



تأمین باریکه مرجع الکترون با انرژی زیاد

عبدالرضا سلیمانیان^{۱*}، کلاوس دریکوم^۲

۱- بخش دزیمتری استاندارد (SSDL)، مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۴۹۸ - ۳۱۴۸۵، کرج- ایران
 ۲- بخش پرتوهای یونساز مؤسسه ملی اندازه‌گیری، برانشوایگ- آلمان

چکیده: دزیمتری پرتوهای یونساز مٲکی به استانداردهایی است که توسط نهادهای ملی و بین‌المللی ذیصلاح تدوین می‌شوند. میدان‌های مرجع پرتوهای یونساز به عنوان واسطه بین استانداردهای اندازه‌گیری و کاربران پرتوها عمل می‌کنند. در این مقاله نحوه معرفی یک باریکه مرجع الکترون با انرژی زیاد و دُز مشخص، براساس استاندارد DIN6800-2، شرح داده شده است. برای این کار باریکه الکترون یک شتابدهنده خطی از نوع Philips SL75-20 با انرژی اسمی ۲۰ MeV بکار رفته است. کیفیت باریکه الکترون با استفاده از یک اتاقک یونش صفحه موازی بر حسب انرژی میانگین باریکه در سطح یک فانتوم آب تعیین گردیده است. سه اتاقک یونش استوانه‌ای مختلف بر حسب استاندارد اولیه دُز جذبی آب در میدان پرتو گامای Co-60 سنجه‌بندی شده‌اند، پاسخ اتاقکهای یونش نسبت به عوامل تأثیرگذار، مانند اثر قطبش و لتاز و بازترکیبی یونها، در باریکه الکترون بررسی شده‌اند، سپس هریک از این اتاقکها برای سنجه‌بندی سیستم ناظر دُز شتابدهنده، که خود شامل دو اتاقک یونش استوانه‌ای در فانتوم آب است، در شرایط مرجع اندازه‌گیری، به طور مستقل به کار رفته‌اند. در نهایت، میانگین ضریب سنجه‌بندی بر حسب دُز جذبی آب، برای سیستم ناظر دُز با انحراف معیار کمتر از ۰/۳٪ تعیین شده است. خطای کلی در تعیین دُز جذبی آب در باریکه الکترون در شرایط مرجع، ۱/۴٪ برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: باریکه الکترون مرجع، کیفیت باریکه، اتاقک یونش، سنجه‌بندی، دُز جذبی

Establishment of a Reference High-Energy Electron Beam

A. Solimanian^{1*}, K. Derikum²

1- Secondary Standard Dosimetry laboratory (SSDL), Nuclear Research Center for Agriculture and Medicine, AEOL, P.O.Box: 31485 - 498, Karaj-Iran

2- Physikalisch, Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig - Germany

Abstract: Dosimetry of ionizing radiations are based on standard methods issued by competent national and international organizations. Establishment of reference radiations at standard dosimetry laboratories are essential to transfer measurement standards to radiation users. This paper presents attempts made at Ionizing Radiation Division of PTB to produce a reference 20 MeV electron beam based on the German standard DIN 6800-2. The quality of the 20 MeV electron beam of a Philips SL75-20 linear accelerator (linac) is determined by a well designed plane-parallel ionization chamber, in terms of mean energy of the electron beam at the surface of a water phantom. Three types of cylindrical ionization chambers are calibrated against the primary standard of absorbed dose to water at PTB in Co-60 gamma radiation. Based on DIN 6800-2, independent measurements of absorbed dose to water are then carried out by these three calibrated chambers at a reference depth in water phantom and with reference to the dose monitoring system of the linac which consists of two other ionization chambers located in water phantom. The results are compared and a mean calibration factor for the monitor chambers with a combined standard uncertainty is determined.

Keywords: reference electron beam, beam quality, ionisation chamber, calibration, absorbed dose



تاريخ دريافت مقاله: ۱۳۸۲/۲/۱ تاريخ پذيرش مقاله: ۱۳۸۲/۱۱/۱۱
*email: a.soleimani@nrcam.org



