

محاسبه مقادیر نسبت معادل آب چند ماده دزیمتری پلاستیکی مورد استفاده در یون‌درمانی با باریکه یون هلیوم

ناهید حاجیلو

البرز، کرج، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کدپستی: ۳۱۴۶۵-۱۴۹۸

پست الکترونیکی: nhajiloo@aeoi.org.ir & nhajiloo676@gmail.com

چکیده

در این پژوهش مقادیر نسبت معادل آب (WER) برای باریکه یون‌های هلیوم، در گستره مناسب انرژی و در مواد دزیمتری رایج، منحنی دز-عمق و مقادیر WER برای مواد پلاستیکی پلی‌کربنات (PC)، پارافین (PA)، پلی‌پروپیلن (PP) و پلی‌اتیل متاکریلیت (PMMA) در بازه انرژی ۲۵-۲۵۰ MeV/u یون‌های هلیوم با استفاده از کد کامپیوتری MCNP X محاسبه شد. از میان مواد مورد مطالعه PC و PP با مقادیر متوسط WER برابر ۰/۹۷۹ و ۱/۱۷۷ بر کل بازه انرژی، به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین تفاوت را با آب نشان دادند. در مواد مورد مطالعه با افزایش چگالی جرمی مقدار WER افزایش و با کاهش آن WER کاهش می‌یابد. مقادیر محاسبه شده، توافق خوبی با نتایج ارائه شده در سایر مقالات نشان می‌دهد (اختلاف کمتر از ۰/۰۸٪).

کلیدواژگان: یون‌درمانی، نسبت معادل آب، یون‌های هلیوم، منحنی دز-عمق.

۱. مقدمه

هنگامی که ذره بارداری از میان یک ماده عبور می‌کند، سبب یونش اتم‌های ماده می‌شود. این امر باعث می‌شود که در طول مسیر عبور ذره دز پرتوی در ماده هدف نهشت یابد. با کاهش انرژی ذره باردار در طول مسیر عبور از درون ماده، سطح مقطع برهم‌کنش آن با ماده افزایش می‌یابد. این امر سبب افزایش دز پرتوی دریافتی توسط این بخش از ماده می‌شود. به این ترتیب، در انتهای منحنی‌های توزیع دز ذره باردار برحسب عمق نفوذ از سطح ماده، قله‌ای ایجاد می‌شود. به این منحنی، منحنی براگ و به قله موجود در منحنی، قله براگ گفته می‌شود. بیش‌ترین

در پرتودرمانی سعی بر این است که تا حد امکان، ناحیه تومور حداکثر مقدار دز و بافت‌های سالم اطراف آن، حداقل مقدار دز را از پرتو فرودی دریافت کنند. در سال ۱۹۴۶ رابرت ویلسون پیشنهاد کرد که به خاطر ویژگی‌های فیزیکی، باریکه‌های یون‌های سنگین می‌توانند برای درمان سرطان‌هایی که در آنها تومور در عمق زیادی از بافت قرار دارد، مورد استفاده قرار گیرند [۱]. در این نوع درمان برد باریکه به راحتی قابل کنترل بوده و پرتو با دقت بالا به حجم‌های کوچک تعریف شده در داخل بدن اعمال می‌شود.

مخصوصاً اگر همراه با دزیمتر مورد استفاده قرار گیرد. در اندازه‌گیری توزیع دز تعداد زیادی فانتوم‌های جامد معادل آب معرفی شده‌اند [۶]. نسبت معادل آب (WER) و یا ضخامت معادل آب (WET) اغلب برای مشخصه‌یابی برد جذب باریکه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تاکنون کارهای گسترده‌ای برای اندازه‌گیری، محاسبات به روش شبیه‌سازی و یا برآورد به روش مدل‌های ریاضی، برای تعیین WER مواد مختلف در یون‌درمانی با استفاده از یون‌های پروتون و یا کربن انجام شده است [۷-۱۰]. ولی در مورد یون‌های هلیوم به جز اندکی اطلاعات محاسباتی و یک مورد اندازه‌گیری برای تعداد محدودی از مواد، اطلاعات دیگری در دسترس نیست. بنابراین در این مقاله مقادیر WER برای پارافین (PA)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌کربنات (PC) و پلی‌اتیل متاکریلیت (PMMA) در بازه انرژی ۲۵-۲۵۰ MeV/u یون‌های هلیوم با استفاده از کد کامپیوتری MCNP X محاسبه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. نسبت معادل آب

