

دزیمتری باریکه‌های فوتون و الکترون در پرتودرمانی براساس استانداردهای دز جذبی آب

عبدالرضا سلیمانیان، مصطفی غفوری: بخش دزیمتری استاندارد کرج، سازمان انرژی اتمی ایران

شهرام منادی: بخش پرتودرمانی مرکز پزشکی حضرت سیدالشهدا- اصفهان

چکیده

آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) در آخرین دستورکار بین‌المللی خود در زمینه دزیمتری در پرتودرمانی، مبنای تعیین دز جذبی را از استاندارد کرمای^(۱) هوا به استاندارد دز جذب‌شده در آب (یا دز جذبی آب) تغییر داده است. این تغییر اساسی، که اندکی پس از تصمص مشابه انجمن فیزیک پزشکی آمریکا (AAPM) صورت گرفته، روش‌های ساده و در عین حال دقیقی را برای دزیمتری اکثر باریکه‌های مورد استفاده در پرتودرمانی خارجی فراهم کرده است. در این مقاله دز جذبی آب در باریکه‌های گامای دو دستگاه پرتودرمانی «Co-60» و باریکه‌های الکترون و فوتون دو دستگاه شتابدهنده خطی الکترون در تعدادی از مراکز پرتودرمانی کشور، با استفاده از دزیمترهای استاندارد موجود در بخش دزیمتری استاندارد (SSDL) و براساس روش‌های مبتنی بر کرمای هوا و دز جذبی آب، اندازه‌گیری و نتایج حاصل با توجه به خطاهای اندازه‌گیری در هر یک از این روش‌ها بررسی و با هم مقایسه شده‌اند.

۱- مقدمه

براساس استفاده از اتافک‌های یونش و سنج‌بندی آنها برحسب کمیّت کرمای هوا (K_{air}) و یا کمیّت پرتو دهی^(۳) به وسیله یک باریکه پرتو مرجع (معمولاً پرتو گامای Co-60) بنا نهاده شده است [۲ و ۷]. بین سنج‌بندی اتافک‌های یونش در آزمایشگاه‌های دزیمتری استاندارد و تعیین دز جذبی آب در باریکه‌های فوتون و الکترون دستگاه‌های پرتودرمانی بیمارستانها با استفاده از دستور کارهای پیش‌گفته، در مراحل مختلف با خطاهای ناخواسته و اجتناب‌ناپذیری مواجه هستیم. در زنجیره دزیمتری، که از اندازه‌گیری فاکتور سنج‌بندی اتافک یونش در میدان پرتو گامای Co-60 برحسب کرمای هوا (N_k) یا فاکتور پرتو دهی (N_x) شروع شده و به تعیین دز جذبی آب (D_w) در مراکز پرتودرمانی ختم می‌شود، عوامل متعددی دخالت دارند. به عنوان مثال، در تبدیل فاکتور N_k به فاکتور دز جذبی هوای حفره اتافک، $N_{D,air}$ (یا N_{gas})، یعنی از آغاز دزیمتری باریکه‌های پرتودرمانی خطای

بر طبق آماري که توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی منتشر شده است [۱]، بالغ بر ۲۷۰۰ دستگاه کبالت ۶۰ و ۵۰۰۰ دستگاه شتابدهنده پزشکی که بیشتر آنها را شتابدهنده‌های خطی الکترون تشکیل می‌دهند، کار در درمان میلیونها بیمار سرطانی را با روش پرتودرمانی خارجی^(۲) در ۵۵۰۰ مرکز پرتودرمانی در جهان به عهده دارند. حدود ۸۰ درصد شتابدهنده‌های پزشکی در مراکز پرتودرمانی کشورهای پیشرفته قرار دارند، ولی در کشورهای در حال رشد عمدتاً از دستگاه‌های پرتودرمانی کبالت ۶۰، که نسبت به شتابدهنده‌ها به مراتب ساده‌ترند، استفاده می‌شود. نسبت تعداد این دستگاه‌های پرتودرمانی به جمعیت تحت پوشش در مناطق مختلف دنیا از بیش از ۸ دستگاه برای یک میلیون نفر در امریکای شمالی تا ۱ دستگاه برای بیش از ۱۰ میلیون نفر در آفریقای مرکزی متغیر است. در ایران، با ۲۵ دستگاه کبالت ۶۰ و ۳ دستگاه شتابدهنده خطی در حال کار، این نسبت در حدود ۱ دستگاه برای هر ۲ میلیون نفر است.

با آنکه کمیّت موردنظر در دزیمتری پرتودرمانی دز جذب‌شده آب است، ولی روش دزیمتری در اکثر دستور کارهای دزیمتری ملی، منطقه‌ای و یا بین‌المللی به طور کلی

۱- Kerma

۲- External Radiotherapy

۳- Exposure



نوترون) مورد استفاده‌اند، براساس استانداردهای دُز جذبی آب در اواخر سال ۱۹۹۹ منتشر کرد و خواستار ارزیابی انتقادی روشهای ارائه شده در آن به توسط مسؤولان دُزیمتری مراکز پرتودرمانی و آزمایشگاههای دُزیمتری شد [۱۱]. IAEA در همین رابطه یکی از برنامه‌های جاری تحقیقاتی سازمان یافته خود، یعنی CRP^(۴) را نیز به این موضوع اختصاص داده است.

بخش دُزیمتری استاندارد سازمان انرژی اتمی ایران، به عنوان عضوی از شبکه بین‌المللی آزمایشگاههای دُزیمتری استاندارد ثانویه (IAEA/WHO Network of SSDLs)، کار سنجه‌بندی اتاقکهای یونش مورد استفاده در مراکز پرتودرمانی ایران و دُزیمتری دستگاههای پرتودرمانی در این مراکز را در چارچوب وظایف اساسی خود به کمک اتاقکهای یونش سنجه‌بندی شده در آزمایشگاه دُزیمتری IAEA انجام می‌دهد که خود متکی به استانداردهای BIPM (دفتر بین‌المللی اوزان و مقیاسها) است. در دستورالعمل IAEA-TRS-381، که به نحوه استفاده از اتاقکهای یونش صفحه موازی در دُزیمتری باریکه‌های الکترون پرتودرمانی اختصاص یافته [۷]، علاوه بر روش تعیین دُز جذبی آب در باریکه‌های الکترون براساس کِرمای هوا، نحوه استفاده از فاکتور سنجه‌بندی برحسب دُز جذبی آب نیز مطرح شده است. همین دستورالعمل مبنای سنجه‌بندی اتاقکهای یونش صفحه موازی است که در بخش دُزیمتری استاندارد ساخته شده و در تعیین دُز جذبی آب در باریکه‌های الکترون مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲]. پس از انتشار پیش‌نویس دستورکار جدید IAEA، بر آن شدیم تا دُز جذبی آب در باریکه‌های الکترون و فوتون (گاما و ایکس) چند دستگاه پرتودرمانی را با استفاده از اتاقکهای یونش سنجه‌بندی شده، برحسب دُز جذبی آب تعیین و با روش‌های مبتنی بر سنجه‌بندی برحسب کِرمای هوا مقایسه کنیم. برای این منظور، از دو دستگاه مختلف پرتودرمانی کبالت ۶۰؛ یعنی Picker V9 در بخش دُزیمتری استاندارد و Theratron 1000E در بیمارستان امام خمینی تبریز، و همچنین از دو دستگاه مختلف شتابدهنده خطی الکترون؛ یکی

قابل ملاحظه‌ای از ۱ درصد دست کم (در مورد اتاقکهای یونش استوانه‌ای) تا ۲/۵ درصد (در مورد اتاقکهای یونش صفحه موازی) وجود دارد. برآورد این خطاها در دستور کارهای پیشین IAEA [۶ و ۷] نشان می‌دهد که بیشترین مقدار خطا در سنجه‌بندی باریکه‌های پرتودرمانی ناشی از کثرت کمیتهای فیزیکی و تعدد مراحل دُزیمتری است که در نهایت موجب خطاهای استاندارد (بین ۳ تا ۴ درصد) می‌شود. کوشش‌های بعمل آمده به منظور کاستن منابع ایجاد خطا در روش‌های متکی به کِرمای هوا یا به پرتودهی و رساندن خطای نهایی به حداقل در تعیین مقدار دُز داده شده به بیماران، چندان رضایتبخش نبوده است.

با توجه به مطالب پیش‌گفته و براساس این نظریه که سنجه‌بندی مستقیم اتاقکهای یونش برحسب دُز جذبی آب می‌تواند خطای تعیین دُز جذبی آب را در باریکه‌های پرتودرمانی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد، تلاشهای پیگیری در طول دهه ۱۹۹۰، برای ایجاد استانداردهای اولیه دُز جذبی تغییر مبنای سنجه‌بندی اتاقکهای یونش از کِرمای هوا به دُز جذبی آب، در آزمایشگاههای دُزیمتری استاندارد اولیه (PSDLs) در جریان بوده است. باید توجه داشت که تعیین دُز جذبی آب براساس سنجه‌بندی اتاقکهای یونش برحسب کِرمای هوا مستلزم بکاربردن عواملی است که هر چند بستگی به مشخصات فیزیکی اتاقکهای یونش دارند ولی تفاوت‌های موجود در هر یک از اتاقکهای یونش از نوع خاص را در برنمی‌گیرند. برعکس، سنجه‌بندی برحسب دُز جذبی آب را می‌توان در شرایط اندازه‌گیری مشابه در مراکز پرتودرمانی انجام داده و پاسخ منحصر به فرد هر اتاقک یونش را به حساب آورد.