۱- مقدمه

دُز جذبی آب در باریکه‌های فوتون و الکترون که در پرتودرمانی بکار می‌رود به وسیله اتاقلهای یونش مناسب و بکار بستن دستورکارهای معین، که توسط نهادهای ملی و بین‌المللی زیربط به همین منظور تدوین شده‌اند [۱ تا ۳]، تعیین می‌گردد. سنجه‌بندی اتاقلهای یونش در میدان‌های مرجع پرتوهای یونساز در آزمایشگاه‌های دُزیمتری استاندارد، ملاک عمده‌ای است که تعیین دُز جذبی باریکه‌های فوتون و الکترون را در مراکز پرتودرمانی به سیستم بین‌المللی اندازه‌گیری ارتباط می‌دهد. برای ارزیابی صحت دُزیمتری‌هایی که در مراکز پرتودرمانی انجام می‌گیرند، برنامه‌های دوره‌ای دُزیمتری مقایسه‌ای توسط مراکز دُزیمتری استاندارد در سطح ملی یا منطقه‌ای، و یا در سطح بین‌المللی، توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO) با همکاری آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) اجرا می‌شود؛ مورد اخیر در حال حاضر، دُز جذبی آب در باریکه‌های پرتو گامای Co-60 و ایکس پرانرژی را در برمی‌گیرد. تجزیه و تحلیل نتایج دُزیمتری مقایسه‌ای نیز به نوبه خود، و در نهایت، متکی به سنجه‌بندی دُزیمتری‌های واسطه (معمولاً ترمولومینسانس، TLD) در میدان‌های مرجع پرتوهای یونساز است. دُزیمتری مقایسه‌ای بین مراکز دُزیمتری استاندارد اولیه (PSDL) و ثانویه (SSDL) نیز برای مقایسه استانداردهای موجود آنها انجام می‌گیرد. با توجه به اهمیت میدان‌های مرجع پرتوهای یونساز، در این کار پژوهشی، که در مؤسسه ملی PTB آلمان^(۱) انجام گرفته، سعی شده است که با استفاده از اتاقلهای یونش سنجه‌بندی شده در مقابل استاندارد اولیه دُز جذبی آب در میدان پرتو گامای Co-60 و بر اساس دستور کار [2] DIN 6800-2، تحت شرایط معین، باریکه الکترون با انرژی اسمی ۲۰ MeV حاصل از یک شتابدهنده خطی

الکترون نوع Philips SL75-20، به عنوان باریکه مرجع الکترون با دُز مشخص معرفی شود.

۲- ملاحظات نظری: روش دُزیمتری براساس استاندارد DIN 6800-2

رابطه تعیین دُز جذبی آب در باریکه‌های الکترون مورد استفاده در پرتودرمانی خارجی، با استفاده از اتاقلهای یونش مناسب و بر اساس دستور کار DIN6800-2 چنین است:

$$D_w(P_{\text{eff}}) = M \cdot N \cdot \underbrace{k_E k_{\rho} k_r k_s k_p k_T}_k \quad (۱)$$

در این رابطه:

M، باز الکتریکی خوانده شده به وسیله الکترومتر متصل به اتاقل یونش بر حسب کولن است.

N، ضریب سنجه‌بندی اتاقل یونش بر حسب دُز جذبی آب در میدان پرتو مرجع است. پرتو مرجع در استاندارد

DIN 6800-2 پرتو گامای Co-60 است.

استاندارد اولیه دُز جذبی آب در مؤسسه PTB، در حال حاضر متکی به دُزیمتر فیک، بر اساس جذب کلی الکترون‌های یک باریکه مشخص الکترون در محلول سولفات فرو است [۴]. کوشش‌های مؤثری نیز به منظور برپایی استاندارد اولیه دُز جذبی آب بر اساس روش کالوریمتری، در این مؤسسه در جریان است.

P_{eff} ، نقطه مؤثر اندازه‌گیری در اتاقل یونش است که برای اتاقلهای صفحه موازی^(۲) در مرکز جدار داخلی پنجره ورودی پرتو و برای اتاقلهای استوانه‌ای^(۳) به شعاع داخلی r، در فاصله $r/5$ از مرکز اتاقل به سمت منبع پرتو قرار دارد.

k_p ، عامل تصحیح ناشی از تغییرات دما و فشار محیط اندازه‌گیری (T و P) نسبت به دما و فشار مرجع (T_0 و P_0) است. ($k_p = TP_0/T_0P$)

k_r ، عامل جابجایی ناشی از تفاوت نقطه مؤثر اندازه‌گیری اتاقلهای استوانه‌ای (به شعاع r) در باریکه الکترون در مقایسه با



$$k_E' = (S_{w/a})_E / (S_{w/a})_{Co} \quad (4)$$

توان متوقف سازی آب به هوا برای باریکه الکترون و پرتو گامای Co-60 هستند. مقادیر k_E' برای باریکه‌های تک انرژی الکترون با انرژی E_0 در سطح یک فانتموم آب برحسب تابعی از عمق آب در DIN 6800-2 عرضه شده‌اند. برای باریکه‌های شتاب‌دهنده‌های پزشکی با بُرد عملی R_p و انرژی متوسط \bar{E}_0 در سطح فانتموم، روش زیر که عمده‌ترین وجه تمایز روش DIN 6800-2 با روشهای دیگر دُزیمتری است، برای تعیین مقدار k_E' در عمق Z پیشنهاد شده است:

$$k_E' = a(E'_0) \cdot (R_p - z) + b(E'_0) \quad (5)$$

در این رابطه، E'_0 یک متغیر مجازی است که بر حسب \bar{E}_0 ، یعنی انرژی متوسط باریکه در سطح فانتموم و بُرد عملی R_p تعریف می‌شود:

$$[R_p - (-0.0005\bar{E}_0^2 + 0.0104\bar{E}_0 - 0.1129)] E'_0(\bar{E}_0, R_p) = \bar{E}_0 + f(\bar{E}_0) \quad (6)$$

