



یک روش جدید برای اندازه‌گیری طیف انرژی باریکه‌ی الکترونی

فرهود ضیایی*^۱، مریم امینی^۲، سید مهدی هاشمی^۱

۱. پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۳۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران
۲. دانشکده‌ی علوم پایه، گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران - ایران

چکیده: به منظور محاسبه‌ی طیف انرژی باریکه‌ی الکترونی با استفاده از منحنی دز-عمق از یک روش ابتکاری استفاده شد. توزیع دز-عمق باریکه‌ی الکترونی با انرژی‌های اولیه‌ی متفاوت حاصل از یک شتاب‌دهنده‌ی الکترون پس از عبور از یک صفحه‌ی سربی پراکننده، با استفاده از دزیتر اتاقک یونش با صفحه‌های موازی کنترل شونده با کامپیوتر در داخل فانتوم آب اندازه‌گیری شد. منحنی‌های دز-عمق حاصل از الکترون‌ها به عنوان داده‌های اولیه، برای محاسبه‌ی طیف انرژی آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این طیف، با توجه به این که منحنی دز-عمق تجربی به دست آمده ترکیبی از منحنی‌های مشابه الکترون‌های تک انرژی است، با بهره‌گیری از روش‌های ریاضی مبتنی بر اصل برهم نهی محاسبه شد. از طرفی منحنی‌های دز-عمق برای الکترون‌های کاملاً تک انرژی به وسیله‌ی کد محاسباتی EGS4 محاسبه شد. نتایج برای باریکه‌های الکترونی با انرژی اولیه‌ی ۸، ۱۲ و ۱۸ مگا الکترون ولت به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: باریکه‌ی الکترونی، طیف انرژی، کد EGS4، اصل برهم نهی

A New Method to Measure the Electron Beam Energy Spectrum

F. Ziaie*¹, M. Amini², S.M. Hashemi¹

1. Research School of Radiation Applications, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran
2. Department of Physics, Faculty of Science, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran - Iran

Abstract: An innovative method has been used to calculate electron beam energy spectrum using depth-dose curve. The depth-dose distributions of the electron beam with different primary energies emerging from the electron accelerator were measured in water phantom after passing through a lead scatterer plate, using a computer-controlled plane-parallel chamber dosimetry system. The obtained depth-dose curves of the electrons were considered as the primary data to calculate the electron beam energy spectrum. Considering that the empirical depth-dose curve is a combination of the single-energy electron depth-dose curves, the electron energy spectrums were calculated via mathematical methods based on the superposition principle. The depth-dose curves for single-energy electrons were also calculated using the EGS4 computer code. The results for the energies of the electron beams were found to be 8, 12, and 18MeV.

Keywords: Electron Beam, Energy Spectrum, EGS4, Superposition Principle



۱. مقدمه

پس از کشف پرتو ایکس توسط رونتگن^(۱) در سال ۱۸۹۵ و پرتو زایی توسط بکرل^(۲) در سال ۱۸۹۶ بشر همواره در فکر بهره‌برداری از خواص ویژه‌ی پرتوهای یوننده به ویژه در تشخیص و درمان بوده است. پس از پی بردن به اثرات پرتوهای یوننده در کنترل و مهار رشد سلول‌های سرطانی، استفاده از پرتو در درمان تومورهای بدخیم آغاز شد، و بدین ترتیب علم پرتو درمانی یا رادیوتراپی^(۳) پایه‌ریزی شد. درمان با استفاده از باریکه‌ی الکترونی نیز یک روش پرتو درمانی حایز اهمیت است که بیش از ۵۰ سال قدمت دارد. اعمال توزیع دز یکنواخت به حجم درمان و محافظت بافت‌های سالم زیرین از آسیب‌های پرتوی، از مهم‌ترین مزایای درمان با باریکه‌های الکترونی است که می‌تواند با استفاده از روش‌های طرح درمانی مناسب، اهداف پرتو درمانی را فراهم سازد. به طور کلی پرتو درمانی عبارت است از به کارگیری پرتوهای یوننده برای از بین بردن و یا مهار سلول‌های سرطانی. با توجه به این‌که هدف پرتو درمانی رساندن حداکثر دز به سلول‌ها و بافت‌های سرطانی و حداقل دز به بافت‌های سالم است، روش‌های مختلف پرتو درمانی برای رسیدن به این هدف توسعه یافته‌اند. امروزه پرتو درمانی با فوتون‌ها (ی ایکس و گاما) و ذرات (الکترون، پروتون، نوترون) انجام می‌شود. از باریکه‌های الکترونی به تنهایی یا به صورت ترکیب با فوتون‌ها به طور گسترده در درمان بیماران سرطانی در سراسر دنیا استفاده می‌شود [۱].

تأثیر عامل‌های مؤثر بر توزیع دز و به ویژه اثر ناهمگنی بافت‌ها و بررسی توزیع دز در فصل مشترک بافت‌های مختلف و تلاش برای استفاده از روش مونت کارلو در سیستم‌های طرح درمان، از دیگر زمینه‌های مطالعاتی است. شبیه‌سازی باریکه‌های الکترونی در دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی آغاز شد. روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری دز جذبی باریکه‌ی الکترونی وجود دارد که از بین این روش‌ها استفاده از دزیمترهای حالت جامد و دزیمتر اتاقک یونش با صفحه‌های موازی در مراکز پرتو درمانی مجهز به شتاب‌دهنده‌ی الکترون مرسوم است. در پرتو درمانی، شبیه‌سازی شامل ۲ مرحله است: مرحله‌ی اول شبیه‌سازی چشمه‌ی پرتوزا که می‌تواند شتاب‌دهنده‌ی خطی، کبالت یا هر چشمه‌ی دیگری باشد و مرحله‌ی دوم شامل شبیه‌سازی بیمار و بررسی پارامترهای مختلف توزیع دز در آن است [۲].