در پی تلاش‌های بعمل آمده، چند دستور کار ملی دُزیمتری برای باریکه‌های فوتون و الکترون پرتودرمانی براساس استانداردهای دُز جذبی آب در انگلستان و آلمان و اخیراً در امریکا تدوین و به مورد اجرا گذاشته شده است [۸، ۹، ۱۰]. آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) نیز در پی تلاش چند ساله گروهی از متخصصان، پیش‌نویس دستور کار جامعی را برای دُزیمتری باریکه‌های یونساز که در پرتودرمانی خارجی (بجز

۴ - به اختصارات، پایان مقاله مراجعه شود.



توافق مطلوبی را در حد خطای نسبی ارائه شده در هر یک از آزمایشگاههای دُزیمتری استاندارد اولیه (PSDLs) نشان می‌دهد [۱۴]. از میان ۸ آزمایشگاه شرکت کننده در دُزیمتری مقایسه‌ای، در ۵ آزمایشگاه به وسیله گرماسنج گرافیت، در ۲ آزمایشگاه با استفاده از گرماسنج آب و در یک آزمایشگاه با دُزیمتری شیمیایی دُز جذبی آب را تعیین کرده‌اند. اختلاف بین دُز جذبی متوسط اندازه‌گیری شده در هر یک از آزمایشگاههای دُزیمتری استاندارد اولیه و اندازه‌گیری در BIPM با روش گرماسنجی، حداکثر ۰/۴٪ و با روش دُزیمتری شیمیایی ۰/۷٪ بوده است. در مورد پرتوگامای Co-60، استانداردهای اولیه کِرَمای هوا در مقایسه با استانداردهای اولیه دُز جذبی آب از قدمت بیشتری برخوردار بوده و انحراف معیار مشابهی را نشان می‌دهند. باید توجه داشت که استانداردهای اولیه کِرَمای هوا در تمام آزمایشگاههای دُزیمتری استاندارد اولیه متکی به اندازه‌گیری با اتاقکهای یونش با دیواره گرافیتی بوده و تمام فاکتورهای تبدیل و تصحیح بکار رفته در آنها کاملاً به هم مرتبطند، در صورتی که استانداردهای اولیه دُز جذبی آب متکی به روشهای مختلف اندازه‌گیری هستند و خطاهای اندازه‌گیری آنها یا مستقل از یکدیگرند و یا ارتباط ضعیفی با هم دارند، از این رو نسبت به استانداردهای اولیه کِرَمای هوا بر پایه مطمئن‌تری استوارند.

در مورد اتاقکهای یونش بخش دُزیمتری استاندارد در سطح پرتودرمانی که به توسط IAEA عرضه شده‌اند، خطای نسبی فاکتورهای سنج‌بندی دُز جذبی آب بین ۰/۶ ± تا ۱ ± درصد و در مورد کِرَمای هوا بین ۰/۴ ± تا ۰/۶ ± درصد برآورد شده است. نتیجه دُزیمتری مقایسه‌ای سال ۲۰۰۰ (که همه ساله توسط IAEA درباره آزمایشگاههای دُزیمتری عضو شبکه بین‌المللی IAEA/WHO Network of SSDLs در چارچوب برنامه IAEA TLD Postal Dose Intercomparison به اجرا در می‌آید) در مورد «بخش دُزیمتری استاندارد» تنها ۰/۳ - درصد اختلاف نسبت به ارزیابی IAEA نشان داده است.

CGR Saturn 20 در بیمارستان سیدالشهدای اصفهان و دیگری Neptun 10PC در بیمارستان شقای کرمان استفاده کرده‌ایم. اندازه‌گیریها با استفاده از الکترومتر نوع PTW UNIDOS به همراه اتاقکهای یونش استوانه‌ای نوع 0.6 cc NE 2571 و 0.6 cc PTW W-30001 و اتاقک یونش صفحه موازی نوع 0.3 cc PTW W-34001 انجام گرفته‌اند. اتاقکهای یونش استوانه‌ای دارای گواهینامه سنج‌بندی از IAEA برحسب کِرَمای هوا و دُز جذبی آب در انرژی پرتوگامای Co-60 هستند. نتایج بررسی‌ها، که به دنبال خواهد آمد، امتیاز نسبی روش دُزیمتری براساس استاندارد دُز جذبی آب را در مقایسه با روش دُزیمتری براساس کِرَمای هوا، به لحاظ سادگی کاربرد و همچنین بهبود نسبی دقت دُزیمتری نشان می‌دهند.

۲- استانداردهای اولیه و سنج‌بندی اتاقکهای یونش برحسب دُز جذبی آب

بنابر مطالب پیش‌گفته، سنج‌بندی اتاقکهای یونش استوانه‌ای «بخش دُزیمتری استاندارد» که برحسب دُز جذبی آب در مقایسه با اتاقک یونش استاندارد ثانویه آزمایشگاه دُزیمتری IAEA انجام گرفته، در نهایت متکی به استاندارد اندازه‌گیری دُز جذبی آب در BIPM است. در حال حاضر سه روش اساسی تعیین دُز جذبی آب از راه گرماسنجی (کالوریمتری)، دُزیمتری شیمیایی و دُزیمتری با اتاقک یونش استاندارد، به لحاظ برخورداری از دقت کافی، می‌توانند مبنای استانداردهای اولیه این اندازه‌گیری به شمار روند.

در BIPM برای اندازه‌گیری دُز جذبی آب از اتاقک یونش استاندارد اولیه استفاده می‌شود. این اتاقک دارای دیواره گرافیتی بوده و حجم حفره هوای آن کاملاً معلوم است. طرح اتاقک به گونه‌ای است که تا حد امکان مشخصات موردنظر آشکارساز براگ-گری را تامین می‌کند. اتاقک را در یک فانتوم آب قرار داده و دُز جذبی را در نقطه مرجع، به وسیله انرژی متوسط جذب شده در هوای حفره اتاقک بدست می‌آورند [۱۳].

مقایسه «استانداردهای اولیه» دُز جذبی آب در میدان پرتوگامای Co-60، که طی دهه گذشته در BIPM به عمل آمده است،



می‌گردد. کیفیت باریکه را با توجه به نوع و انرژی آن، با کمیی که بیانگر قدرت نفوذ باریکه در ماده است مشخص می‌کنند. مثلاً در مورد باریکه پرتو گامای ^{60}Co ، با توجه به معلوم بودن انرژی فوتون‌های گسیل شده، کیفیت باریکه کاملاً مشخص است و حتی ذکر نام آن برای تبیین کیفیت پرتو، در موارد حرفه‌ای، کفایت می‌کند. کیفیت پرتوهای ایکس پرانرژی را با قدرت نفوذ باریکه در آب، مثلاً نسبت دُز در عمق ۲۰ cm به دُز در عمق ۱۰ cm آب (TPR_{20.10}) مشخص می‌کنند. همچنین کیفیت باریکه‌های الکترون را می‌توان با تعیین برد آنها در آب مشخص کرد. بطور کلی منظور از شرایط مرجع، شرایطی است که در آنها فاکتور سنج‌بندی بدون نیاز به استفاده از ضریب تصحیح دیگر معتبر است. به عنوان مثال شرایط عمده سنج‌بندی برحسب دُز جذبی آب عبارتند از تنظیم کمیتهای هندسی مانند فاصله، عمق، اندازه میدان تابش و همچنین جنس و ابعاد فانتوم تحت تابش و دما و فشار و رطوبت محیط اندازه‌گیری.

۳- تعیین دُز جذبی آب در باریکه‌های فوتون (ایکس و گاما) و الکترون

۳-۱- ملاحظات نظری

دُز جذبی آب در باریکه پرتو مرجعی با کیفیت Q_0 در عمق مرجع، یعنی عمق Z_{ref} در یک فانتوم دزیمتری که در آن دُز جذبی سنج‌بندی می‌شود، با استفاده از اتاقک یونش سنج‌بندی شده، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_{W,Q_0} = M_{Q_0} N_{D,W,Q_0} \quad (1)$$

که در آن، M_{Q_0} مقدار خوانده شده به وسیله دزیمتر در شرایط مرجع مورد استفاده در آزمایشگاه استاندارد و N_{D,W,Q_0} فاکتور سنج‌بندی دزیمتر برحسب دُز جذبی آب است که توسط آزمایشگاه استاندارد تعیین می‌شود. تعیین این فاکتور به گونه‌ای است که اثر حضور اتاقک یونش در محیط اندازه‌گیری حذف



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Dosimetry and Medical Radiation Physics Section - Division of Human Health
Wagramer Strasse 5, P.O. Box 100, A-1400 VIENNA, AUSTRIA
Facsimile: +43 1 26007-21662, Telephone: +43 1 26007-21662, e-mail: DOSIMETRY@IAEA.ORG