برد ذرات باردار بستگی به انرژی و نوع محیط انتقال دارد. برد ذره (R) به صورت عمقی از ماده جذب که باریکه ذرات ۸۰٪ بیشینه انرژی خود را بعد از قله براگ از دست می‌دهد، تعریف می‌شود. در کاربردهای عملی، نسبت معادل آب (WER) برای نشان دادن تفاوت بین برد باریکه یون در آب (R^w80%) به روی برد در یک ماده معین m (R^m80%) به صورت زیر نشان داده می‌شود [۷ و ۱۰]:

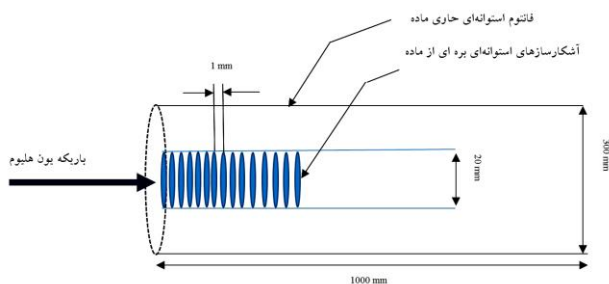
$$WER = \frac{R^w 80\%}{R^m 80\%} \quad (1)$$

توزیع دز ذره باردار حین عبور از ماده مورد بررسی در این ناحیه صورت می‌گیرد. برحسب این‌که بافت سرطانی مورد درمان در چه عمقی از سطح بدن واقع است، انرژی ذره باردار فرودی به اندازه‌ای تنظیم می‌شود که قله براگ منحنی توزیع دز در عمقی که تومور در آن واقع شده، قرار گیرد. به این ترتیب، بیش‌ترین انتقال انرژی ذره باردار به بافت سرطانی منتقل می‌شود. مزیت اصلی یون‌درمانی نسبت به فوتون‌درمانی توزیع جایگزیده دز آن است. این امر باعث می‌شود بافت‌های سالم اطراف تومور با کم‌ترین میزان آسیب مواجه شوند [۲].

از گذشته‌های دور تاکنون پرتودرمانی با ذرات پروتون، کربن، آهن، اکسیژن و هلیوم مورد توجه بوده‌اند، به طوری که تا پایان سال ۲۰۱۵ حدود ۱۵۰ هزار نفر به این روش درمان شده‌اند. در حال حاضر تنها یون‌های مورد استفاده در درمان بیماران با استفاده از تجهیزات کلینیکی، یون‌های کربن و پروتون هستند. در حالی که در مواقع خاص از یون‌های جایگزین مانند اکسیژن و هلیوم نیز استفاده می‌شود [۳ و ۴]. یون‌های هلیوم به دلیل خواص رادیولوژیکی و فیزیکی خاص مانند پراکندگی جانبی کمتر در مقایسه با پروتون‌ها و پهنای قله کمتر در مقایسه با یون‌های کربن-۱۲ مورد توجه قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال در مرکز یون‌درمانی هایدلبرگ آلمان باریکه یون هلیوم در دسترس بوده و از آن برای مقاصد پژوهشی استفاده می‌شود و هم‌زمان مقدمات لازم برای کاربرد کلینیکی آن در حال فراهم شدن است [۵].