در کار حاضر ابتدا با استفاده از روش‌های دزیمتری به اندازه‌گیری توزیع دز- عمق برای انرژی‌های مختلف الکترون در فانتوم آب^(۴) پرداخته شد. منحنی‌های دز- عمق حاصل از الکترون‌های دارای طیف انرژی به عنوان داده‌های اولیه مورد استفاده قرار گرفتند. سپس منحنی دز- عمق برای الکترون‌های کاملاً تک انرژی توسط کد محاسباتی EGS۴ محاسبه و با استفاده از روش‌های ریاضی، طیف انرژی الکترون‌ها با تقریب خوبی محاسبه شد [۳].

۲. اندازه‌گیری‌های تجربی

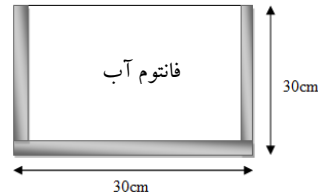
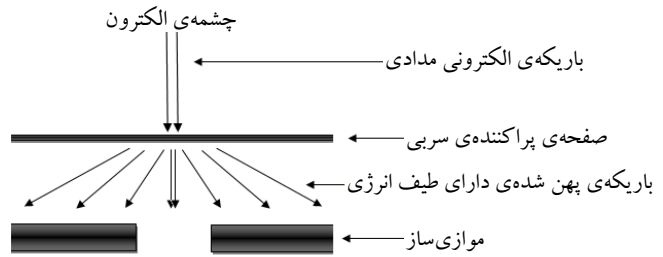
روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری دز جذبی باریکه‌ی الکترونی وجود دارد. در این کار تجربی از دزیمتری اتاقک‌های یونش با صفحه‌های موازی استفاده شد. این دزیمترها به وسیله‌ی کامپیوتر کنترل شده و در داخل فانتوم آب در سه بعد قادر به حرکت بودند. لذا توزیع دز در محیط آب در سه بعد برای انرژی‌های مختلف الکترون قابل اندازه‌گیری بود [۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹].

فانتوم آبی با ابعاد $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). بدنه‌ی این فانتوم، که یکی از ابزارهای استاندارد سیستم‌های دزیمتری در شتاب‌دهنده‌های الکترون بوده و در اندازه‌گیری‌های روزمره‌ی کنترل کیفی به کار می‌رود، از ماده‌ی پلکسی گلاس ساخته شده، است. چیدمان ابزارهای اندازه‌گیری تجربی توزیع سه بعدی دز در فانتوم آب در شکل ۱ ملاحظه می‌شود. الکترون‌ها پس از تولید به وسیله‌ی چشمه، به شکل باریکه‌ی الکترونی خارج می‌شوند. در شتاب‌دهنده‌های درمانی خطی، الکترون‌ها در محدوده‌ی انرژی مگا الکترون ولت تولید می‌شوند. عموماً الکترون‌های خروجی در شتاب‌دهنده‌های درمانی دارای مقطعی با اندازه‌های بسیار کوچک بوده (باریکه‌ی مدادی^(۵)) و تقریباً تک انرژی هستند. این نوع باریکه‌ها قابلیت درمان تومورهای با اندازه‌های وسیع را ندارند، لذا از صفحه‌ی پراکننده‌ی سری استفاده به عنوان پراکننده برای تبدیل باریکه‌ی الکترونی مدادی شکل به یک باریکه‌ی پهن، که از نظر اندازه مناسب درمان باشد، استفاده می‌شود. ورقه‌های پراکننده‌ی جدید به گونه‌ای طراحی می‌شوند که بتوانند باریکه را بدون تولید مقادیر غیرقابل قبول تابش ترمزی با کاهش خیلی زیاد انرژی باریکه، پراکنده کنند. این ورقه‌ی پراکننده معمولاً از جنس سرب

میدان الکترونی به طور چشم‌گیری به نحوه‌ی محدودسازی باریکه‌ی پرتو به علت پراکندگی الکترون‌ها وابسته است. میزان دز جذبی در بیمار وابسته به عمق نفوذ الکترون در زمان برخورد باریکه‌ی الکترونی به بیمار است که این خود وابسته به شرایطی از جمله انرژی باریکه، عمق^(۸)، ابعاد میدان^(۹)، فاصله‌ی چشمه از سطح فانتوم، و سیستم موازی‌سازی باریکه خواهد بود. بنابراین محاسبه‌ی دز در بیمار متضمن در نظر گرفتن این شاخص‌ها است و این عامل‌ها بر روی توزیع دز- عمق اثرگذار خواهند بود [۴].

اندازه‌ی میدان یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی درمان است. چنانچه در منحنی‌های دز- عمق شکل ۲ ملاحظه می‌شود با افزایش اندازه‌ی میدان درصد دز عمقی افزایش می‌یابد. یعنی، شیب منحنی از سطح به سمت بیشینه به دلیل افزایش اثر انباشت^(۱۰) زیاد می‌شود، به طوری که برای میدان‌های کوچک‌تر، عمق نقطه‌ی دز بیشینه به سمت سطح جابه‌جا می‌شود. هم‌چنین با افزایش میدان، پهنای توزیع دز در فانتوم افزایش می‌یابد. هر عرض میدانی را می‌توان برای تولید توزیع دز قابل قبول در درمان استفاده نمود، میدان‌های کوچک‌تر آهنگ دز کم‌تری دارند. استفاده از میدان‌های کوچک باعث می‌شود که باریکه‌ی پرتو تقریباً به صورت عمود بر سطح بتابد و بنابراین دزیمتری ساده‌تر خواهد شد. با افزایش ابعاد میدان سهم تابش پراکنده شده در دز جذبی افزایش می‌یابد. در این صورت امکان درمان تومورهای سرطانی در اندازه‌های وسیع‌تر فراهم می‌شود. به منظور بررسی طیف انرژی الکترون، اندازه‌گیری دز- عمق در شرایط اندازه‌ای یکسان با انرژی‌های اولیه متفاوت به انجام رسید.