+۱۶

$$f(\bar{E}_0) = 0.0065 \bar{E}_0^2 - 0.484 \bar{E}_0 \quad (7)$$

\bar{E}_0 انرژی متوسط باریکه در سطح فانتموم است که شاخص کیفیت باریکه الکترون در استاندارد DIN 6800-2 به شمار می‌رود و با یکی از روابط زیر تعیین می‌شود:

$$\bar{E}_0 = 0.348 + 2/2 R_{50,i} + 0.017 (R_{50,i})^2 \quad (8)$$

$$\text{MeV} \quad \bar{E}_0 < 3.5 \text{ MeV}$$

$$\bar{E}_0 = 0.31 + 2/2 R_{50,D} + 0.006 (R_{50,D})^2 \quad (9) \quad 3 \leq$$

$\bar{E}_0 < 3.5 \text{ MeV}$ در روابط ۸ و ۹ پارامترهای $R_{50,i}$ و $R_{50,D}$ (برحسب cm) به ترتیب عمقی از آب هستند که در آن مقدار یونش و دُز جذبی به نصف مقدار ماکزیموم آنها کاهش می‌یابد. مقادیر $R_{50,i}$ و $R_{50,D}$ از منحنی‌های توزیع یونش و دُز در آب به دست می‌آیند.

است. $C_{Co-60} = (S_{w/a})_E / (S_{w/a})_{Co}$ (پرتو) $(k_r = 1)$ است. $0.025 r$

k_p ، عامل تصحیح ناشی از اثر قُطبش^(۴) و لتاژ اعمال شده به اتاقک یونش است.

$$k_p = \frac{|M_+| + |M_-|}{2|M_{+or-}|}$$

k_s ، عامل تصحیح ناشی از بازترکیب یونها^(۵) در مورد اتاقک یونش مورد استفاده است و معمولاً با روشی تجربی موسوم به روش دو ولتاژ تعیین می‌شود. در این روش اندازه‌گیری با اتاقک یونش در دو ولتاژ V_1 و V_2 انجام گرفته $(V_1/V_2 \geq 3)$ و سپس با در دست داشتن نسبت مقادیر خوانده شده M_1/M_2 عامل k_s برای باریکه‌های

$$k_E' = a(E'_0) \cdot (R_p - z) + b(E'_0) \quad (2)$$

تپشی و باریکه‌های تپشی - روبشی از رابطه تجربی زیر تعیین می‌شود:

$$k_s = a_0 + a_1 (M_1/M_2) + a_2 (M_1/M_2)^2 \quad (2)$$

ضرایب a_0 ، a_1 و a_2 برای نسبت‌های مختلف V_1/V_2 در استاندارد DIN 6800-2 داده شده‌اند.

k_T ، عاملی است که تأثیر احتمالی دمایی محیط را روی دستگاه اندازه‌گیری بار الکتریکی (الکترومتر) و اتاقک‌های یونش بسته نشان می‌دهد و در این کار موردنظر نبوده است.

k_E ، عامل تصحیح ناشی از تفاوت کیفیت باریکه الکترون با کیفیت باریکه مرجع (معمولاً پرتو گامای Co-60) و یا به طور خلاصه عامل تصحیح کیفیت باریکه است. این عامل را می‌توان به صورت حاصلضرب دو مؤلفه مجزای k_E' و k_E'' در نظر گرفت:

$$k_E = k_E' \cdot k_E'' \quad (3)$$

k_E' مؤلفه عمده عامل تصحیح کیفیت بوده و مستقل از نوع اتاقک یونش مورد استفاده و مشخصات آن است:



(۱۷)

α کسری از یونش تولید شده در حجم اتاقک است که به وسیله الکترونهاي پرتاب شده از دیواره اتاقک ایجاد می‌شود. برای دقت بیشتر در تعیین p_{Co} ، می‌توان سهم ناشی از پوشش احتمالی ضد آب اتاقک یونش را نیز در نظر گرفت. مقادیر تقریبی p_{Co} برای اتاقکهای استوانه‌ای با ضخامت دیواره $0/05\text{ cm}$ در استاندارد DIN 6800-2 عرضه شده است. در مورد اتاقکهای صفحه موازی، به منظور اجتناب از مشکلات مربوط به تعیین p_{Co} ، سنج‌بندی اتاقک یونش در یک باریکه الکترون با انرژی زیاد، در مقایسه با پاسخ اتاقک یونش استوانه‌ای پیشنهاد شده است.

