه مولّد پرتو ايكس از نوع ISOVOLT IV، كه قابليت تغيير پيوستة ولتاژ و جريان دارد، اين اثر بسيار كمتر ديده شده و بي‌اهميّت بوده است.

٦- بررسي خطاها و تأثير پراكندگي پرتو

ارزيابي خطاي كلّي⁽٦⁾ در تعيين "نرخ كِرماي هوا" براساس استاندارد ISO/TAG 4/WG3 صورت گرفته است [٧]. بر اين اساس خطاي كلّي در تعيين "نرخ كِرماي هوا" در مورد باريكه‌هاي پرتو ايكس توليد شده در سطح پرتودرماني در نقطة سنجه‌بندي (cm ١٠٠) و دو باريكة H75 و H100⁽*⁾ (در cm ٧٥)، با در نظر گرفتن خطاي فاكتور سنجه‌بندي اتاقك يونش NPL NE2561 در كيفيت باريكه‌هاي پرتو ايكس مورد نظر (±%١/٢)، خطاي تنظيم مركز اتاقك يونش در نقطة سنجه‌بندي (±١mm)، خطاي تعيين دماي محيط اندازه‌گيري (±١°C)، خطاي تعيين فشار هوا (±١mb)، انحراف معيار مقادير خوانده شده الكترومتر هنگام اندازه‌گيري (±%٠/٥) و همچنين با در نظرگرفتن ضريب پوششي⁽٧⁾ $k = ٢/٥$، در حدود %٣/٥ برآورد شده است. به همين طريق، خطاي كلّي در تعيين نرخ كِرماي هواي باريكه‌هاي پرتو ايكس توليد شده در سطح حفاظت در برابر اشعه (بجز H75 و H100) در نقطة سنجه‌بندي (cm ٣٠٠)، با در نظر گرفتن خطاي فاكتور سنجه‌بندي اتاقك يونش LS 01 در تعيين كيفيت باريكه‌هاي پرتو ايكس مورد نظر

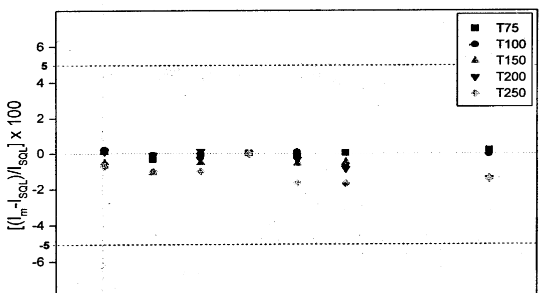
(۱%)، خطاي تنظيم مركز اتاقك يونش در نقطة سنجه‌بندي (±۰/۵ cm)، خطاي تعيين دما و فشار هواي محيط اندازه‌گيري (به ترتيب ±۱°C و ±۱mb)، انحراف معيار مقادير خوانده شدة الكترومتر هنگام اندازه‌گيري (±۱%)، همچنين با در نظر گرفتن ضريب پوششي k=۲/۵، جمعاً حدود ۴% برآورد شده است.

براي ارزيابي سهم پراكندگي پرتو در باريكه‌هاي اصلي پرتوهاي ايكس توليد شده، بنا بر توصية ISO-4037-1، نرخ كِرماي هوا در فواصل مختلف از كانون اين پرتوها واقع بر محور مركزي، در همة باريكه‌هاي مرجع توليد شده، در سطوح پرتودرماني و حفاظت در

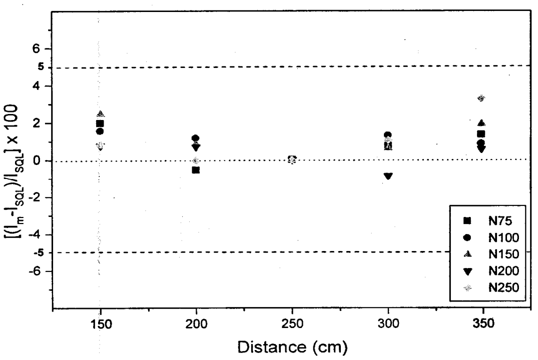
با مقادير حساب شده به نسبت عكس مجذور فاصله از نقاط سنجه‌بندي مقايسه گرديده‌اند. اختلاف نسبي نتايج اندازه‌گيري با مقادير حساب شده در همة موارد از ۵%، (حدّاكثر اختلاف قابل قبول در استاندارد مذكور) همواره كمتر بوده است. شكل‌هاي ۱۶ و ۱۷ نتايج اين اندازه‌گيريها را به ترتيب در مورد پرتوهاي ايكس مرجع در سطح پرتودرماني و پرتوهاي ايكس مرجع طيف باريك(۸) نشان مي‌دهند.

۷- نتيجه گيري

تأمين ميدانهاي مرجع پرتوهاي يونساز از اهمّ ضروريات يك آزمايشگاه دزيمتري استاندارد به شمار مي‌رود. در اين مقاله، نحوة توليد پرتوهاي تصفيه شدة ايكس مرجع، در سطوح پرتودرماني و حفاظت در برابر پرتوها، به وسيلة دستگاه مولّد پرتو ايكس از نوع Philips RT250 و بر اساس استانداردهاي بين‌المللي موجود شرح داده شده است. با توجّه به محدود بودن ولتاژهايي كه در دسترسند، تنها بخشي از پرتوهاي ايكس مرجع



شكل ۱۶- درصد انحراف خروجي اندازه‌گيري شدة پرتوهاي ايكس توليد شده در سطح پرتودرماني در فواصل مختلف (Im) از مقادير خروجي محاسبه شده به نسبت عكس مجذور فاصله (ISQL) از نقطة سنجه‌بندي (۱۰۰ cm).



شكل ۱۷- درصد انحراف خروجي اندازه‌گيري شدة پرتوهاي ايكس توليد شده طيف N در فواصل مختلف (Im) از مقادير محاسبه شده خروجي به نسبت عكس مجذور فاصله (ISQL) از نقطة‌ي سنجه‌بندي، (۲۵۰ cm).

چناچه يك، يا ترجيحاً دو دستگاه مولّد پرتو ايكس (يكي بر ولتاژهاي كمتر از ۱۰۰ kV و ديگ براي ولتاژهاي ۱۰۰ - ۳۰۰kV) با قابليت تغيير پيوستة ولتاژ و جريان، همچنين امكانات طيف‌سنجي و نصب اتاقك يونش ناظر(۹) در مسير پرتو تأمين شوند، مي‌توان به باريكه‌هاي پرتو ايكس به مراتب مطلوبتري از لحاظ گسترة انرژي و انطباق با باريكه‌هاي استاندارد دست يافت.

پي‌نوشتها :

۱ – Kerma
۲ – Bremsstrahlung
۳ – Radiators
۴ – **HVL:** (Half Value Layer)
۵ – Overload
۶ – 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).

---

* منظور از H75 و H100، باريكة طيف H در ج ولتاژ ۷۵ kV و ۵۵ kV است.

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).