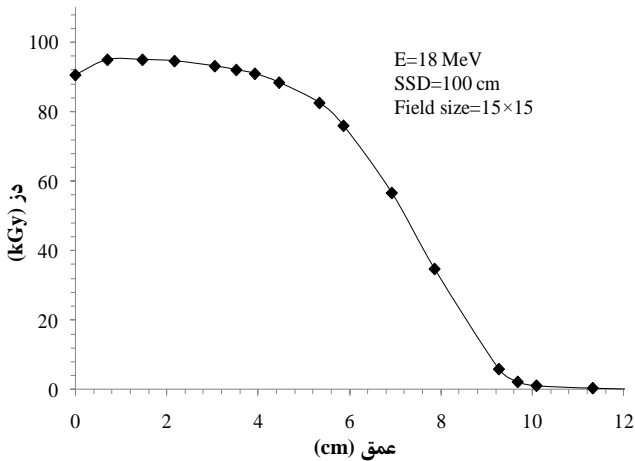
چنانچه پیش از این نیز ذکر شد، الکترون‌های تک انرژی خروجی از شتاب‌دهنده به صفحه‌ی سربی با ضخامت یکنواخت و ثابت برخورد نموده و پس از عبور از پنجره‌ای با ابعاد ثابت وارد فانتوم آب می‌شوند. لذا منحنی دز- عمق اندازه‌گیری شده ناشی از طیفی از الکترون‌ها خواهد بود که اثرهای آن به گونه‌ای در این منحنی مستتر است. شکل‌های ۳ الی ۵ منحنی دز- عمق به دست آمده در فانتوم آب برای الکترون‌های عبور کرده از صفحه‌ی پراکنده با انرژی‌های اولیه‌ی، به ترتیب، ۸، ۱۲ و ۱۸ MeV را نمایش می‌دهند. چنانچه ملاحظه می‌شود در منحنی‌های دز- عمق الکترون‌ها، با افزایش انرژی، عمق نفوذ در داخل آب افزایش پیدا کرده است. از این نتایج تجربی برای تعیین سهم یا ضریب وزنی هر بازه‌ی انرژی در طیف مربوطه استفاده خواهد شد.



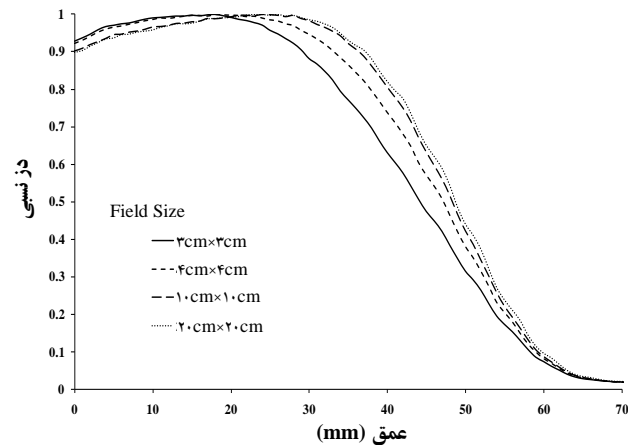
شکل ۱. چیدمان ابزارها برای اندازه‌گیری تجربی توزیع سه بعدی دز در فانتوم آب.

است، اگرچه تنگستن و اورانیم، استیل، آلومینیم یا ترکیبی از این‌ها نیز استفاده می‌شود. در کار حاضر از صفحه‌ی پراکنده‌ی سربی به ضخامت ۰/۰۱ سانتی‌متر استفاده شده است [۱۰، ۱۱]. نکته‌ی حایز اهمیت که اساس این کار تجربی به حساب می‌آید اثر دیگر لایه‌ی پراکنده‌ی سربی است. هنگامی که الکترون‌ها از لایه‌ی سربی عبور می‌کنند، علاوه بر پراکنده شدن و پوشش دادن فضایی وسیع‌تر، انرژی آن‌ها نیز در اثر پراکندگی در محیط سرب و برهم‌کنش‌های کولنی با اتم‌های آن تغییر می‌کند. لذا با نگاهی آماری می‌توان دریافت که الکترون‌ها پس از عبور از صفحه‌ی سربی، تک انرژی نبوده و قطعاً دارای طیفی از انرژی خواهند بود. هدف این پروژه بررسی طیف انرژی این الکترون‌ها است. البته ذکر این نکته ضروری است که بسیاری از شتاب‌دهنده‌های صنعتی الکترون با توجه به نحوه‌ی عملکرد سیستم خود، مستقیماً باریکه‌ی الکترونی با طیفی از انرژی تولید می‌نمایند؛ از روش حاضر در برآورد طیف انرژی آن‌ها نیز می‌توان استفاده نمود.

در مرحله‌ی بعد، موازی‌سازی باریکه‌ی الکترونی انجام و در نهایت باریکه‌ی کنترل شده از یک طرف به بیمار تابیده می‌شود. برای شکل‌دهی باریکه‌های الکترونی از موازی‌ساز^(۶) استفاده می‌شود. موازی‌ساز شامل دو جفت صفحه‌ی سربی یا تنگستن است که قابل تنظیم بوده و می‌تواند یک میدان $0\text{ cm} \times 0\text{ cm}$ تا بیشینه‌ی $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ در سطح فانتوم در فاصله‌ی ۱۰۰ سانتی‌متری (SSD)^(۷) از چشمه را تأمین کند. توزیع دز در یک



شکل ۵. منحنی دز- عمق الکترون‌های حاصل از باریکه‌ی اولیه به انرژی ۱۸ MeV.