۳- تعیین کیفیت باریکه الکترون

شتابدهنده خطی فیلیپس، Philips SL75-20، قادر است باریکه‌های الکترون با انرژی‌های اسمی ۶، ۸، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۶ و ۲۰ مگاالکترون ولت (MeV)، همچنین باریکه‌های فوتون با انرژی‌های ۸، ۱۰، ۱۶ و ۱۸ مگاولت (MV) را تولید کند. برای تعیین شاخص‌های کیفیت باریکه الکترون با انرژی اسمی 20 MeV ، منحنی‌های توزیع یونش را در عمق یک فانتوم آب با ابعاد $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ ، به وسیله یک اتاقک یونش صفحه موازی از نوع FK6 با مشخصات زیر، که در مؤسسه PTB طراحی و ساخته شده است، به دست آورده ایم.

فاصله منبع تولید پرتو تا سطح فانتوم: $SSD = 100\text{ cm}$ و ابعاد میدان پرتو در سطح فانتوم $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ بوده است. تمام اندازه‌گیری‌های یونش به وسیله دستگاه اندازه‌گیری بار الکتريکی، که مجموعه‌ای متشکل از الکترومترهای Keithley و مبدهای ولتاژ به بسامد است، انجام گرفته‌اند. جریان حاصل از ایجاد یونش در حجم هوای اتاقک

ضرایب a و b در معادله (۵) توابعی از E'_0 هستند. برای $\text{MeV } E'_0 \leq 25$ خواهیم داشت:

$$a = 2/773 \times 10^{-1} E'_0{}^2 - 1/94 \times 10^{-4} E'_0{}^2 + 4/9323 \times 10^{-7} E'_0 - 5/6605 \times 10^{-2} \quad (10)$$

$$b = 5/3360 \times 10^{-1} E'_0{}^2 - 1/9023 \times 10^{-4} E'_0{}^2 - 7/8826 \times 10^{-7} E'_0 + 1/0079 \quad (11)$$

و برای $E'_0 > 25\text{ MeV}$:

$$a = 2/5678 \times 10^{-7} E'_0{}^3 - 3/4308 \times 10^{-2} E'_0 + 1/614 \times 10^{-2} E'_0{}^2 - 3/380 \times 10^{-7} E'_0{}^2 \quad (12)$$

$$b = -1/1772 \times 10^{-1} E'_0{}^2 + 1/499 \times 10^{-4} E'_0{}^2 - 6/6073 \times 10^{-2} E'_0 + 1/0508 \quad (13)$$

مؤلفه دیگر ضریب k_E ، یعنی k_E'' ، به نوع اتاقک یونش مورد استفاده بستگی دارد و اختلال ناشی از حضور اتاقک در باریکه الکترون (p_E) را در مقایسه با حضور آن در میدان پرتو گامای ^{60}Co (p_{Co})، نشان می‌دهد:

$$k_E'' = p_E / p_{Co} \quad (14)$$

برای اتاقکهای یونش صفحه موازی ایده‌آل، $p_E = 1$ در نظر گرفته می‌شود. برای اتاقکهای یونش استوانه‌ای، p_E را از رابطه تجربی زیر می‌توان حساب کرد:

$$p_E(r, \bar{E}(z)) = 1 - ur \exp(-u\bar{E}(z)) \quad (15)$$

در این رابطه r شعاع داخلی اتاقک یونش برحسب cm (تا $r = 0/35\text{ cm}$)، $u = 0/2155\text{ cm}^{-1}$ ، $\bar{E}(z)$ و انرژی متوسط باریکه الکترون در عمق z است.

$$\bar{E}(z) = \bar{E}_0 [1.36 \sqrt{(1.10 - z/R_p)^2 + 0.30} - 0.67]^{(16)}$$

برای اتاقکهای استوانه‌ای، p_{Co} از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$p_{Co} = \frac{\alpha s_{\text{wall,air}}(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{w,wall}} + (1-\alpha)s_{\text{w,air}}}{S_{\text{w,air}}}$$



| جنس اتاقک | ضخامت پنجره ورودی پرتو | فاصله الکترودها | قطر الکتروود |
|----------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------|
| PMMA با الکترودهای گرافیتی | (118 mg/cm^2) ۱mm | ۲mm | ۱۶mm |