IAEA/WHO TLD POSTAL DOSE QUALITY AUDIT

Institution: *SSDL of Atomic Energy Organization of Iran*
Address: *Kuraj*
P.O. Box 31585-4395
Country: *IRAN (ISLAMIC REP.)*

TLD batch No: *DL00-1*
TLDs irradiated by: *A Sulimani, K Arbabi*
Date of irradiation: *28-May-00*
Evaluation: *15-Jun-00*

RESULTS OF TLD MEASUREMENTS FOR Co-60 AND HIGH-ENERGY PHOTONS

| Beam | Radiation unit | TLD set # | User stated dose [Gy] | IAEA (measured) dose [Gy]* | IAEA mean dose [Gy] | % deviation relative** to IAEA mean dose | IAEA mean dose / User stated dose |
|-------|----------------|-----------|-----------------------|----------------------------|---------------------|--|-----------------------------------|
| Co-60 | Picker V9 | DL 0018 | 2.00 | 2.00 | 2.01 | -0.3 | 1.00 |
| | | | 2.00 | 2.02 | | | |
| | | | 2.00 | 2.01 | | | |

* The uncertainty in the TLD measurement of the dose is 1.8% (1 standard deviation); this does not include the uncertainty intrinsic to the dosimetry protocol (see IAEA TRS-277).
** % deviation relative to IAEA measured dose = 100 x (User stated dose - IAEA mean measured dose) / IAEA mean measured dose. A relative deviation with negative (positive) sign indicates that the user estimates lower (higher) dose than what is measured.

Agreement within ±3.5% between the user stated dose and the IAEA measured dose is considered satisfactory.

Mede
Dr. J. Izewska
TLD Officer - DMRP Section

Date: *11 July 2000*

A. P. Rullo
Prof. P. Andreo
Head - DMRP Section

IMPORTANT NOTICE: This information is provided only as an independent verification of beam output and not as a machine calibration, nor as an alternative to frequent calibrations by a qualified physicist.



شده در دستور کارهای پیش‌گفته IAEA قابل دستیابی است

$$(N_{D,air} = N_K (1-g) k_{at} k_m k_{cel}).$$

Sw_{air} نسبت توان متوقف سازی آب به هوا (برای شاریدگی الکترون تولید شده در فانتوم) است که مقادیر آن با توجه به نوع و کیفیت پرتو در دستور کار عرضه شده است. P_Q فاکتور کلی تصحیح اختلال ناشی از حضور اتاقک یونش در محیط اندازه‌گیری است. این فاکتور خود حاصل ضرب چهار فاکتور جزئی P_{cav}، P_{wall}، P_{ceet} و P_{dis} است که به ترتیب ضریب‌های تصحیح مربوط به حفره، دیواره، الکتروود مرکزی اتاقک و همچنین جابجایی نقطه مؤثر اندازه‌گیری اتاقک (P_{eff}) نسبت به مرکز آن را در برمی‌گیرند.

حاصل ضرب M_QN_{D,air} در معادله ۴ در واقع دز جذبی هوای اتاقک یونش است:

$$D_{air} = M_Q \cdot N_{D,air} \quad (5)$$

با فرض معلوم بودن حجم حفره اتاقک، یعنی V، می‌توان نوشت:

$$D_{air} = \frac{M_Q}{\rho_{air} V} \cdot \left(\frac{W_{air}}{e} \right) \quad (6)$$

ρ_{air} چگالی هوا و W_{air}/e انرژی لازم برای تولید جفت یون در هوا است. از ترکیب دو رابطه ۴ و ۶ چنین نتیجه می‌شود:

$$D_{W,Q} = \frac{M_Q}{\rho_{air} V} \cdot \left(\frac{W_{air}}{e} \right)_Q \cdot (s_{W,air})_Q \cdot P_Q \quad (7)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۷) و تعریف K_{Q,Q₀} در رابطه (۳)، در نهایت رابطه زیر را برای فاکتور تصحیح کیفیت خواهیم داشت:

$$k_{Q,Q_0} = \frac{(s_{W,air})_Q}{(s_{W,air})_{Q_0}} \cdot \frac{(W_{air})_Q}{(W_{air})_{Q_0}} \cdot \frac{P_Q}{P_{Q_0}} \quad (8)$$

مقدار W_{air} در انرژی‌های مختلف باریکه‌های فوتون و الکترون، که موضوع این مقاله است، بنا به فرض و با دقت نسبتاً زیاد ثابت است. بنابراین:

$$k_{Q,Q_0} \approx \frac{(s_{W,air})_Q}{(s_{W,air})_{Q_0}} \cdot \frac{P_Q}{P_{Q_0}} \quad (9)$$

دز جذبی آب در باریکه پرتوی با کیفیت Q، که با کیفیت Q₀ باریکه پرتو مرجع مورد استفاده برای سنج‌بندی دزیمتر متفاوت است، چنین بدست می‌آید:

$$D_{W,Q} = M_Q N_{D,W,Q_0} K_{Q,Q_0} \quad (2)$$

K_{Q,Q₀} فاکتور تصحیحی است که به علت تفاوت بین Q₀ (کیفیت باریکه پرتو مرجع) و Q (کیفیت باریکه پرتو مورد سنجش) بکار می‌رود. M_Q مقدار خوانده شده به وسیله دزیمتر است که تصحیحات لازم نسبت به شرایط مرجع درباره آن اعمال شده باشد.

فاکتور تصحیح کیفیت باریکه، یعنی K_{Q,Q₀} را می‌توان به صورت نسبت بین فاکتورهای سنج‌بندی اتاقک یونش برحسب دز جذبی آب در دو کیفیت Q و Q₀ تعریف کرد:

$$K_{Q,Q_0} = \frac{N_{D,W,Q}}{N_{D,W,Q_0}} = \frac{D_{W,Q}/M_Q}{D_{W,Q_0}/M_{Q_0}} \quad (3)$$

متداول‌ترین باریکه مرجع مورد استفاده برای سنج‌بندی اتاقک‌های یونش، پرتو گامای Co-60 است. در این صورت فاکتور تصحیح کیفیت را فقط با K_Q نمایش می‌دهند. در برخی از آزمایشگاه‌های PSDL، باریکه‌های فوتون و الکترون پراثری را بطور مستقیم برای سنج‌بندی بکار می‌برند و در این موارد از فاکتور K_{Q,Q₀} استفاده می‌شود.

در مورد باریکه‌های واقعی پرتو درمائی، در صورت عدم دسترسی به داده‌های تجربی و یا وجود دشواری در اندازه‌گیری مستقیم آنها می‌توان فاکتورهای تصحیح کیفیت را اغلب بطور تقریبی تعیین کرد. طبق دستور کارهای دزیمتری IAEA TRS 277&381 و براساس نظریه براگ-گری دز جذبی آب در باریکه‌ای با کیفیت Q در نقطه‌ای از یک فانتوم که مرکز اتاقک یونش در آن قرار گرفته باشد از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$D_{W,Q} = M_Q \cdot N_{D,air} \cdot (s_{W,air})_Q \cdot P_Q \quad (4)$$

N_{D,air} فاکتور دز جذبی هوای اتاقک یونش است که با استفاده از فاکتور سنج‌بندی اتاقک برحسب کرمای هوا و داده‌های ارائه



در پیش‌نویس دستور کار جدید IAEA، فاکتورهای تصحیح کیفیت اکثر اتاقک‌های یونش مورد استفاده در مراکز پرتودرمانی جهان برای انواع باریکه‌های مختلف فوتون، پروتون و یونهای سنگین تر عرضه شده است.

۳-۲- تعیین دز جذبی آب در باریکه پرتوگامای Co-60

دز جذبی در باریکه‌های پرتوگامای Co-60 دو دستگاه پرتودرمانی را با استفاده از استانداردهای موجود اندازه‌گیری کرمای هوا و دز جذبی آب در بخش دزیمتری استاندارد تعیین و ضمن مقایسه نتایج، خطای کلی دز جذبی را در هر یک از روشها برآورد کرده‌ایم. دستگاههای کبالت مورد استفاده عبارتند از: Picker V9 در بخش دزیمتری استاندارد که برای سنج‌بندی اتاقکهای یونش و امور تحقیقاتی دزیمتری از آن استفاده می‌شود و Theratron 1000E که در خرداد ۱۳۷۹ در بخش پرتودرمانی بیمارستان امام خمینی تبریز نصب شده است.

$$D_w(d, a \times b) = 1/0.81 K_{air} (SSD + 0.5 \text{ cm}, a \times b) \cdot \frac{PSF(a \times b) \cdot PDD(d, a \times b, SSD)}{100}$$

اندازه‌گیریها در یک فانتوم آب در شرایطی انجام گرفته که فاصله سطح فانتوم تا مرکز اتاقک یونش $d_w = 5 \text{ cm}$ ، ابعاد میدان پرتو در سطح فانتوم $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ و فاصله منبع پرتو (از سطح فانتوم) SSD ، در دستگاه پیکر 80 cm و در دستگاه تراترون 100 cm بوده است. خروجی دستگاهها در هوا نیز برحسب نرخ کرمای هوا در فاصله‌های متداول آنها