اطلاعات مورد نیاز در مورد نحوه توزیع دز در پرتودرمانی به‌طور کلی از اندازه‌گیری در فانتوم‌های ساخته شده از مواد معادل بافت به دست می‌آیند و به‌ندرت ممکن است بتوان اندازه‌گیری مستقیم توزیع دز در بدن بیماران در حال درمان با هر نوع درمان را انجام داد. عموماً در یون‌درمانی برای اندازه‌گیری توزیع دز از فانتوم آب به عنوان معادل بافت استفاده می‌شود. اما استفاده از فانتوم آب معایبی دارد،

نشان دهنده انرژی تحویلی تمامی ذرات در واحد حجم است، استفاده شده است. به منظور ارزیابی مقادیر WER برای موادی که در جدول ۱ ذکر شده است، یک فانتوم استوانه‌ای حاوی آب به ارتفاع ۱۰۰۰ mm و قطر ۳۰۰ mm شبیه‌سازی شده است. باریکه‌ای تک‌انرژی از یون‌های هلیوم با شعاع ۱ mm عمود بر سطح فانتوم می‌تابد. با تعریف mesh-tally در فایل ورودی، ۱۰۰۰ آشکارساز استوانه‌ای در امتداد باریکه ذرات در داخل فانتوم آب که هر کدام از آن‌ها به ارتفاع ۱ mm و قطر ۲۰ mm به منظور انجام محاسبات انرژی تحویل داده شده به هر آشکارساز در نظر گرفته شد. شکل ۱ جزئیات هندسه در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. محاسبات مقادیر WER برای مواد مورد مطالعه (جدول ۱) برای محدوده انرژی ۲۵-۲۵۰ MeV با گام ۱۲/۵ MeV انجام شد. برد کلینیکی ($R^{W80\%}$) از پروفایل‌های عمق-دز برای هر انرژی استخراج شد. تمامی مراحل فوق برای دیگر مواد مورد مطالعه در جدول ۱ تکرار گردید. به عبارت دیگر با تغییر ماده فانتوم آب به PP، PC، PMMA و PA توزیع دز در آشکارسازها محاسبه و پروفایل‌های باریکه‌ها برای هر گام انرژی و هر کدام از مواد استخراج شد. با داشتن $R^{m80\%}$ برای هر کدام از مواد و $R^{W80\%}$ برای آب و استفاده از رابطه ۱، مقادیر WER محاسبه شد. لازم به یادآوری است که در تمامی محاسبات شبیه‌سازی، خطای آماری کم‌تر از یک درصد بوده است.



شکل (۱): نمای از هندسه شبیه‌سازی شده به منظور محاسبه مقادیر

WER مواد مورد مطالعه.

در این کار پژوهشی مقادیر WER باریکه یون‌های هلیوم در گستره انرژی‌های پایین و متوسط برای مواد پارافین (PA)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌اتیل‌متاکریلیت (PMMA) و پلی‌کربنات (PC) با استفاده از کد کامپیوتری MCNP X محاسبه شده است. مواد ذکر شده به همراه فرمول شیمیایی و چگالی آن‌ها که در محاسبات از آن‌ها استفاده شده است، در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول (۱): مواد مورد استفاده در انجام محاسبات به همراه فرمول

شیمیایی و چگالی آن‌ها [۱۱].

نام ماده	فرمول شیمیایی	چگالی (g/cm^3)
آب مایع	H ₂ O	۱/۰۰
PMMA	(C ₅ H ₈ O ₂) _n	۱/۱۹
پارافین (PA)	C _n H _{2n+2}	۰/۹۳
پلی‌پروپیلن (PP)	(C ₃ H ₆) _n	۰/۹۰
پلی‌کربنات (PC)	C ₁₆ H ₁₄ O ₃	۱/۲۰

۲.۲. محاسبات با کد MCNPX

در این کار از کد کامپیوتری MCNPX به منظور شبیه‌سازی ترابرد ذرات و محاسبه دز استفاده شده است. این کد برای برآورد مقادیر دز ذرات باردار در هادرون‌تراپی بسیار دقیق است. بنابراین از MCNPX در زمینه‌های مختلف یون‌درمانی مانند محاسبات توزیع دز در بدن بیمار، فانتوم و یا محاسبات WER یا WET می‌توان استفاده نمود.