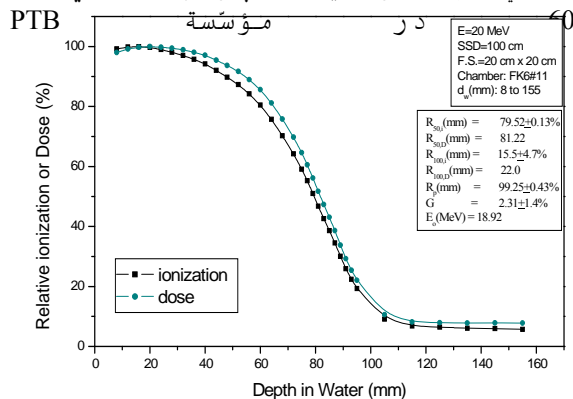
IC10، که درون فانتوم آب در فاصله‌های مساوی و قرینه نسبت به محور مرکزی باریکه به طور ثابت قرار گرفته‌اند، بهنجار شده‌اند. بهنجار کردن این حلقه‌ها به منظور تعیین عمق بیشینه یونش، $R_{100,i}$ ، نصف عمق بیشینه یونش، $R_{50,i}$ ، و بُرد عملی (R_p) کار برده ایم. سپس منحنی توزیع دُز درون آب را، با ضرب کردن مقدار یونش هر عمق در نسبت توان متوقف سازی آب به هوا، $S_{w/a}$ ، در همان عمق ترسیم کرده ایم. انرژی متوسط باریکه در سطح فانتوم، \bar{E}_0 ، که شاخص اصلی کیفیت باریکه الکترون در DIN6800-2 است، نیز با استفاده از رابطه ۸ (یا ۹)، حساب شده است. شکل ۱ نمودارهای توزیع یونش و دُز و همچنین پارامترهای شاخص کیفیت باریکه الکترون 20 MeV را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری منحنی توزیع دُز با یونش در میدان $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ نیز تغییر قابل ملاحظه‌ای را در کیفیت باریکه نسبت به میدان $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ نشان نداده است.

۴- تعیین دُز جذبی آب

۴-۱) سنج‌بندی اتاقک‌های یونش

تعیین دُز جذبی آب در باریکه الکترون 20 MeV ، به وسیله سه اتاقک یونش استوانه‌ای از نوع NE2571، NE2561 و M23332 انجام گرفته است. مشخصات این اتاقک‌ها، همچنین اتاقک یونش استوانه‌ای نوع IC10 که به عنوان اتاقک یونش ناظر به کار رفته است، در جدول ۱ درج شده‌اند.

ابتدا این سه اتاقک را ضمن مقایسه با استاندارد اولیه دُز جذبی آب، در میدان پرتو گامای Co-



بسته به نوع اتاقک بکار رفته، معمولاً در گستره 10^{-12} تا 10^{-10} آمپر است. دستگاه اندازه‌گیری طوری طراحی شده است که می‌توان با آن چنین جریان‌های ضعیفی را با توان تفکیک $\pm 1 \text{ fA}$ اندازه‌گیری کرد. نحوه اندازه‌گیری به این ترتیب است که ابتدا به وسیله تقویت‌کننده‌ای که نوبه آن پایین است ولتاژی متناسب با جریان یونش در گستره بین صفر تا 10 V تولید می‌شود. سپس با یک دستگاه مبذل ولتاژ به بسامد، این ولتاژ به بسامد مناسبی در گستره صفر تا 10 kHz تبدیل می‌گردد. پالس‌های بسامد در خروجی این دستگاه، به وسیله یک شمارنده، که به طور سری به آن متصل است در مدت‌های تعیین شده (معمولاً 30 ثانیه) شمارش می‌شوند. نسبت تعداد پالس‌های شمارش شده به مدت اندازه‌گیری (پس از سنج‌بندی مناسب دستگاه اندازه‌گیری) میانگین بسامد را به دست می‌دهد که از آن می‌توان مقدار متوسط جریان یونش را در مدت اندازه‌گیری تعیین کرد. میانگین‌گیری در بازه زمانی معین این مزیت را دارد که مؤلفه‌های نوبه پربسامد را حذف می‌کند. اندازه‌گیری‌ها در هر عمقی نسبت به اثر قطبش و بازترکیب یونها تصحیح شده‌اند. برای به حداقل رساندن اثر هر گونه تغییر در خروجی شتابدهنده در مدت اندازه‌گیری‌ها، مقادیر یونش اندازه‌گیری شده به وسیله اتاقک FK6 نسبت به مقدار متوسط خوانده شده به وسیله دو اتاقک یونش ناظر^(۶) از نوع Wellhöfer



اینک با قرار دادن $9/925 \text{ cm}$ و $R_p = Z_{ref} = R_{100} = 2/2 \text{ cm}$ در معادله ۱۸، مقدار $k_E' = 0/87701$ را نتیجه می‌گیریم.

برای محاسبه، $k_E'' = (P_E/P_{Co})$ ، ابتدا انرژی متوسط باریکه در عمق مرجع، یعنی $\bar{E}(Z_{ref})$ را از معادله ۱۶ به دست آورده و با قرار دادن آن در معادله ۱۵، P_E را حساب می‌کنیم. P_{Co} نیز از معادله ۱۷ حساب می‌شود. برای تعیین فاکتور k_E در مورد سه اتاقک یونش، نتایج حاصل در جدول ۳ خلاصه شده‌اند.