۱- داده‌های مورد نیاز برای تعیین دز جذبی در باریکه‌های پرتوگامای دو دستگاه پرتودرمانی کبالت - ۶۰ با روش‌های مختلف

| Theratron 1000 E | Picker V9 | Co-60 پرتودرمانی |
|--|---|--|
| 0.6cc.PTW W-30001#851 | 0.6cc.NE2571#2695 | اتاقک یونش مورد استفاده |
| $51/87 \pm \%1/00$ | $45/1 \pm \%0/77$ | $N_{D,W,Co} (\text{mGy/nC})$ |
| $47/4 \pm \%0/60$ | $41/1 \pm \%0/49$ | $N_K (\text{mGy/nC})$ |
| $41/21 \pm \%1/2$ | $40/1 \pm \%1/1$ | $N_{D,air} (\text{mGy/nC}) = N_K (1-g) k_{air} k_m k_{cel}$ |
| $\%0/5$ | $\%0/5$ | خطای پایداری دراز مدت دزیمتر |
| $\%0/5$ | $\%0/5$ | خطای تامین شرایط مرجع اندازه‌گیری |
| در آب: $19/47 \pm \%0/4$ در هوا: $22/45 \pm \%0/4$ | در آب: $14/65 \pm \%0/4$ در هوا: $18/16 \pm \%0/4$ | مقدار خوانده شده دزیمتر (nC/min) |
| $1/123 \pm \%0/5$ | $1/123 \pm \%0/5$ | S_w,air |
| $0/984 \pm \%0/9$ | $0/967 \pm \%0/9$ | فاکتور تصحیح اختلال $P_Q = P_{wall} P_{cav} P_{cel} P_{dis}$ |
| $1/054 \pm \%1$ | $1/054 \pm \%1$ | ضریب اوج پراکندگی $PSF(10 \times 10)$ |
| $80/4 \pm \%1$ | $\%78/8 \pm \%1$ | درصد دز عمقی در $PDD, d_w = 5 \text{ cm}$ |
| $101/05 \pm \%1/2$ $100/32 \pm \%1/6$ $100/08 \pm \%1/7$ (میانگین: $100/48 \pm \%0/5$) | $66/08 \pm \%1$ $65/64 \pm \%1/5$ $66/20 \pm \%1/7$ (میانگین: $65/97 \pm \%0/45$) | $N_{D,W}$ (رابطه ۱) $N_{D,air}$ (رابطه ۴) N_K (رابطه ۱۰) |
| | | نرخ دز جذبی براساس: (cGy/min) |



جدول ۲- مقایسه فاکتورهای سنج‌بندی اتاقکهای یونش استوانه‌ای برحسب دُز جذبی آب از راه محاسبه و از راه سنج‌بندی مستقیم در IAEA

| اتاقک یونش | $N_{D,W} = N_{D,air} S_{W,air} P_Q$ | $N_{D,W} (IAEA)$ (mGy/nC) |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 0.6cc, NE2571#2695 | $44/80 \pm \% 1/4$ | $45/1 \pm \% 0/7$ |
| 0.3cc, NPL, NE2561#117 | $101/38 \pm \% 1/1$ | $101/8 \pm \% 1/1$ |
| 0.6cc, PTW, W-30001#851 | $51/52 \pm \% 1/4$ | $51/87 \pm \% 1$ |
| 0.6cc, NE2505/3A#2186 | $44/22 \pm \% 1/4$ | $44/5 \pm \% 1$ |

این فاصله $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ باشد. این نسبت را با «TPR_{20,10}» نمایش می‌دهند. شاخص دیگر درصد دُز در عمق 10 سانتی‌متری فانتوم آب (D₁₀) و شاخص سوم عمقی است که در آن دُز به میزان 80% باشد (d₈₀). در دستور کارهای قدیم و جدید IAEA، نسبت TPR_{20,10} به عنوان شاخص کیفیت باریکه‌های فوتون پرنرژری برگزیده شده است. ما نیز همین شاخص را ملاک کار قرار داده‌ایم، با این تفاوت که اندازه‌گیریها را در شرایطی انجام داده‌ایم که فاصله منیع پرتو تا سطح فانتوم آب ثابت (SSD = 100 cm) و ابعاد میدان پرتو در سطح فانتوم $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ بوده است. سپس منحنی‌های درصد دُز عمقی را رسم کرده و به وسیله آنها نسبت درصد دُز در عمق 20 cm به درصد دُز در عمق 10 cm ، یعنی PDD_{20,10} را تعیین کرده‌ایم. برای این اندازه‌گیریها از دستگاه آنالیز میدان «Scanditronix RFA-300 plus» استفاده شده است. سپس شاخص‌های TPR_{20,10} باریکه‌های فوتون 9 و 12 و 18 مگاولت را با استفاده از رابطه تجربی (۱۱)، که از داده‌های تجربی 700 شتابدهنده استخراج شده است، حساب کرده‌ایم:

$$TPR_{20,10} = 1.2661 PDD_{20,10} - 0.0595 \quad (11)$$

شکل ۱ نمودارهای درصد دُز عمقی باریکه‌های فوتون را به همراه نسبت‌های D_{20}/D_{10} و TPR_{20,10} و بیشینه عمق دُز (یعنی R₁₀₀) نشان می‌دهد. با در دست داشتن کیفیت باریکه‌های فوتون می‌توانیم پارامترهای لازم را برای تعیین دُز جذبی آب تعیین کنیم (جدول ۳). همه اندازه‌گیریها در شرایط: SSD = 100 cm ، ابعاد میدان در سطح فانتوم $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ و F.S. = 100 cm و عمق آب $d_w = 10 \text{ cm}$ انجام گرفته‌اند.

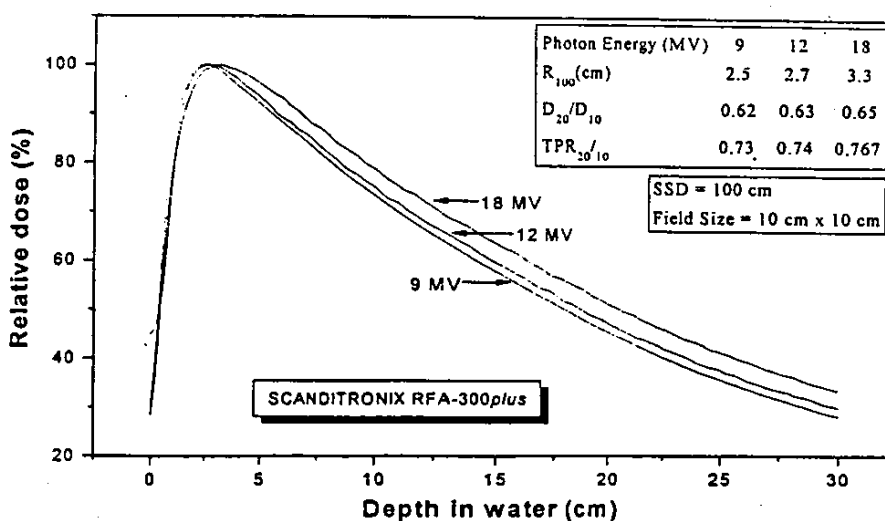
برای مقایسه روشهای دُزیمتری براساس $N_{D,W}$ یا $N_{D,air}$ در میدان پرتو گامای Co-60 که باریکه مرجع است، در واقع عملاً نیازی به اندازه‌گیری نبوده است؛ از مقایسه روابط 1 و 4 می‌توان نتیجه گرفت که فاکتور سنج‌بندی اتاقکهای یونش برحسب دُز جذبی آب با استفاده از رابطه $N_{D,W} = N_{D,air} S_{W,air} P_Q$ قابل محاسبه است. جدول ۲، مقایسه مقادیر حساب شده فاکتورهای سنج‌بندی چند اتاقک یونش (موجود در بخش دُزیمتری استاندارد) برحسب دُز جذبی آب را با فاکتورهای سنج‌بندی همین اتاقکها که توسط آزمایشگاه دُزیمتری IAEA تعیین شده‌اند نشان می‌دهد.

از این داده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که دُز جذبی آب در باریکه پرتو گامای Co-60، با استفاده از $N_{D,air}$ با خطایی در حدود $1/5\%$ و با استفاده از $N_{D,W}$ (سنج‌بندی مستقیم) با خطایی در حدود 1% قابل تعیین است.

۳-۳- تعیین دُز جذبی آب در باریکه‌های فوتون پرنرژری

دُز جذبی آب در باریکه‌های فوتون ایجاد شده در شتابدهنده Saturn 20 در بیمارستان سیدالشهدای اصفهان و در شتابدهنده Neptun 10PC بیمارستان شفا کرمان را با دو روش استفاده از $N_{D,W}$ و $N_{D,air}$ تعیین کرده‌ایم. Saturn 20 باریکه‌های تپشی - روشی (pulsed-scanned) فوتون با ولتاژ اسمی 12 و 18 مگاولت (MV) و Neptun 10PC فقط یک باریکه تپشی فوتون با ولتاژ اسمی 9 MV تولید می‌کند.