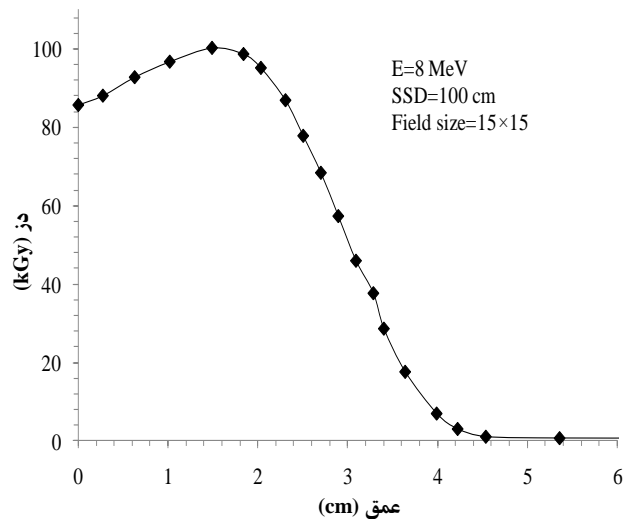


شکل ۲. منحنی تغییرات دز- عمق باریکه‌های الکترونی ۱۲ MeV خروجی از پنجره‌های با ابعاد متفاوت، در آب.

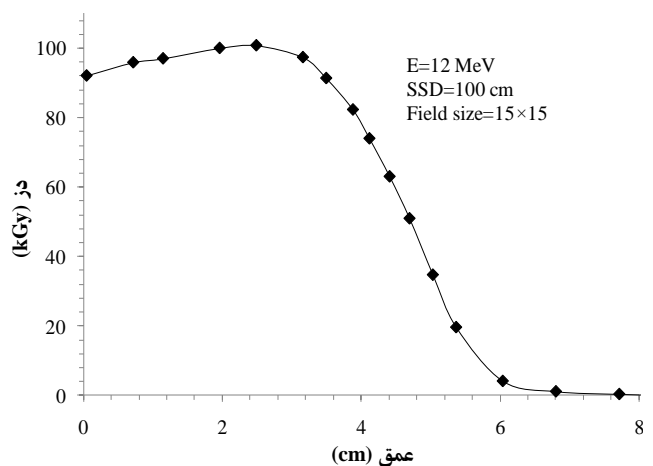
۳. روش انجام محاسبات

منحنی‌های دز- عمق با استفاده از شبیه‌سازی با کد محاسباتی EGS۴ برای باریکه‌های تک انرژی ۱-۱۸ MeV در فانتوم آب محاسبه و مطابق شکل ۶ ترسیم شدند [۳]. با استفاده از منحنی دز- عمق تجربی که حاصل برهم نهی انرژی‌های مختلف است می‌توان سهم هر انرژی را به دست آورد. بدین منظور سطح زیر منحنی به تعداد معینی بازه تقسیم می‌شود. هر چه مقدار فاصله‌های در نظر گرفته کوچک‌تر باشد توان تفکیک طیف به دست آمده بیش‌تر خواهد شد. به طور مثال و مطابق شکل ۷ اگر منحنی دز- عمق تجربی شکل ۳ به ۸ قسمت تقسیم شود، باید ۸ منحنی دز- عمق تک انرژی با انرژی‌های ۱، ۲، ۳، ... و ۸ مگا الکترون ولت با استفاده از کد EGS۴ تولید شود. از طرفی هر کدام از این منحنی‌ها نیز باید در گستره‌ی صفر تا ۶ cm، مطابق شکل ۷، به ۸ قسمت تقسیم شده و سهم منحنی در هر کدام از بازه‌ها تعیین شود. اساس این روش در این مطلب نهفته است که مقدار منحنی دز- عمق تجربی در هر یک از بازه‌های تقسیم‌بندی شده ترکیب خطی از مقادیر همان بازه در منحنی‌های تک انرژی قرار داده می‌شود. از این رو دستگاه معادله‌ی $n \times n$ (در این مثال 8×8) تشکیل شده و مجهول‌های این دستگاه عبارت خواهد بود از سهم هر کدام از این انرژی‌ها در تشکیل منحنی طیف انرژی (معادله‌ی (۱)).

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \\ E_7 \\ E_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} & C_{17} & C_{18} \\ C_{21} & . & . & . & . & . & . & . \\ C_{31} & . & . & . & . & . & . & . \\ C_{41} & . & . & . & . & . & . & . \\ C_{51} & . & . & . & . & . & . & . \\ C_{61} & . & . & . & . & . & . & . \\ C_{71} & . & . & . & . & . & . & . \\ C_{81} & . & . & . & . & . & . & C_{88} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \end{bmatrix} \quad (1)$$



شکل ۳. منحنی دز- عمق الکترون‌های حاصل از باریکه‌ی اولیه به انرژی ۸ MeV.



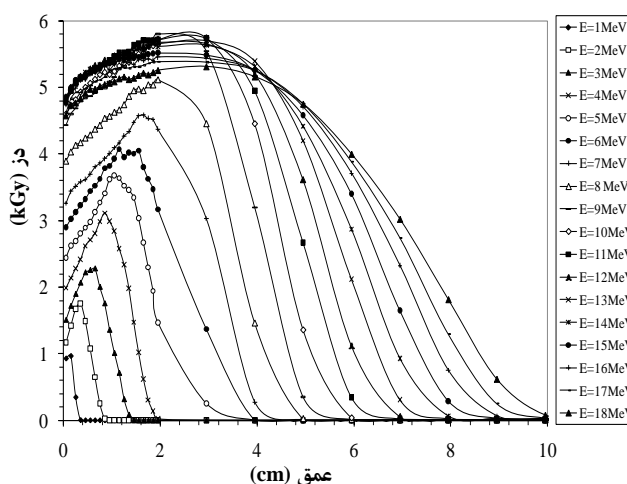
شکل ۴. منحنی دز- عمق الکترون‌های حاصل از باریکه‌ی اولیه به انرژی ۱۲ MeV.