در این پژوهش از مش تالی برای محاسبات دز در امتداد باریکه یون‌ها استفاده شده است. مش تالی روشی برای محاسبه شار ذرات، دز یا مقادیر دیگر بر روی یک شبکه چهارضلعی، استوانه‌ای یا کروی در یک مسأله با هندسه استاندارد است. به‌عنوان بخشی از مسأله ترابرد، ذرات از راه مش مستقل ردیابی می‌شوند و محتویات هر سلول مش در انتهای مسأله در یک فایل نوشته می‌شود. در این پژوهش نوع سوم مش تالی که

۳. نتایج و بحث

با مراجعه به جدول ۱ مقادیر چگالی جرمی مواد مذکور به ترتیب برابر است با: ۰/۹۳، ۰/۹۰، ۱/۱۹ و ۱/۲۰ بنابراین می توان نتیجه گرفت در مواد مورد مطالعه هر چه چگالی جرمی کم تر باشد مقدار WER به واحد نزدیک تر است و با افزایش چگالی جرمی افزایش می یابد.

جدول (۲): مقادیر WER محاسبه شده با استفاده از کد MCNP در انرژی های مختلف باریکه یون های هلیوم برای چهار ماده پلاستیکی و مقایسه با مقادیر ارائه شده در سایر مقالات.

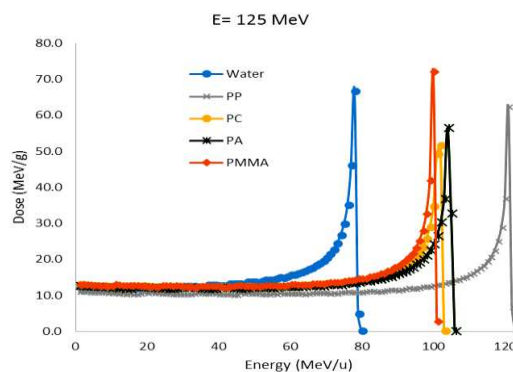
E (MeV/u)	نسبت معادل آب (WER)				
	PMMA	PMMA [۸]	PC	PP	PA
۲۵/۰	۱/۱۶۶	-	۱/۳۸۵	۱/۰۷۱	۱/۲۳۷
۳۷/۵	۱/۱۵۷	-	۱/۲۶۹	۱/۰۳۲	۱/۲۰۰
۵۰/۰	۱/۱۴۳	-	۱/۲۰۷	۰/۹۹۶	۱/۱۶۹
۶۲/۵	۱/۱۶۸	-	۱/۱۷۳	۰/۹۸۵	۱/۱۴۴
۷۵/۰	۱/۱۷۲	-	۱/۱۷۲	۰/۹۷۹	۱/۱۳۲
۸۷/۵	۱/۱۵۷	-	۱/۱۶۰	۰/۹۷۴	۱/۱۳۰
۱۰۰/۰	۱/۱۶۳	-	۱/۱۵۴	۰/۹۷۰	۱/۱۲۱
۱۱۲/۵	۱/۱۶۶	-	۱/۱۵۹	۰/۹۷۴	۱/۱۳۱
۱۲۵/۰	۱/۱۶۶	-	۱/۱۴۹	۰/۹۶۸	۱/۱۲۴
۱۳۷/۵	۱/۱۵۷	۱/۱۵۸	۱/۱۵۰	۰/۹۶۷	۱/۱۲۱
۱۵۰/۰	۱/۱۵۹	۱/۱۵۸	۱/۱۵۲	۰/۹۶۶	۱/۱۲۰
۱۶۲/۵	۱/۱۵۷	۱/۱۵۸	۱/۱۴۷	۰/۹۶۲	۱/۱۱۸
۱۷۵	۱/۱۶۵	۱/۱۵۸	۱/۱۵۱	۰/۹۵۸	۱/۱۱۹
۱۸۷/۵	۱/۱۵۵	۱/۱۵۸	۱/۱۷۳	۰/۹۶۰	۱/۱۱۷
۲۰۰	۱/۱۵۸	۱/۱۵۸	۱/۱۷۰	۰/۹۶۶	۱/۱۱۸
۲۱۲/۵	۱/۱۶۷	۱/۱۵۷	۱/۱۶۱	۰/۹۸۲	۱/۱۱۹
۲۲۵	۱/۱۵۹	۱/۱۵۷	۱/۱۵۴	۰/۹۷۸	۱/۱۱۷
۲۳۷/۵	۱/۱۵۹	۱/۱۵۷	۱/۱۴۵	۰/۹۶۳	۱/۱۱۶
۲۵۰/۰	۱/۱۶۷	۱/۱۵۷	۱/۱۴۱	۰/۹۵۵	۱/۱۱۵