برای اندازه‌گیری دُز جذبی، ابتدا کیفیت باریکه‌های فوتون را تعیین کرده‌ایم. برای بیان کیفیت باریکه‌های فوتون، سه شاخص معرفی شده است: یکی نسبت دُز در عمق 20 cm به دُز در عمق 10 cm آب است به شرطی که در اندازه‌گیری آن فاصله منیع پرتو تا مرکز آشکارساز ثابت بوده (100 cm) و میدان پرتو در



شکل ۱- نمودارهای درصد توزیع دُز باریکه‌های فوتون حاصل از شتابدهنده‌های Saturn 20 و Neptun 10PC در عمق فانتوم آب در طول محور مرکزی باریکه‌های پرتو

جدول ۳- داده‌های مورد نیاز برای تعیین دُز جذبی در باریکه‌های فوتون ۹ و ۱۲ و ۱۸ مگا‌ولت

| ۱۸ | ۱۲ | ۹ | ولتاژ اسمی باریکه فوتون (MV) |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---|
| NE2505/3A#2186 | PTW, W-30001#851 | NE2505/3A#2186 | اتاناک بونش مورد استفاده |
| $40/10 \pm 1/2$ | $41/21 \pm 1/2$ | $40/10 \pm 1/2$ | $N_{D,air}(mGy/nC) = N_k(1-g)k_{att}k_{m}k_{cel}$ |
| $44/5 \pm 1$ | $51/87 \pm 1$ | $44/5 \pm 1$ | $N_{D,W,Co}(mGy/nC)$ |
| $0/767$ | $0/740$ | $0/728$ | شاخص کیفیت باریکه، $TPR_{20,10}$ |
| $1/096 \pm 0/5$ $0/3$ | $1/104 \pm 0/5$ $0/3$ | $1/108 \pm 0/5$ $0/3$ | SW_{air} (نظری) درصد خطا در انتخاب SW_{air} |
| $0/9884 \pm 0/7$ | $0/993 \pm 0/7$ | $0/9856 \pm 0/7$ | فاکتور تصحیح اختلاف $P_Q = P_{wall}P_{cav}P_{cel}P_{dis}$ |
| $0/979 \pm 1$ | $0/981 \pm 1$ | $0/9875 \pm 1$ | فاکتور تصحیح کیفیت K_Q |

با استفاده از داده‌های جدول ۳ و روابط ۲ و ۴ می‌توانیم دُز جذبی را در شرایط پیش‌گفته براساس استاندارد کیرمای هوا (استفاده از $N_{D,air}$) و استاندارد دُز جذبی آب (استفاده از $N_{D,W,Co}$) حساب و با هم مقایسه کنیم (جدول ۴).

با استفاده از داده‌های جدول ۳ و روابط ۲ و ۴ می‌توانیم دُز جذبی را در شرایط پیش‌گفته براساس استاندارد کیرمای هوا (استفاده از $N_{D,air}$) و استاندارد دُز جذبی آب (استفاده از $N_{D,W,Co}$) حساب و با هم مقایسه کنیم (جدول ۴).

جدول ۴- تعیین دُز جذبی آب در باریکه‌های فوتون با استفاده از $N_{D,W}$ و $N_{D,air}$

| ۱۸ | ۱۲ | ۹ | ولتاژ اسمی باریکه (مگا‌ولت) |
|-----------------|-----------------|-----------------|--|
| $43/43 \pm 1/5$ | $50/66 \pm 1/5$ | $43/78 \pm 1/5$ | $D_{W,Q}/M = N_{D,air}SW_{air}P_Q$ (mGy/nC) |
| $43/56 \pm 1/4$ | $50/88 \pm 1/4$ | $43/94 \pm 1/4$ | $D_{W,Q}/M = N_{D,W,Co}K_Q$ (mGy/nC) |



دستورکار پیشین «IAEA-TRS277» دقت قابل دسترسی در دُزیمتری باریکه‌های فوتون پرنرزی در مجموع ۳/۲٪ برآورد شده است که تقریباً دو برابر خطایی است که در این تجزیه و تحلیل برآورد کرده‌ایم.

نتیجه دُزیمتری مقایسه‌ای بخش دُزیمتری استاندارد در برنامه بین‌المللی دُزیمتری مقایسه‌ای سال ۲۰۰۰ IAEA، در مورد باریکه فوتون ۹ MV، در مقایسه با ارزیابی IAEA، تنها در حدود ۰/۲٪ اختلاف را نشان داده است.

۳-۴- تعیین دُز جذبی آب در باریکه‌های الکترون

شتابدهنده Saturn 20 باریکه‌های الکترون با انرژی‌های اسمی ۶، ۹، ۱۳، ۱۷ و ۲۰ مگاالکترون-ولت و شتابدهنده Neptun 10PC باریکه‌های الکترون با انرژی‌های ۶، ۸ و ۱۰ مگاالکترون-ولت تولید می‌کنند. برای تعیین دُز جذبی آب در باریکه‌های الکترون این دو شتابدهنده از اتاقک یونش صفحه موازی «0.3CC. PTW W-34001» و فانتوم‌های آب و پرسپکس

M مقدار خوانده شده به وسیله دُزیمتر برحسب نانوکولن (nC) است که به سبب یکسان بودن تصحیحات انجام گرفته و خطاهای لحاظ شده در آن در هر دو روش محاسبه، و عدم تاثیر آن‌ها در نتیجه این مقایسه از ذکر مقادیر عددی خودداری شده است. نسبت $D_{w,Q}/M$ در واقع، همان فاکتور سنج‌بندی اتاقک‌های یونش بکار رفته برحسب دُز جذبی آب در کیفیت Q است (یعنی $D_{w,Q}/M = N_{D,w,Q}$)؛ بطوریکه در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر این نسبت برای هر یک از کیفیت‌های اندازه‌گیری شده فوتون در هر دو مورد نزدیک به هم بوده و خطاهای نسبی آنها نیز تفاوت چندانی ندارند. تعیین دُز به شیوه $N_{D,w,Co}$ حدود ۰/۵٪ افزایش نسبت به دُز حساب شده به طریق $N_{D,air}$ نشان می‌دهد. ولی در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به خطایی در حدود ۰/۹٪ در خواندن دُزیمتر، همچنین پایداری درازمدت دُزیمتر و تامین شرایط مرجع اندازه‌گیری، تعیین دُز جذبی آب در باریکه‌های فوتون با هر یک از روش $N_{D,air}$ و $N_{D,w,Co}$ با خطایی در حدود ۱/۷٪ امکان‌پذیر است. البته در



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
 Dosimetry and Medical Radiation Physics Section - Division of Human Health
 Wagramer Strasse 5, P.O. Box 100, A-1400 VIENNA, AUSTRIA
 Facsimile: +43 1 26007-21662, Telephone: +43 1 2600-21662, e-mail: DOSIMETRY@IAEA.ORG

IAEA/WHO TLD POSTAL DOSE QUALITY AUDIT

Institution: *SSDL of Atomic Energy Organization of Iran*
 Address: *Karaj*
 Country: *IRAN (ISLAMIC REP.)*

TLD batch No: *DL00-2*
 TLDs irradiated by: *A Solimanian, M Ghafoori*
 Date of irradiation: *19-Nov-00*
 Evaluation: *15-Jan-01*

RESULTS OF TLD MEASUREMENTS FOR Co-60 AND HIGH-ENERGY PHOTONS

| Beam | Radiation unit | TLD set # | User stated dose [Gy] | IAEA (measured) dose [Gy]* | IAEA mean dose [Gy] | % deviation relative** to IAEA mean dose | IAEA mean dose / User stated dose |
|------|----------------|-----------|-----------------------|----------------------------|---------------------|--|-----------------------------------|
| 9 MV | Neptun 10P | DL0092 | 2.01 | 2.00 | 2.00 | 0.2 | 1.00 |
| | | | 2.01 | 2.01 | | | |
| | | | 2.01 | 1.99 | | | |

* The uncertainty in the TLD measurement of the dose is 1.8% (1 standard deviation); this does not include the uncertainty intrinsic to the dosimetry protocol (see IAEA TRS-277).

** % deviation relative to IAEA measured dose = $100 \times (\text{User stated dose} - \text{IAEA mean measured dose}) / \text{IAEA mean measured dose}$. A relative deviation with negative (positive) sign indicates that the user estimates lower (higher) dose than what is measured.

Agreement within $\pm 3.5\%$ between the user stated dose and the IAEA measured dose is considered satisfactory.

M. J. Izewska
 Dr. J. Izewska
 TLD Officer - DMRP Section

Date: 26 Jan 01

A. R. R. R.
 Acting Head - DMRP Section

IMPORTANT NOTICE: This information is provided only as an independent verification of beam output and not as a machine calibration, nor as an alternative to frequent calibrations by a qualified physicist.