چند مجهولی، منحنی‌های دز- عمق الکترون‌های تک انرژی لازم مورد استفاده قرار گرفته و هر کدام نیز براساس تعداد بازه‌ی منحنی تجربی متناظر به قسمت‌های مساوی تقسیم شدند. داده‌های استخراج شده از منحنی‌های دز- عمق الکترون‌های تک انرژی به عنوان ضریب‌های X در جدول‌های ۱ تا ۳ (C_{ij}) و مقدارهای عددی ماتریس پاسخ یعنی داده‌های استخراج شده از منحنی دز- عمق تجربی (E_j) حاصل از الکترون‌هایی با طیف انرژی، به علاوه مرزبندی بازه‌های انرژی در جدول‌های ۴ تا ۶ درج شده است.

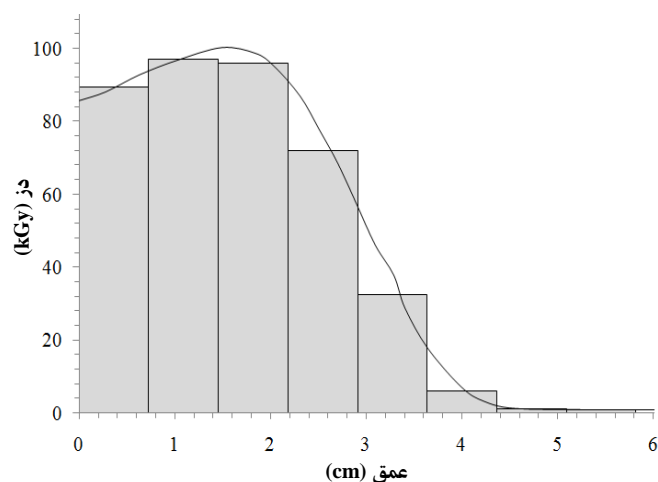
با در دست داشتن داده‌های جدول‌های فوق، ماتریس‌های معادله‌ی (۱) تشکیل شده و نهایتاً سه دستگاه معادله‌ی 8×8 ، 12×12 و 18×18 حاصل شد. برای حل این دستگاه‌ها از یک برنامه‌ی کامپیوتری استفاده شد. نتیجه‌های حاصل برای ضریب وزنی در هر بازه‌ی انرژی یا به عبارتی طیف انرژی الکترون، در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ رسم شده است.

چنانچه پیش از این ذکر شد، باریکه‌ی الکترونی خروجی از شتاب‌دهنده‌ی الکترون مستقیماً با هدف برخورد نکرده و پیش از آن با یک صفحه‌ی پراکننده برخورد می‌کند که باعث پهن شدن باریکه و هم‌چنین تولید یک شار یکنواخت الکترونی در ناحیه‌ی تحت درمان می‌شود. ضخامت صفحه‌ی پراکننده طوری است که بیش‌تر الکترون‌ها به جای تولید تابش ترمزی، پراکنده می‌شوند. بخش کوچکی از انرژی کل نیز به تابش ترمزی تبدیل می‌شود که به صورت پرتوهای ایکس آلوده‌کننده‌ی باریکه‌ی الکترونی ظاهر می‌شود. البته سهم تابش ترمزی به علت ضخامت کم صفحه‌ی پراکننده بسیار کم است [۳]. همان‌گونه که مشاهده می‌شود طیف‌های انرژی حاصل، نشان‌دهنده‌ی برهم‌کنش کولنی الکترون‌ها در صفحه‌ی سربی و توزیع الکترون‌ها در انرژی‌های پایین‌تر است.

با توجه به این‌که شکل طیف انرژی الکترون‌ها به دلیل تناسب عمق نفوذ با انرژی آن‌ها، تعیین‌کننده‌ی چگونگی توزیع دز- عمق پرتوهای الکترونی در محیط تحت تابش است، تبدیل الکترون تک انرژی به باریکه‌ای با طیفی از انرژی باعث ایجاد توزیع یکنواخت‌تری در فاصله‌ی سطح هدف تا محل تشکیل قله در منحنی دز- عمق حاصل می‌شود. این امر تغییر شکل منحنی‌های دز- عمق تجربی (شکل‌های ۳ تا ۵) را در مقایسه با نتایج متناظر در حالت تک انرژی (شکل ۶) توجیه می‌کند.



شکل ۶. منحنی دز- عمق الکترون‌های تک انرژی شبیه‌سازی شده در فانتوم آب توسط کد EGS۴



شکل ۷. نحوه‌ی تقسیم‌بندی منحنی‌های دز- عمق و تعیین مقدار یا سهم هر یک از بازه‌ها برای نتایج تجربی و محاسباتی (مثال برای انرژی ۸ MeV برای تشکیل دستگاه معادلات 8×8).

که در آن، $E_{j=1-n}$ مقدار منحنی دز- عمق تجربی در هر یک از بازه‌های تقسیم‌بندی شده، $C_{i=1-n, j=1-n}$ ضریب وزنی منحنی‌های تک انرژی، $X_{i=1-n}$ مجهول‌ها یا سهم هر کدام از این انرژی‌ها در تشکیل طیف انرژی، n درجه‌ی دستگاه معادله‌ی چند مجهولی (تعداد بازه‌های انرژی در نظر گرفته شده)، i شماره‌ی بازه‌ی انرژی منحنی دز- عمق تجربی ($i_{max}=n$)، j شماره‌ی بازه‌ی انرژی منحنی‌های دز- عمق تک انرژی حاصل از شبیه‌سازی ($j_{max}=n$).