۳-۴ بررسی اثرهای قطبش و بازترکیب یونها

برای ارزیابی تأثیر قطبش و لتاز اعمال شده بر اتاقکهای یونش و اثر بازترکیب یونها، رفتار همه اتاقکهای یونش بکار رفته در باریکه الکترون 20 MeV را با تغییر دادن ولتاژ بایس در هر دو قطبش (+/-) و ترسیم نمودار بارهای خوانده شده M برحسب $1/V$ (عکس و لتاز) را بررسی کرده ایم. انحراف از رفتار خطی در

شکل ۱- نمودارهای توزیع یونش، دُز و پارامترهای شاخص کیفیت باریکه الکترون 20 MeV سنجه‌بندی کرده ایم. فاصله چشمه تا سطح فانتوم آب 83 cm ، قطر میدان پرتو در سطح فانتوم 10 cm و مرکز اتاقکهای یونش در عمق ۵ سانتیمتری از سطح فانتوم قرار داده شده‌اند. نتایج سنجه‌بندی در شرایط محیطی مرجع (دمای $T=20^\circ \text{C}$ و فشار $P=1013/2 \text{ mb}$) در جدول ۲ مندرج است.

۲-۴ تعیین عامل تصحیح کیفیت باریکه الکترون (k_E)

برای تعیین عامل k_E باید مؤلفه‌های k_E' و k_E'' در رابطه ۳ را جداگانه حساب کنیم: با قرار دادن $\bar{E}_0 = 18/925 \text{ MeV}$ در معادله ۶، مقدار $E_0' = 24/056 \text{ MeV}$ بدست می‌آید. سپس با قرار دادن این مقدار در معادلات ۱۰ و ۱۱ ضرایب a و b در معادله ۵ حساب می‌شوند. بنابراین خواهیم داشت:

$$(18) \quad +0/9677205948$$

$$k_E' = -0/0117434440 \quad (R_p - z)$$

جدول ۱- مشخصات اتاقک‌های یونش استوانه‌ای

| جنس الکتروند مرکزی | جنس و ضخامت دیواره (g/cm^2) | شعاع حفره (mm) | طول حفره (mm) | حجم حفره اتاقک (cm^3) | نوع اتاقک یونش |
|--------------------|--|----------------|---------------|----------------------------------|----------------|
| آلومینیوم | گرافیت، ۰/۰۹ | ۳/۷ | ۹/۲ | ۰/۲۳ | NE 2561 |
| آلومینیوم | گرافیت، ۰/۰۶۵ | ۳/۲ | ۲۴ | ۰/۶ | NE 2571 |
| آلومینیوم | PMMA، ۰/۰۵۴ | ۲/۵ | ۱۸ | ۰/۳ | PTW M23332 |
| آلومینیوم | C-522، ۰/۰۶۸ | ۳/۰ | ۶/۳ | ۰/۱۴ | Wellhöfer IC10 |

جدول ۲- فاکتورهای سنجه‌بندی اتاقکهای یونش برحسب دز جذبی آب در میدان پرتو Co-60

| اتاقک یونش | ولتاژ (volts) | $N_{D,w,Co} (\times 10^6 \text{ Gy/C})$ |
|--------------------------|---------------|---|
| NE2571 #2906، 0.6 cc | +250 | 45/274 |
| NPL NE2561 #244، 0.33 cc | 0 | 101/96 |
| M23332 #272، 0.3 cc | | 111/875 |

جدول ۳- تعیین عامل تصحیح کیفیت باریکه الکترون برای اتاقکهای یونش

| اتاقک یونش | NE2571 | NE2561 | M23332 |
|--------------------------|---------|---------|---------|
| p_E | ۰/۹۸۷۵۱ | ۰/۹۸۵۵۶ | ۰/۹۹۰۲۴ |
| p_{Co} | ۰/۹۹۲۲ | ۰/۹۹۰۲ | ۱/۰۰۱۶ |
| k_E'' | ۰/۹۹۵۳ | ۰/۹۹۵۳ | ۰/۹۸۸۷ |
| $k_E = k_E' \cdot k_E''$ | ۰/۸۷۲۹ | ۰/۸۷۲۹ | ۰/۸۶۷۱ |



در نظر گرفتن نسبت دو ولتاژ $(V_1/V_2=3)$ در جدول ۴ مندرج است.

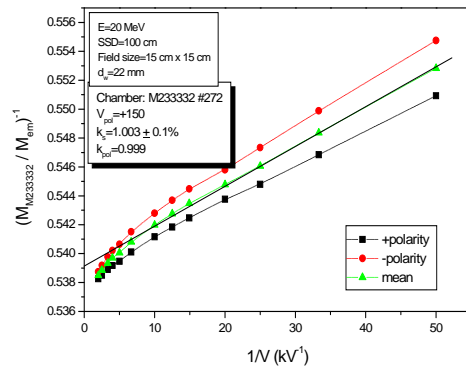
۴-۴ اندازه‌گیری دُز جذبی آب و سنجه بِندي اتاقلکهاي يونس ناظر

با استفاده از داده‌های پیشین، پاسخ سه اتاقلک یونس NE2571، NE2561 و M23332 را برحسب دُز جذبی آب در باریکه الکترون ۲۰ MeV بر طبق مندرجات جدول ۵ تعیین کرده ایم.