شده دزیمتر در مقدار Sw_{air} در هر عمق نمودارهای توزیع دز در آب را رسم کرده‌ایم. البته مقادیر خوانده شده، MQ_{PMMA} ، و عمق اندازه‌گیری در فانتوم پرسپکس، Z_{PMMA} ، ابتدا به مقادیر خوانده شده، MQ_W ، در عمق معادل آب، Z_W ، تبدیل شده است $(Z_W = Z_{PMMA} \cdot C_{PMMA} \cdot C_{PPMMA} = 0.941)$

$$MQ_W = MQ_{PMMA} \cdot h_{PMMA} \cdot h_{PPMMA} = 1/0.09.$$

عمق مرجع اندازه‌گیری دز، در دستور کار پیشین IAEA در $Z_W = R_{100}$ (یعنی در عمق بیشینه دز) در دستور کار جدید در (g/cm^2) $Z_{ref} = 0.1 / R_{50}$ قرار دارد. بین R_{50} نمودار توزیع یونش (که آن را با $R_{50,ion}$ نمایش می‌دهیم) و R_{50} نمودار توزیع دز، رابطه $R_{50,ion} = 0.29 / R_{50}$ برقرار است. مشخصات باریکه‌های الکترون شتابدهنده‌های Saturn 20 و Neptun 10PC در جدول‌های ۵ و ۶ مقایسه و منحنی‌های توزیع یونش و دز در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

(PMMA) استفاده کرده‌ایم. شاخص کیفیت باریکه‌های الکترون در پیش‌نویس دستورکار جدید IAEA، عمقی از آب است که در آن دز جذبی به نصف مقدار دز ماکزیموم کاهش می‌یابد و آن را با R_{50} نشان می‌دهند. در دستور کارهای پیشین، یعنی IAEA-TRS277&381، شاخص کیفیت باریکه‌های الکترون با انرژی متوسط \bar{E} در سطح فانتوم، بیان شده بود که با R_{50} رابطه نیمه تجربی دارد. نسبت‌های Sw_{air} و ضرایب تصحیح کیفیت « k_{QQ} » که به ترتیب برای تعیین دز در روش پیشین (معادله ۴) و روش جدید (معادله ۲) لازم هستند، برحسب تابعی از دو شاخص کیفیت \bar{E} و R_{50} تعیین شده‌اند و در دسترس هستند.

برای تعیین کیفیت باریکه‌های الکترون، ابتدا منحنی‌های توزیع یونش را در فانتوم‌های آب (برای Saturn 20) و پرسپکس (برای Neptun 10PC) با استفاده از اتاقک یونش صفحه موازی به دست آورده‌ایم. سپس با ضرب مقادیر خوانده

جدول ۵- پارامترهای مشخصه باریکه‌های الکترون شتابدهنده CGR Saturn 20

| $R_{50}(g/cm^2)$ | | $R_{100}(g/cm^2)$ | | $R_p(g/cm^2)$ | | $Z_{ref}(g/cm^2)$ =0.6R ₅₀ -0.1 | \bar{E}_0 (MeV) | E (MeV) |
|------------------|----------------------|-------------------|-----|---------------|-----|---|----------------------|------------|
| یونش | بادز بانمودار محاسبه | یونش | دز | یونش | دز | | | |
| ۶/۸ | ۶/۹ | ۷/۵ | ۴/۳ | ۴/۴ | ۸/۳ | ۸/۴ | ۴/۰ | ۱۷ |
| ۵/۱ | ۵/۲ | ۵/۲ | ۳/۱ | ۳/۱ | ۶/۴ | ۶/۵ | ۳/۰ | ۱۳ |
| ۳/۷ | ۳/۷ | ۳/۷ | ۲/۲ | ۲/۳ | ۴/۵ | ۴/۶ | ۲/۱ | ۹ |
| ۲/۳ | ۲/۳ | ۲/۳ | ۱/۳ | ۱/۳ | ۳/۰ | ۳/۰ | ۱/۳ | ۶ |

جدول ۶- پارامترهای مشخصه باریکه‌های الکترون شتابدهنده Neptun 10PC

| $R_{50}(g/cm^2)$ | | $R_{100}(g/cm^2)$ | | $R_{p,ion}$ (g/cm ²) | $Z_{ref}(g/cm^2)$ =0.6R ₅₀ -0.1 | \bar{E}_0 (MeV) | E (MeV) | |
|------------------|----------------------|-------------------|-----|-------------------------------------|---|----------------------|------------|----|
| یونش | بادز بانمودار محاسبه | یونش | دز | | | | | |
| ۴/۰ | ۴/۰ | ۴/۰ | ۲/۲ | ۲/۳ | ۴/۹ | ۲/۳ | ۹/۱ | ۱۰ |
| ۳/۲ | ۳/۲ | ۳/۲ | ۱/۸ | ۱/۸ | ۴/۱ | ۱/۸ | ۷/۴ | ۸ |
| ۲/۴ | ۲/۴ | ۲/۴ | ۱/۲ | ۱/۳ | ۳/۱ | ۱/۳ | ۵/۶ | ۶ |

پاسخ اتاقکهای استوانه‌ای مرجع، در یک کار پژوهشی دیگر انجام و بطور مشروح عرضه شده است [۱۲]. نتایج سنجش‌بندی مذکور به قرار زیر است:

$$\frac{\text{در باریکه الکترون } 17MeV}{70.9 \pm 1.85}$$

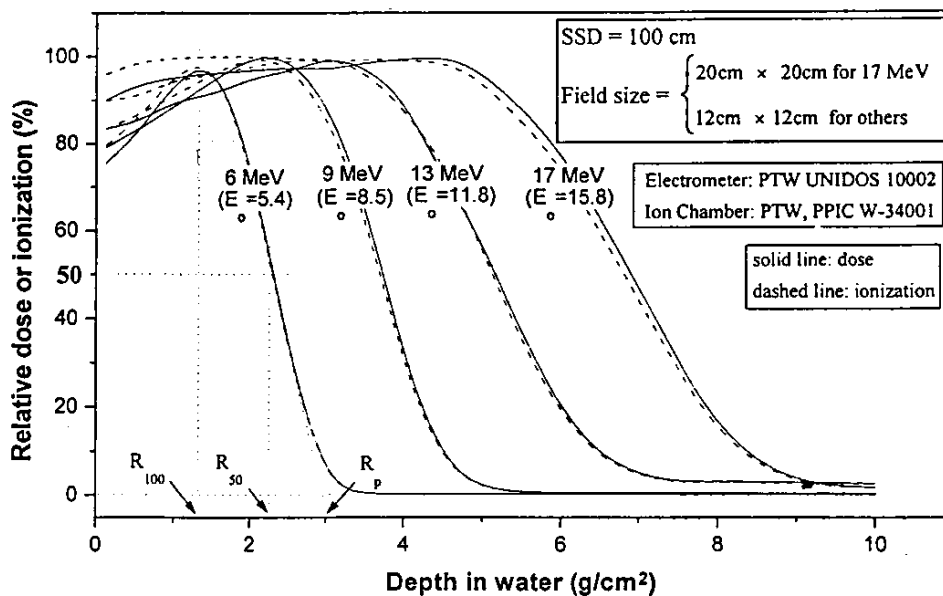
$$\frac{\text{در میدان Co-60}}{72.00 \pm 2.5}$$

$$\frac{W-34001}{N_{D,air}} \text{ (mGy/nC)}$$

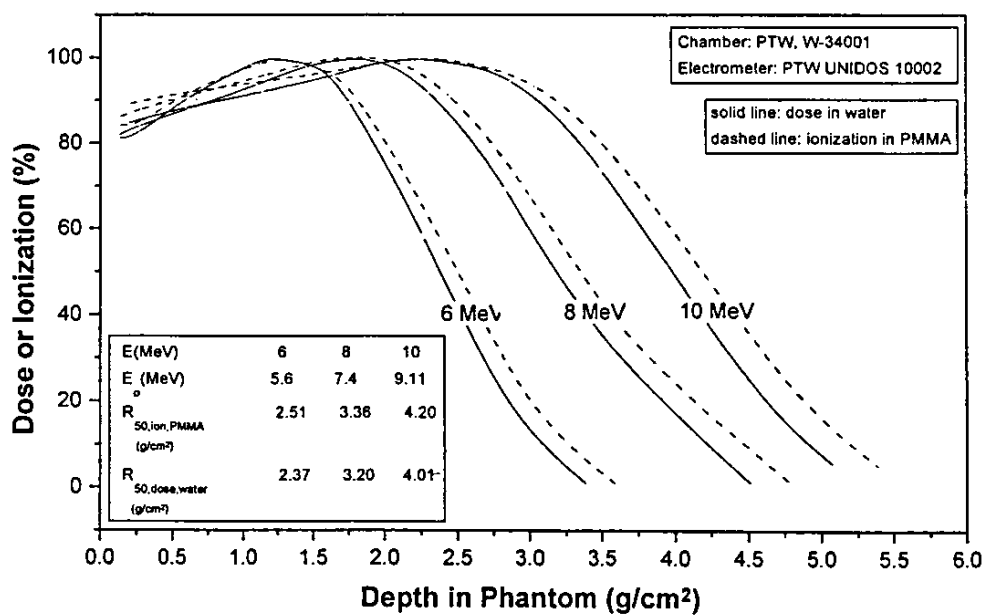
$$\frac{W-34001}{N_{D,W}} \text{ (mGy/nC)}$$

سنجش‌بندی اتاقک یونش صفحه موازی PTW W-34001

برحسب دز جذبی هوای حفره اتاقک، یعنی $N_{D,air}$ ، در میدان پرتو گامای Co-60 و همچنین در باریکه الکترون 17MeV و برحسب دز جذبی آب در میدان پرتو گامای Co-60 در مقایسه با



(a)



(b)