۴. نتایج و بحث

همان‌گونه که ذکر شد منحنی‌های دز- عمق الکترون‌های ۸، ۱۲ و ۱۸ MeV (دارای طیف انرژی)، به ترتیب، به ۸، ۱۲ و ۱۸ قسمت مساوی تقسیم شدند. به منظور تشکیل دستگاه معادله‌ی



جدول ۱. داده‌ی استخراج شده از منحنی دز- عمق الکترون‌های تک انرژی (C_{ij}) برای محاسبه‌ی طیف انرژی الکترون‌های AMeV

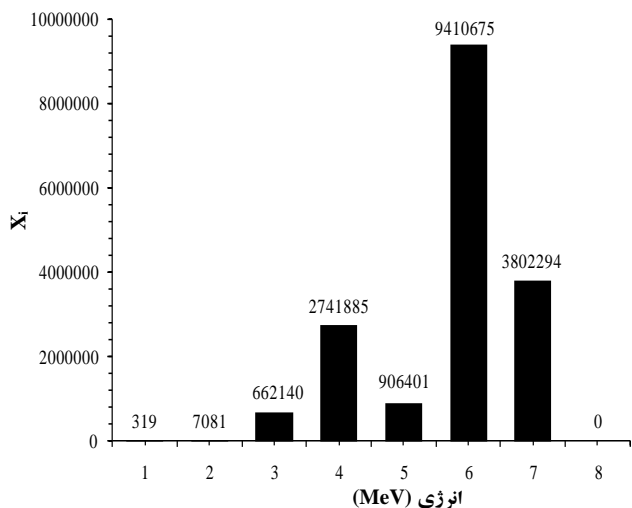
انرژی الکترون (MeV)								شماره‌ی بازه
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۴,۰۹	۳,۶۶	۳,۳۵	۳,۰۸	۲,۴۱	۱,۷۴	۱,۱۹	۰,۲۸	۱
۴,۶۸	۴,۲۱	۳,۸۱	۳,۲۳	۲,۱۱	۱	۰,۰۴	۰	۲
۵,۰۵	۴,۴۲	۳,۳۳	۱,۸۹	۰,۹۲	۰,۰۱	۰	۰	۳
۴,۷	۳,۶۸	۲,۰۴	۰,۵۵	۰,۲۹	۰	۰	۰	۴
۳,۱۸	۱,۹۹	۰,۹۵	۰,۱۸	۰	۰	۰	۰	۵
۱,۲۲	۰,۴۸	۰,۲۸	۰	۰	۰	۰	۰	۶
۰,۲۴	۰,۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷
۰,۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸

جدول ۲. داده‌ی استخراج شده از منحنی دز- عمق الکترون‌های تک انرژی (C_{ij}) برای محاسبه‌ی طیف انرژی الکترون‌های ۱۲MeV

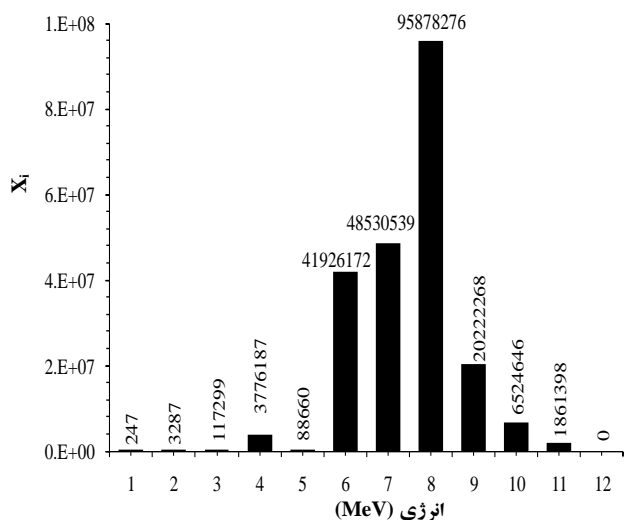
انرژی الکترون (MeV)											شماره‌ی بازه	
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲		۱
۵,۰۴	۵,۰۳	۴,۷۸	۴,۶۶	۴,۰۷	۳,۵۷	۳,۲۹	۳,۰۱	۲,۳۸	۱,۹۹	۱,۳۲	۰,۳۸	۱
۵,۴۴	۵,۴۳	۵,۲۵	۵,۱۵	۴,۶	۴,۰۸	۳,۸	۳,۳۴	۲,۴۴	۱,۱۹	۰,۰۷	۰	۲
۵,۶۱	۵,۶۶	۵,۵۶	۵,۵۸	۴,۹۹	۴,۴۱	۳,۶۲	۲,۴۴	۱,۰۳	۰,۰۳	۰	۰	۳
۵,۷۶	۵,۸۱	۵,۸۷	۵,۸	۵,۰۱	۴,۰۶	۲,۵۶	۰,۷۹	۰,۰۳	۰	۰	۰	۴
۵,۷۷	۵,۷۲	۵,۷۳	۵,۳۳	۴,۱	۲,۸۵	۱,۴۲	۰,۵۹	۰	۰	۰	۰	۵
۵,۴۲	۵,۱۹	۴,۸۱	۳,۹۵	۲,۳۸	۱,۰۹	۰,۵۸	۰	۰	۰	۰	۰	۶
۴,۵۸	۴,۱	۳,۲	۲,۰۱	۰,۷۶	۰,۰۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷
۳,۳۲	۲,۵۸	۱,۴۶	۰,۳۴	۰,۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸
۱,۸۹	۰,۹۸	۰,۳۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹
۰,۶۸	۰	۰,۰۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
۰,۰۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱
۰,۰۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲

جدول ۳. داده‌ی استخراج شده از منحنی دز- عمق الکترون‌های تک انرژی (C_{ij}) برای محاسبه‌ی طیف انرژی الکترون‌های ۱۸MeV