نمودارهای دز-عمق یون های هلیوم در آب، PP، PMMA، PC و PA با استفاده از محاسبات کد MCNPX به دست آمد. نمودارهای دز-عمق برای مواد مورد بررسی در یک انرژی میانی یون های هلیوم (۱۲۵ MeV/u) در شکل ۲ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می شود عمق قله براگ در هر یک از مواد با یکدیگر متفاوت است. مقادیر WER مربوط به مواد مورد مطالعه با برآورد $R^{W80\%}$ و $R^{m80\%}$ از منحنی های دز-عمق یون های هلیوم با انرژی های مختلف با استفاده از محاسبات کد MCNP و به کار بردن رابطه ۱ به دست آمد. در جدول ۲ مقادیر WER محاسبه شده در مقایسه با مقادیر گزارش شده در مقالات آمده است. همان گونه که در این جدول دیده می شود، مقادیر WER محاسبه شده برای PMMA در این تحقیق با نتایج ارائه شده در گزارشات قبلی، تطابق مناسبی را نشان می دهد. بنابراین انتظار می رود نتایج محاسبات با استفاده از کد MCNP برای دیگر مواد مورد مطالعه از دقت مناسبی برخوردار باشد. بیشترین اختلاف بین مقادیر WER به دست آمده از محاسبات کد MCNP در نتایج گزارش شده قبلی [۸] حدود ۰/۸ درصد است. برای تمام محدوده انرژی مورد مطالعه، مقادیر متوسط WER برای PMMA، PC، PP و PA به ترتیب برابر با ۱/۱۶۱، ۰/۹۷۹، ۱/۱۷۷ و ۱/۱۳۵ است. بنابراین از بین مواد مذکور PP کمترین و PC بیشترین مقادیر را دارند. بنابراین PP از سه ماده دیگر به آب نزدیک تر است و ماده مناسب تری برای ساخت فانتوم و تجهیزات دزیمتری در میدان باریکه یون های هلیوم پرنانرژی است. همچنین مقادیر WER برای مواد مختلف در شکل ۳ آمده است. همان طور که در این شکل دیده می شود ترتیب فاصله مواد مذکور از آب به ترتیب PA، PMMA و PC است.

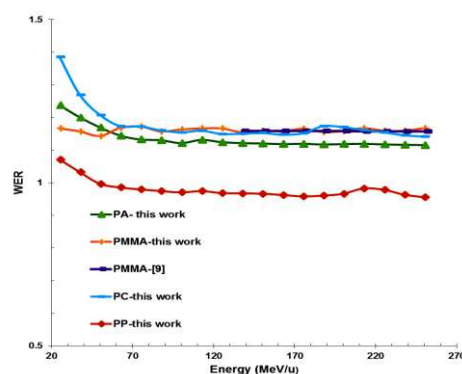
۴. نتیجه گیری

در این کار پژوهشی نمودار دز-عمق و مقادیر WER آب، PMMA، PC، PP و PA برای باریکه یونهای هلیوم در محدوده انرژی ۲۵-۲۵۰ MeV/u با استفاده از کد MCNP به دست آمد. برای تمام گستره انرژی مورد مطالعه مقادیر متوسط WER برای PMMA، PC، PP و PA به ترتیب برابر است با: ۱/۱۶۱، ۰/۹۷۹، ۱/۱۷۷ و ۱/۱۳۵ است.