شکل ۲ - منحنی‌های درصد توزیع دُز و یونش باریک‌های الکترون شتاب‌دهنده‌های خطی پرتو درمانی

a: Saturn 20، در بیمارستان سیدالشهدای اصفهان

b: Neptun 10PC، در بیمارستان شفاي کرمان

یونش صفحه موازی PTW, W-34001 را از راه مقایسه با اتاقتک یونش استوانه‌ای PTW, W-30001 در باریکه الکترون 17 MeV، $\bar{E}_0=15/8$ MeV، $R_{50}=7$ g/cm² بسه دست آورده‌ایم:

$$N_{D.W.Q_{cross}}^{W-34001} = \frac{M_{Q_{cross}}^{W-30001}}{M_{Q_{cross}}^{W-34001}} \cdot N_{D.W.Co}^{W-30001} \cdot k_{Q_{cross}.Co}^{W-30001} \quad (15)$$

اتاقتک یونش استوانه‌ای W-30001 دارای فاکتور سنجه‌بندی $N_{D.W.Co} = 51/87 \pm 1\%$ mGy/nC به توسط آزمایشگاه دزیمتری IAEA است. فاکتور تصحیح کیفیت این اتاقتک نیز براساس داده‌های پیش‌نویس دستور کار جدید IAEA $k_{Q_{cross}.Co} = 0/902$ است. ما بر پایه این داده‌ها فاکتور $N_{D.W.Q_{cross}}^{W-34001} = 73/48 \pm 1/185$ mGy/nC را برای اتاقتک یونش صفحه موازی به دست آورده‌ایم.

با در نظر گرفتن فاکتورهای سنجه‌بندی $N_{D.W}$ و $N_{D.air}$ که آنها را در میدان‌های گامای Co-60 و الکترون برای اتاقتک یونش صفحه موازی به دست آورده‌ایم، دُز جذبی آب را در باریکه‌های الکترون شتابدهنده‌های Saturn 20 و Neptun 10PC با استفاده از روابط ۲ و ۴ تعیین کرده‌ایم. برای مقایسه نتایج دزیمتری با دو روش پیش‌گفته، دُز جذبی آب را در عمق مرجع یکسان برابر با $Z_{ref} = R_{100}$ به دست آورده‌ایم. پارامترهای دیگر مورد نیاز برای تعیین دُز جذبی آب در باریکه‌های الکترون در جدول ۷ مندرج است.

نتایج دزیمتری باریکه‌های الکترون براساس استاندارد کرمای هوا و استاندارد دُز جذبی آب، با توجه به نحوه سنجه‌بندی اتاقتک یونش صفحه موازی PTW.W-34001، در جدول ۸ خلاصه شده است. در این جدول میانگین دُز جذبی اندازه‌گیری شده در هر باریکه با استفاده از روشهای مختلف نیز مندرج است. به طوریکه ملاحظه می‌شود انحراف معیار نسبی دُز جذبی در هر باریکه به طور قابل ملاحظه‌ای از مقدار خطای کلی در تعیین

روش دیگری نیز برای سنجه‌بندی اتاقتکهای یونش صفحه موازی برحسب دُز جذبی آب در باریکه‌های الکترون، در مقایسه با پاسخ اتاقتک یونش استوانه‌ای مرجع، در پیش‌نویس دستورکار جدید IAEA پیشنهاد شده است، به این ترتیب که بالاترین انرژی باریکه الکترون در دسترس $\bar{E} \geq 16$ MeV یا $R_{50} \geq 7$ g/cm² را انتخاب کرده و اتاقتکهای یونش استوانه‌ای مرجع و صفحه موازی را یکی پس از دیگری در عمق Z_{ref} ، یعنی عمق مرجع فانتوم آب، قرار می‌دهیم. فاکتور سنجه‌بندی اتاقتک یونش صفحه موازی برحسب دُز جذبی آب در کیفیت باریکه الکترون مورد نظر، که با Q_{cross} نمایش داده می‌شود، چنین بدست می‌آید:

$$N_{D.W.Q_{cross}}^x = \frac{M_{Q_{cross}}^{ref}}{M_{Q_{cross}}^x} \cdot N_{D.W.Q_0}^{ref} \cdot k_{Q_{cross}.Q_0}^{ref} \quad (12)$$

$M_{Q_{cross}}^{ref}$ و $M_{Q_{cross}}^x$ به ترتیب مقادیر خوانده شده دزیمتری به وسیله اتاقتک یونش مرجع و اتاقتک یونش تحت سنجه‌بندی (صفحه موازی) هستند که تصحیحات لازم مربوط به عوامل تاثیرگذار، مانند دما و فشار، اثر قطبیدگی و باز ترکیبی یونها در باره آنها اعمال شده است. $M_{D.W.Q_0}^{ref}$ فاکتور سنجه‌بندی اتاقتک یونش مرجع در کیفیت Q_0 باریکه مرجع است که می‌تواند Co-60 باشد و $k_{Q_{cross}.Q_0}^{ref}$ فاکتور تصحیح کیفیت اتاقتک یونش مرجع است. دُز جذبی آب در باریکه الکترونی دارای کیفیت Q با استفاده اتاقتک یونشی که به این ترتیب سنجه‌بندی شده است از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$D_{W.Q} = M_{Q_0}^x \cdot N_{D.W.Q_{cross}}^x \cdot k_{Q_{cross}.Q_0}^x \quad (13)$$

فاکتور تصحیح $k_{Q_{cross}.Q_0}^x$ نیز چنین بدست می‌آید:

$$k_{Q_{cross}.Q_0}^x = \frac{k_{Q_{cross}.Q_{int}}^x}{k_{Q_{cross}.Q_{int}}^x} \quad (14)$$

مقادیر فاکتورهای تصحیح اتاقتک یونش نسبت به کیفیت باریکه الکترون واسطه^(۵) Q_{int} ، که $R_{50}=7$ g/cm² انتخاب شده است، در پیش‌نویس دستورکار جدید IAEA ارائه شده‌اند.

با پی‌گیری روش اخیر، فاکتور سنجه‌بندی اتاقتک



جدول ۷- داده‌های موردنیاز برای تعیین دُز جذبی در باریکه‌های الکترون

| ۱۷ | ۱۳ | ۱۰ | ۹ | ۸ | ۶ (Neptun10PC) | ۶ (Saturn 20) | انرژی اسمی باریکه (MeV) |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|------------------|---|
| ۱۳/۱۶ | ۹/۵۱ | ۱۳/۳ | ۱۸/۷۴ | ۱۲/۶ | ۱۲/۱۶ | ۱۵/۸۵ | M(nC/100m.u.) (± ٪۱) |
| ۱/۰۱۹ | ۱/۰۴۴ | ۱/۰۶۱ | ۱/۰۵۱ | ۱/۰۸۴ | ۱/۰۷ | ۱/۰۸۱ | S _{w,air} (± ٪۰/۵۴) |
| ۱/۰۰ | ۱/۰۰ | ۱/۰۰ | ۱/۰۰ | ۱/۰۰ | ۱/۰۰ | ۱/۰۰ | P _Q (± ٪۰/۵) |
| ۰/۹۰۴ | ۰/۹۱۶ | ۰/۹۲۷ | ۰/۹۳۰ | ۰/۹۳۵ | ۰/۹۴۶ | ۰/۹۴۷ | k ^{w-34001} O.Co (± ٪۱/۷) |
| ۱/۰۰ | ۱/۰۱۴ | ۱/۰۲۵ | ۱/۰۲۸ | ۱/۰۳۵ | ۱/۰۴۶ | ۱/۰۴۶ | k ^{w = 34001} O.17MeV (± ٪۰/۶) |

کل خطا در تأمین شرایط هندسی مرجع و پایداری دراز مدت اتافک ± ٪۱

جدول ۸- مقایسه نتایج دُزیمتری باریکه‌های الکترون با استفاده از ND_w و ND_{air}

| Saturn20 | | | | Neptun 10PC | | | شناخته‌دهنده | |
|------------------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|---------------------------------|--|
| ۶ | ۹ | ۱۳ | ۱۷ | ۶ | ۸ | ۱۰ | انرژی اسمی باریکه، E(MeV) | |
| ۱۲۳/۳۶ | ۱۴۱/۸۱ | ۷۱/۴۸ | ۹۶/۵۵ | ۹۳/۶۸ | ۹۸/۳۴ | ۱۰۱/۶۰ | ND _{air,Co} ± ٪۲/۹۷ | D _w (cGy/100M.U.)= |
| ۱۲۱/۴۸ | ۱۳۹/۶۴ | ۷۰/۳۹ | ۹۵/۰۷ | ۹۲/۲۵ | ۹۶/۸۴ | ۱۰۰/۰۵ | ND _{air,Co} ± ٪۲/۴۵ | MND _{air} (S _{w,air})Q PQ |
| ۱۲۳/۷۴ | ۱۴۳/۶۸ | ۷۱/۸۱ | ۹۸/۰۸ | ۹۴/۸۳ | ۹۷/۱۲ | ۱۰۱/۶۴ | Q _{O,Co-60} ± ٪۲/۵۶ | D _w (cGy/100M.U.)= |
| ۱۲۱/۸۲ | ۱۴۱/۵۶ | ۷۰/۸۶ | ۹۶/۷۰ | ۹۳/۴۶ | ۹۵/۸۲ | ۱۰۰/۱۷ | Q _{O,17MeV} ± ٪۲/۴ | M.ND _{w,Qo} .k _{QOo} |
| ۱۲۲/۶ ± ٪۰/۹۱ | ۱۴۱/۶۷ ± ٪۱/۱۶ | ۷۱/۱۴ ± ٪۰/۹۰ | ۹۶/۶ ± ٪۱/۲۷ | ۹۳/۵۶ ± ٪۱/۱۳ | ۹۷/۰۳ ± ٪۱/۰۷ | ۱۰۰/۸۷ ± ٪۰/۸۷ | میانگین ± ۱σ | |