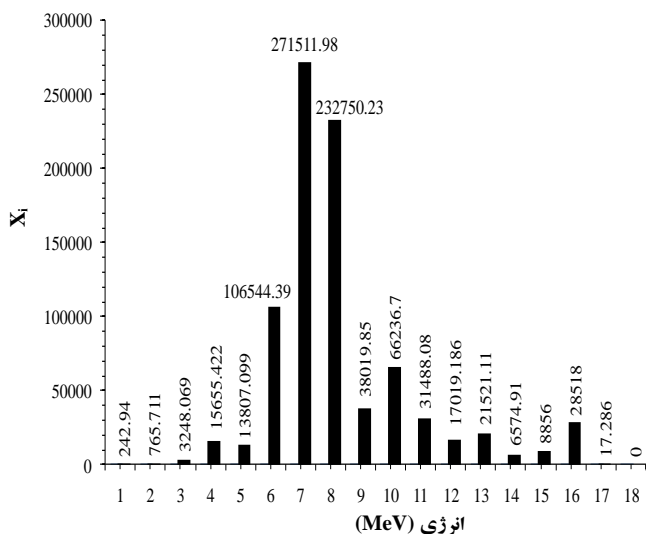
انرژی الکترون (MeV)																	شماره‌ی بازه	
۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲		۱
۴,۷۷	۴,۸۴	۴,۹۵	۵,۰۵	۵	۵	۵,۰۲	۵	۴,۷۵	۴,۶۳	۴,۰۵	۳,۵۷	۳,۲۲	۲,۷۴	۲,۳۶	۱,۹۹	۱,۴۳	۰,۳۸	۱
۵,۰۲	۵,۱۶	۵,۲۸	۵,۳۲	۵,۳۶	۵,۳۷	۵,۳۹	۵,۳۶	۵,۱۸	۵,۰۴	۴,۴۹	۴	۳,۷۲	۳,۴۲	۲,۹۱	۱,۷۸	۰,۳۳	۰	۲
۵,۱۶	۵,۳	۵,۲۸	۵,۴۴	۵,۵۲	۵,۵۱	۵,۵۴	۵,۵۷	۵,۴۱	۵,۳۹	۴,۸۴	۴,۴	۳,۸۷	۳,۲۸	۱,۸۴	۰,۳	۰	۰	۳
۵,۲۴	۵,۳۷	۵,۴۱	۵,۵	۵,۶۱	۵,۶۳	۵,۶۸	۵,۷۴	۵,۷۱	۵,۷۴	۵,۱۳	۴,۴۵	۳,۲۷	۱,۹	۰,۲۷	۰	۰	۰	۴
۵,۲۷	۵,۳۹	۵,۴۳	۵,۵۱	۵,۶۷	۵,۷۵	۵,۸	۵,۸۳	۵,۹۲	۵,۸	۴,۹۸	۳,۹۴	۲,۲۵	۱,۴۷	۰	۰	۰	۰	۵
۵,۲۶	۵,۳۷	۵,۴۱	۵,۴۹	۵,۶۶	۵,۸	۵,۷۷	۵,۷۲	۵,۷۲	۵,۲۹	۴,۲۲	۲,۸۳	۱,۳۲	۰	۰	۰	۰	۰	۶
۵,۲	۵,۲۹	۵,۳۵	۵,۳۸	۵,۵۲	۵,۶۴	۵,۴۸	۵,۲۷	۴,۹۵	۴,۱۲	۳,۱۲	۱,۳۵	۰,۶۶	۰	۰	۰	۰	۰	۷
۵,۰۷	۵,۱۴	۵,۱۹	۵,۱۶	۵,۱۹	۵,۲	۴,۸۵	۴,۴۵	۳,۶۶	۲,۵۱	۲,۳	۰,۲۸	۰,۲	۰	۰	۰	۰	۰	۸
۴,۸۶	۴,۸۹	۴,۸۹	۴,۷۸	۴,۶۵	۴,۴۶	۳,۸۹	۳,۲۶	۲,۱۴	۰,۹۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹
۴,۵۴	۴,۵۱	۴,۴۳	۴,۲۳	۳,۸۹	۳,۴۷	۲,۷۲	۱,۸۹	۰,۸۴	۰,۰۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
۴,۱۲	۴	۳,۸۱	۳,۵	۲,۹۸	۲,۳۶	۱,۵۴	۰,۶۲	۰,۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱
۳,۵۸	۳,۳۸	۳,۰۶	۲,۶۵	۲,۰۱	۱,۳۲	۰,۵۸	۰,۰۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲
۲,۹۵	۲,۶۵	۲,۲۴	۱,۷۳	۱,۱۱	۰,۵۴	۰,۰۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳
۲,۲۵	۱,۸۷	۱,۴۲	۰,۸۷	۰,۴۲	۰,۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴
۱,۵۳	۱,۱۱	۰,۶۹	۰,۲۴	۰,۰۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۵
۰,۸۳	۰,۴۳	۰,۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶
۰,۲۴	۰,۰۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۷
۰,۰۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۸



شکل ۸. طیف انرژی الکترون‌های با انرژی اولیه ۸ MeV



شکل ۹. طیف انرژی الکترون‌های با انرژی اولیه ۱۲ MeV



شکل ۱۰. طیف انرژی الکترون‌های با انرژی اولیه ۱۸ MeV

جدول ۴. میانگین سهم هر بازه، استخراج شده از منحنی دز - عمق تجربی الکترون‌های ۸ MeV (E_j)

شماره‌ی بازه	مرز		میانگین
	پایین (cm)	بالا (cm)	
۱	۰	۰.۷۵	۸۹.۴۶
۲	۰.۷۵	۱.۵	۹۶.۹۵
۳	۱.۵	۲.۲۵	۹۵.۹۶
۴	۲.۲۵	۳	۷۲.۰۵
۵	۳	۳.۷۵	۳۲.۳۳
۶	۳.۷۵	۴.۵	۶.۰۶
۷	۴.۵	۵.۲۵	۱.۱۴
۸	۵.۲۵	۶	۰.۸۲