بنابراین PC و PP به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر WER را در میان مواد مورد بررسی دارا هستند. همچنین مقادیر WER محاسبه شده در توافق خوبی با نتایج ارائه شده در دیگر مقالات می باشند [۸]، به طوری که بالاترین مقدار اختلاف برابر ۰/۸ درصد بود. در مواد مورد مطالعه رابطه مستقیم میان چگالی و مقدار WER وجود دارد، به طوری که با افزایش چگالی مقدار WER افزایش و با کاهش چگالی، کاهش می یابد.



شکل (۲): نمودارهای دز-عمق در مواد مورد مطالعه برای یونهای هلیوم با انرژی ۱۲۵ MeV/u (محاسبه شده با کد MCNPX).



شکل (۳): مقادیر WER محاسبه شده با استفاده از کد MCNP برای مواد مورد مطالعه در انرژیهای مختلف باریکه یونهای هلیوم در مقایسه با مقادیر اندازه گیری برای یکی از مواد [۸].

۵. مراجع

- [1] R.R. Wilson. Radiological use of fast protons, *Radiology*, 47 (1946) 487-491.
- [۲] ابوالفضل حیدرزاده. تعیین بازه مناسب انرژی پروتون در درمان غده تیروئید و محاسبه درصد توزیع انرژی پروتون و نوترون حاصل از واکنش (p,n) در این غده با استفاده از کد MCNPX، *مجله سنجش و ایمنی پرتو*، ۳(۲) (۱۳۹۳).
- [3] D. Schardt, T. Elsaasser and D. Schulz. Heavy-ion tumor therapy: physical and radiobiological Benefits, *Rev. Mod. Phys.* 82 (2010) 383-425.
- [4] O. Sokol, E. Scifoni, W. Tinganelli, W. Kraft-Weyrather, J. Wiedemann, A. Maier, D. Boscolo, T. Friedrich, S. Brons, M. Durante and M. Kramer. Oxygen beams for therapy: advanced biological treatment planning and experimental verification, *Phys. Med. Biol.* 62 (2017) 7798-7813.
- [5] T. Tessonier, A. Mairani, W. Chen, P. Sala, F. Cerutti, A. Ferrari, T. Haberer, J. Debus and K. Parodi. Proton and helium ion radiotherapy for meningioma tumors: a Monte Carlo-based treatment planning comparison, *Radiation Oncology*, 13(2) (2018).
- [6] R. Bagheri, A.K. Moghaddam, B. Azadbakht, M.R. Akbari and S.P. Shirmardi. Determination of water equivalent ratio for some dosimetric materials in proton therapy using MCNPX simulation tool, *Nuclear Science and Techniques*, 30(31) (2019).
- [7] W. Newhauser, J. Fontenot, Y. Zheng, J. Polf, U. Titt, N. Koch, X. Zhang and R. Mohan. Monte Carlo simulations for configuring and testing an analytical proton dose-calculation algorithm, *Physics in Medicine & Biology*, 52 (2007) 4569.
- [8] R. Zhang, P.J. Taddei, M.M. Fitzek and W.D. Newhauser. Water equivalent thickness values of materials used in beams of protons, helium, carbon and iron ions, *Physics in Medicine & Biology*, 55 (2010) 2481.
- [9] M.R. Akbari, H. Yousefnia and E. Mirrezaei. Calculation of water equivalent ratio of several dosimetric materials in proton therapy using FLUKA code and SRIM program, *Applied Radiation and Isotopes*, 90 (2014) 89-93.
- [10] H. Safigholi and W.Y. Song. Calculation of water equivalent ratios for various materials at proton energies ranging 10-500 MeV using MCNP, FLUKA, and GEANT4 Monte Carlo codes, *Physics in Medicine & Biology*, 63 (2018) 155010.
- [11] M. Berger, M. Inokuti, H. Andersen and H. Bichsel. Stopping powers and ranges for protons and alpha particles ICRU Report 49 (1993).