این سه اتاقلک برای سنجه‌بندی باریکه الکترون ۲۰ MeV برحسب دُز جذبی آب در شرایط مرجع $100 \text{ cm} = 100 \text{ cm}$ SSD، ابعاد میدان پرتو در سطح فانتوم $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ و عمق آب $z_{ref} = 22 \text{ cm}$ انتخاب شده‌اند. منظور اصلی در واقع، سنجه‌بندی مقدار متوسط بار الکتریکی خوانده شده به وسیله دو اتاقلک یونس ناظر بوده است. اندازه‌گیری‌ها بیش از ۸۰ مورد، هر یک به مدت ۱۶۰ ثانیه با اتاقلک یونس NE2571 انجام گرفته است. با وجود بیش از ۱٪ تغییر در خروجی شتاب‌دهنده، در مدتی حدود ۴ ساعت اندازه‌گیری، پاسخ این اتاقلک یونس نسبت به متوسط پاسخ اتاقلک‌های ناظر تا حدود ۰/۰۳٪ پایدار بوده است (شکل ۳).

مشابهی با اتاقلک‌های یونس NE2561 و

ولتاژهای بالا در اکثر اتاقلک‌های یونس نشان می‌دهد که منحنی اشباع به شکل یک منحنی اشباع واقعی نیست بلکه پاسخ کلی هر اتاقلک را نسبت به تغییر ولتاژ نشان می‌دهد. برای به دست آوردن ولتاژ کار مناسب و فاکتورهای تصحیح قطبش و بازترکیب یونها، بخش خطی منحنی‌های اشباع را بکار برده ایم (سنجه‌بندی اتاقلک‌های یونس در میدان پرتو Co-60 در واقع بعد از این آزمایش انجام شده است). منحنی اشباع اتاقلک یونس M23332، به عنوان نمونه، در شکل ۲ نشان داده شده است. عامل‌های تصحیح ناشی از تغییر قطبش و ولتاژ کار مناسب هر اتاقلک (k_p) و بازترکیب یونها (k_s) با استفاده از روش دو ولتاژ (معادله ۲) و



شکل ۲- پاسخ اتاقلک یونس PTW M23332 برحسب تابعی از ولتاژ در باریکه الکترون ۲۰ MeV

جدول ۴- عامل‌های تصحیح k_p و k_s

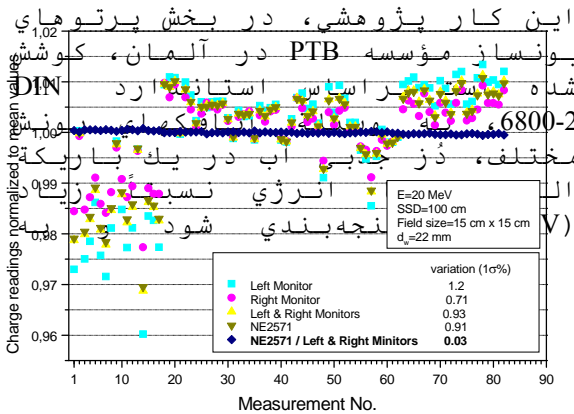
| اتاقلک یونس | NE2561 | NE2571 | M23332 | FK6 | IC10 |
|-------------|--------|--------|--------|-------|-------|
| k_p | ۱/۰۰۳ | ۱/۰۰۰ | ۰/۹۹۹ | ۱/۰۰۰ | ۱/۰۰۲ |
| k_s | ۱/۰۰۸ | ۱/۰۰۶ | ۱/۰۰۳ | ۱/۰۰۵ | ۱/۰۰۴ |





جدول ۵- پاسخ اتاقکهای یونش استوانه‌ای در باریکه الکترون ۲۰ MeV برحسب دز جذبی آب

| اتاقک یونش | k_r ($\pm\%0/3$) | k_s ($\pm\%0/1$) | k_p ($\pm\%0/1$) | k_E ($\pm\%1/10$) | $N_{D,w,Co}$ ($\pm\%0/7$) ($\times 10^{-6} Gy/C$) | $N_{D,w,20MeV}$ ($\pm\%0/7$) ($\times 10^{-6} Gy/C$) |
|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--|---|
| NE2571 | ۱/۰۰۸ | ۱/۰۰۶ | ۱/۰۰۰۲۲ | ۰/۸۷۲۹ | ۴۵/۲۷۴ | ۴۰/۰۸۴ |
| NE2561 | ۱/۰۰۹ | ۱/۰۰۸ | ۱/۰۰۰۲۸ | ۰/۸۷۲۹ | ۱۰۱/۹۶ | ۹۰/۷۷۴ |
| M23332 | ۱/۰۰۶ | ۱/۰۰۳ | ۰/۹۹۸۷ | ۰/۸۶۷۰۶ | ۱۱۱/۸۷۵ | ۹۷/۶۸۱ |



شکل ۳- پایداری پاسخ اتاقک یونش NE2571 نسبت به اتاقک یونش ناظر

عنوان میدان مرجع برای باریکه‌های مورد استفاده در پرتودرمانی معرفی گردد. دقت تعیین مقدار دز جذبی در ارزیابی مقدماتی، در همان حدی است که قبلاً در بخش دزیمتري استاندارد برای تعیین دز جذبی باریکه‌های الکترون، بر اساس دستور کار آژانس بین المللی انرژی اتمی (IAEA)، برآورد کرده ایم [۵].