جدول ۵. میانگین سهم هر بازه، استخراج شده از منحنی دز - عمق تجربی الکترون‌های ۱۲ MeV (E_j)

شماره‌ی بازه	مرز		میانگین
	پایین (cm)	بالا (cm)	
۱	۰	۰.۶۷	۹۴.۰۳
۲	۰.۶۷	۱.۳۳	۹۶.۴۹
۳	۱.۳۳	۲	۹۹.۰۳
۴	۲	۲.۶۷	۱۰۰.۲۱
۵	۲.۶۷	۳.۳۳	۹۷.۲۲
۶	۳.۳۳	۴	۸۶.۸۱
۷	۴	۴.۶۷	۶۸.۰۳
۸	۴.۶۷	۵.۳۳	۳۷.۷۶
۹	۵.۳۳	۶	۱۰.۱۶
۱۰	۶	۶.۶۷	۴.۱۱
۱۱	۶.۶۷	۷.۳۳	۱.۱۹
۱۲	۷.۳۳	۸	۰.۴۳

جدول ۶. میانگین سهم هر بازه، استخراج شده از منحنی دز - عمق تجربی الکترون‌های ۱۸ MeV (E_j)

شماره‌ی بازه	مرز		میانگین
	پایین (cm)	بالا (cm)	
۱	۰	۰.۵۶	۹۲.۳۲
۲	۰.۵۶	۱.۱۱	۹۴.۷۳
۳	۱.۱۱	۱.۶۷	۹۴.۹۲
۴	۱.۶۷	۲.۲۲	۹۴.۶۲
۵	۲.۲۲	۲.۷۸	۹۳.۹۴
۶	۲.۷۸	۳.۳۳	۹۳.۰۲
۷	۳.۳۳	۳.۸۹	۹۱.۹۴
۸	۳.۸۹	۴.۴۴	۸۹.۹۲
۹	۴.۴۴	۵	۸۷.۱
۱۰	۵	۵.۵۶	۸۲.۳۹
۱۱	۵.۵۶	۶.۱۱	۷۵.۷۸
۱۲	۶.۱۱	۶.۶۷	۶۶.۴۳
۱۳	۶.۶۷	۷.۲۲	۵۵.۹۱
۱۴	۷.۲۲	۷.۷۸	۴۳.۲۳
۱۵	۷.۷۸	۸.۳۳	۳۲.۲۲
۱۶	۸.۳۳	۸.۸۹	۱۹.۴۷
۱۷	۸.۸۹	۹.۴۴	۸.۰۴
۱۸	۹.۴۴	۱۰	۲.۷۲



مرجع‌ها

1. C.J. Karzmark, S. Nunan, E. Tanabe, Medical Electron Accelerators, McGraw-Hill, Inc., Health Professions Division, New York (1993).
2. D. Reistad, A. Brahme, The microtron, a new accelerator for radiation therapy, (Abstract, 3rd Int Conf Med Phys.) Phys Med Biol, 17 (1972) 692.
3. F. Ziaie, Z. Zimek, S. Bulka, H. Afarideh, S.M. Hadji-Saeid, Calculated and measured dose distribution in electron and x-ray irradiated water phantom, Radiat. Chem. Phys. 63 (2002) 177-183.
4. F.M. Khan, K. Doppke, K.R. Hogstrom, Clinical electron-beam dosimetry, Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No.25. Med. Phys. (1991).
5. H. Svensson, G. Hettinger, Dosimetric measurements at the Nordic medical accelerators. I. Characteristics of the radiation beam, Acta Radiol. 10 (1971) 369.
6. F.H. Attix, W.C. Roesch, eds., Radiation Dosimetry, II. Academic Press, New York (1967).
7. F.M. Khan, Replacement correction (Prepl) for ion chamber dosimetry, Med phys. 18 (1991) 1244.
8. H.O. Wyckoff, F.H. Attix, Design of Free-air Ionization Chambers, Natinal Bureau of Standards Handbook No. 64. Washington, DC: U.S. Government printing Office (1957).
9. F.M. Khan, P.D. Higgins, Calculation of depth dose and dose per monitor unit for irregularly shaped electron fields: an addendum, Phys Med Biol. 44 (1999) 77-80.
10. N. Tapley, Clinical Applications of the Electron Beam, John Wiley & sons (1976).
11. C.J. Karzmark, C.S. Nunan, E. Tanabe, Medical electron accelerator, McGraw-Hill (1993).

۵. نتیجه‌گیری

با بهره‌گیری از یک روش ابتکاری، طیف انرژی الکترون با استفاده از منحنی دز- عمق محاسبه شد. از طرفی شکل طیف انرژی تعیین‌کننده‌ی چگونگی توزیع دز- عمق پرتوهای الکترون در محصول است. دلیل این امر از تناسب عمق نفوذ متفاوت الکترون‌ها با انرژی آن‌ها ناشی می‌شود. با توجه به اهمیت کنترل نسبت یکنواختی دز در هدف، طیف انرژی حاصله باید به گونه‌ای باشد که شکل منحنی دز- عمق پرتوهای الکترون محصول تا حد امکان روند کاهشی‌کننده داشته باشند. عموماً جذب الکترون‌ها با انرژی پایین در نواحی سطحی، سهم بیشتری را دارا است و هم‌چنین با افزایش انرژی الکترون‌های فرودی میزان نفوذ در عمق لایه افزوده می‌شود. لذا طیف‌های انرژی محاسبه شده در کار حاضر از نقطه‌نظر ایجاد توزیع یکنواخت در هدف قابل توجه می‌نماید.

پی‌نوشت‌ها

۱. Roentgen
۲. Becquerel
۳. Radiation Therapy
۴. Water Phantom
۵. Pencil Beam
۶. Collimator
۷. Source-Surface Distance (SSD)
۸. Depth
۹. Field Size
۱۰. Buld-Up