در دستور کار IAEA که (بین ۱/۴٪ و ۲/۱٪ است) ناشی از خطای نسبتاً زیاد و در حال حاضر اجتناب‌ناپذیر، در تعیین فاکتورهای سنج‌بندی اتافک یونش صفحه موازی PTW W-34001 برحسب دُز جذبی آب (۱/۳٪ و ۱/۸٪) به هنگام مقایسه با پاسخ اتافک یونش استوانه‌ای مرجع است. با سنج‌بندی مستقیم این اتافک در مقابل استاندارد دُز جذبی آب در IAEA، خطای فاکتور سنج‌بندی تا حدود ۰/۷٪ کاهش یافته و به خطای کلی تعیین دُز جذبی که به دقت توسط IAEA برآورد شده است نزدیک می‌شود.

دُز جذبی در آن باریکه (اعداد داخل پارانتهز) کمتر است که نشان‌دهنده نزدیک بودن به نتایج حاصل از روشهای مختلف صرفنظر از خطای استاندارد آنها است. بنابراین امتیاز عمده کاربرد استاندارد دُز جذبی آب برای تعیین دُز جذبی در باریکه‌های الکترون، نظیر باریکه‌های گامای Co-60 و فوتون پرنرژی، دست کم در اندازه‌گیری‌هایی که ما انجام داده‌ایم سادگی آن است که به نوبه خود امتیاز مهمی محسوب می‌شود.

وارد شدن خطای نسبتاً زیادتر در تعیین دُز جذبی در باریکه‌های الکترون به توسط بخش دُزیمتری استاندارد (بین ۲/۴٪ تا حدود ۳٪) نسبت به دقت قابل دسترسی پیش‌بینی شده



جدول ۹ - مقایسه دقت قابل دسترسی در تعیین دُز جذبی باریکه‌های فوتون و الکترون توسط SSDL با دقت برآورد شده در دستور کارهای جدید و قدیم IAEA

| الکترون | ایکس پراثری | Co-60 | نوع باریکه | |
|---------|-------------|-------|--------------------------|-----------------|
| | | | SSDL | دقت قابل دسترسی |
| %۲/۴ | %۱/۷ | %۱ | IAEA (جدید، ND,wCoP) | |
| %۱/۴ | %۱/۵ | %۰/۹ | IAEA (قدیم، IFRS277&381) | |
| %۲/۹ | %۳/۲ | %۲/۵ | | |

۴- نتیجه‌گیری

روش دُزیمتری براساس استاندارد دُز جذبی آب، ضمن حفظ و بهبود نسبی دقت دُزیمتری، به وضوح از سادگی بالایی نسبت به روش دُزیمتری براساس استاندارد کرمای هوا برخوردار است. در جدول ۹ دقت قابل دسترسی در دُزیمتری براساس استاندارد دُز جذبی آب به توسط بخش دُزیمتری استاندارد (SSDL) ارائه شده و با دقت پیش‌بینی شده در دستور کسارهای پیشین IAEA براساس کرمای هوا و همچنین پیش‌نویس دستورالعمل جدید IAEA ND,w (CoP) مقایسه گردیده است.

با توجه به اهمیتی که یکنواختی، سادگی و دقت روشهای سنججه‌بندی و دُزیمتری در فرآیند کلی کنترل کیفیت در پرتودرمانی دارد، به ویژه با در نظر گرفتن احتمال گسترش کاربرد شتابدهنده‌های خطی پزشکی در مراکز پرتودرمانی کشور، انتظار

می‌رود که بخش دُزیمتری استاندارد دستورکار جدید دُزیمتری IAEA را، پس از انتشار رسمی آن، مبنای سنججه‌بندی دُزیمترها و دُزیمتری باریکه‌های مورد استفاده در پرتودرمانی قرار دهد.

تشکر و قدردانی

در پایان از همراهی و مساعدت کلیه همکاران، چه در انجام اندازه‌گیریها و چه در گردآوری داده‌ها، بخصوص خانم آنتیا عالیپور و آقایان ارژنگ شهور و کورش اربابی از بخش دُزیمتری استاندارد، خانم شهین جباری و آقای سید غلامرضا اسکویی از بخش پرتودرمانی بیمارستان امام خمینی تبریز و آقای محمد عباسپور رودسری از بخش پرتودرمانی بیمارستان شفا کرمان صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

اختصارات:

| | |
|------|--|
| AAPM | American Association of Physicists in Medicine |
| BIPM | Bureau International des Poids et Mesures |
| CRP | Coordinated Research Programme |
| IAEA | International Atomic Energy Agency |
| PSDL | Primary Standard Dosimetry Laboratory |
| SSDL | Secondary Standard Dosimetry Laboratory |
| TPR | Tissue-Phantom Ratio |
| WHO | World Health Organization |



References

1. Steffen, G., "Nuclear Applications in Health Care, Lasting Benefits", *IAEA Bulletin*, vol. 2, No. 1, pp. 33-40 (2000).
2. American Association of Physicists in Medicine (AAPM), Task Group 21: A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams, *Med. Phys.* 10, 741-771 (1983).
3. Nordic Association of Clinical Physics (NACP), "Procedures in external radiation therapy dosimetry with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV", *Acta Radio Oncol* 19,55-79 (1980).
4. Hospital Physicists' Association (HPA), "Revised Code of Practice for the dosimetry of 2 to 25 MV x-ray, and caesium-137 and cobalt-60 gamma-ray beams", *Phys Med Biol* 28, 1097-1104 (1983).
5. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), "Radiation Dosimetry: Electron beams with energies between 1 and 50 MeV", *ICRU Report 35*, ICRU, Bethesda, MD, (1984).
6. International Atomic Energy Agency (IAEA), "Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams: An International Code of Practice", *Technical Report Series no. 277* (2nd ed. in 1997), IAEA, Vienna (1987).
7. International Atomic Energy Agency (IAEA), "The use of plane-parallel ionization chambers in high-energy electron and photon beams. An International Code of Practice for Dosimetry", *Technical Report Series no. 381*, IAEA, Vienna (1997).
8. Institute of Physical Sciences in Medicine, "Code of Practice for high-energy photon therapy dosimetry based on the NPL absorbed dose calibration service", *Phys. Med. Biol.* 35, 1355-1360 (1990).
9. Deutsches Institut für Normung, "Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung, Teil 2: Ionisationsdosimetrie, Deutsche Norm DIN 6800-2", Berlin (1997).
10. American Association of Physicists in Medicine (AAPM), Task Group 51: Protocol for Clinical Reference Dosimetry of High-Energy Photon and Electron Beams, *Med. Phys.* 26, 1847-1870 (1999).
11. International Atomic Energy Agency (IAEA), "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water", *Technical Report Series no. 398*, IAEA, Vienna, (2000).
- ۱۲- عبدالرضا سلیمانیان و همکاران، "طراحی، ساخت و بررسی ویژگیهای اتاقکهای یونش صفحه موازی برای دزیمتری باریکه‌های الکترون مورد استفاده در پرتودرمانی" نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۲۰، ۱۴-۱، ۱۳۷۸.
13. M. Boutillon, A.M. Perroche, "Ionometric determination of absorbed dose to water for cobalt-60 gamma rays", *Phys Med Biol* 38, 439-454 (1993).
14. P.J. Allisy-Roberts, D.T. Burns, *Comparisons and calibrations at the BIPM*, Report CCRI(I)/99-1, BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92312 Sevres, (1999).

Determination of Absorbed Dose in External Radiotherapy Beams Based on Standards of Absorbed Dose to Water

*A. Solimanian, M. Ghafoori: SSDL, AEOI, P.O. Box 31585-4395, Karaj-Iran
Sh. Monadi: Radiotrapy department of Seyedoshohada Haspital, Isfahan*

Abstract

The International Atomic Energy Agency (IAEA), in its last code of practice for dosimetry in radiotherapy, has changed the basis of absorbed dose determination in external therapeutic radiation beams from measurement standards of air kerma to those of absorbed dose to water. This radical change, which has been made within a short period after the similar decision of the American Association of Physicists in Medicine (AAPM), provides medical physicists with a simple as well as accurate procedure for dosimetry of almost all kinds of currently radiation beams used external radiotherapy. In this work, using previous air kerma based and the new absorbed dose to water based procedures, we have determined absorbed dose to water in photon (gamma and x) and electron beams of a few Co-60 units and medical linear accelerators in some radiotherapy departments in Iran. The results of dosimetry in each case are then analyzed and compared, regarding the standard uncertainties associated with each method.