جدول ۶- سنجه بندی اتاقکهای یونش ناظر در باریکه الکترون ۲۰ MeV

| اتاقک یونش | $N_{MonL\&R}$ (cGy/nC) |
|------------|------------------------|
| NE2571 | ۱۸/۱۷۸۵ |
| NE2561 | ۱۸/۱۴۸۸ |
| M23332 | ۱۸/۰۹۶۳ |
| میانگین | $18/1412 \pm \%0/23$ |

جدول ۷- برآورد خطاها در سنجه‌بندی دز جذبی آب در باریکه الکترون

| خطا (انحراف معیار) | کمیت فیزیکی یا روش |
|--------------------|--------------------|
| $\pm 1\sigma$ % | $N_{D,w,Co}$ |
| ۰/۷ | |

M23332 نیز انجام گرفته است.

برای بدست آوردن ضریب سنجه‌بندی اتاقکهای یونش رابطه زیر بکار رفته است:

$$N_{Mon L\&R} = N_{D,w,20MeV} \cdot \frac{M_{chamber}}{M_{Mon L\&R}} \quad (19)$$

$M_{Mon L\&R}$ مقدار متوسط خوانده شده به وسیله اتاقکهای یونش ناظر است که تصحیحات مربوط به کمیتهای تأثیرگذار

(k_p, k_s, k_r) در مورد آن اعمال شده است. فاکتور $N_{Mon L\&R}$ در واقع مقدار متوسط دز جذبی آب را در شرایط مرجع، به ازای هر کولن بار الکتریکی گردآوری شده به وسیله اتاقکهای یونش ناظر، بدست می‌دهد. نتایج سنجه‌بندی اتاقکهای یونش ناظر به وسیله هر سه اتاقک یونش که برای تعیین دز جذبی آب در محور مرکزی باریکه در شرایط مرجع $SSD=100\text{ cm}$ ، اندازه میدان در سطح فانتوم $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ، عمق مرجع 22 mm ، $Z_{ref} = 20^\circ\text{C}$ و فشار هوای $1013/2\text{ mb}$ بکار رفته، در جدول ۶ عرضه شده است.

برای برآورد خطای کلی در سنجه بندی دز جذبی، باید خطای اندازه‌گیری هر یک از اجزای معادله ۱۹، به ویژه خطاهای برآورد شده در پاسخ اتاقکهای یونش استوانه‌ای را در نظر بگیریم. گرچه تعیین دقیق خطاهای وارد شده در اندازه‌گیری‌ها مستلزم بررسی بیشتری است، ولی به منظور برآورد بیشینه خطای کلی، خطاهای مندرج در جدول ۷ را در نظر گرفته ایم.

۵- نتیجه‌گیری

تأمین میدان‌های مرجع پرتوهای یونساز از اولویتهایی است که هر مرکز دزیمتري استاندارد در برنامه کار خود قرار می‌دهد. در



| | |
|-------|------------------|
| ۰/۴ | تأمین شرایط مرجع |
| ≈ ۱/۴ | خطای کلی |

پینوشتها :

- ۱ - Physikalisch-Technische Bundesanstalt
 ۲ - Plane-parallel ionization chamber
 ۳ - Cylindrical ionization chamber

| | | |
|-----|----------------------|---------|
| ۰/۵ | k_E' k_E'' | } k_E |
| ۰/۹ | | |
| ۰/۳ | k_r | |
| ۰/۱ | $M_{ch}/M_{MonL\&R}$ | |
| ۰/۲ | $k_p k_s k_{kp}$ | |

۷

- ε - Polarity effect
 o - Ion recombination
 ۱ - Monitor chamber

References:

- International Atomic Energy Agency, "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).
 - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, "Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung, Teil 2: Ionisationsdosimetrie," Deutsche Norm DIN 6800-2, DIN, Berlin (1997).
 - 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).
 - H. Feist, "Determination of absorbed dose to water for high energy photons and electrons by total absorption of electrons in ferrous sulphate solution," Phys. Med. Biol. **27**, 1435-1447 (1982).
۵. ع. سلیمانان و همکاران، "دزیتمتری باریکه های فوتون و الکترون در پرتودرمانی براساس استانداردهای دُز جذبی آب،" نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۲۳، ۱-۱۶، (۱۳۸۰).