



## تعیین نسبت معادل آب برای نمونه‌هایی از مواد پر کاربرد در پروتون‌تراپی

باقری، رضا

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، مجتمع پژوهشی شمالغرب کشور (بناب)

### چکیده:

فانتوم‌های جامد معادل آب یا بافت بی‌شماری در چند دهه گذشته به عنوان جایگزین آب یا بافت بدن انسان برای اندازه‌گیری دز جذبی معرفی شده‌اند. در این کار پژوهشی یک ارزیابی مونت کارلویی از معادل آب بودن شش ماده فانتوم با استفاده از کد محاسباتی MCNPX انجام گرفت. باریکه‌های پروتونی با انرژی ۱۰۰ تا ۲۲۵ مگاالکترون‌ولت و با گام‌های ۲۵ مگاالکترون‌ولتی در نظر گرفته شد. منحنی‌های دز عمقی، نسبت معادل آب و همچنین عرض نیم‌سایه محاسبه شدند. پلی‌اتیلن و پارافین در مقایسه با سایر مواد بررسی شده در این تحقیق، خصوصیات دزیمتری بسیار نزدیکتری نسبت به آب مایع از خود نشان دادند.

**کلمات کلیدی:** نسبت معادل آب، پروتون‌تراپی، برد پروتون، کد MCNPX

### مقدمه:

اخیراً پرتو درمانی سرطان با استفاده از باریکه‌های ذرات باردار سنگین (پروتون، هلیوم، کربن) افزایش قابل توجهی داشته است. پروتون درمانی به دلیل تطبیق‌پذیری بی‌نظیر دز تحویلی آن برای قرارگرفتن در ناحیه هدف، در حال تبدیل شدن به یک رویکرد تعیین کننده برای درمان تومورهای موضعی مجاور به اندامهای بحرانی شده است [۱ و ۲]. به خاطر جرم زیاد پروتون‌ها، پروتون‌ها پراکندگی کمتری در بافت داشته و زیاد منتشر نشده و روی تومور متمرکز باقی می‌مانند و اثرات جانبی کمتری روی بافت‌های مجاور سالم بجا می‌گذارند [۳ و ۴]. برای یک باریکه پروتونی تک انرژی، ضمن نفوذ ذره پروتونی در محیط، در ابتدا افزایش آهسته‌ای در دز جذبی محیط با افزایش عمق محیط دیده می‌شود. در انتهای مسیر برد ذره در محیط، این دز جذبی بطور ناگهانی و با شیب بسیار تندی افزایش می‌یابد که قله براگ نامیده می‌شود [۵]. عمق قله براگ می‌تواند از طریق انتخاب مناسب انرژی باریکه‌های پروتونی، مطابق با عمق، اندازه و حدود ناحیه توموری برای انتقال حداکثری انرژی به سلول‌های سرطانی تنظیم گردد [۶]. داده‌های توزیع دز تقریباً به طور کامل از اندازه‌گیری دز در فانتوم‌های معادل بافت بدن انسان استخراج می‌شوند.



در این مقاله باریکه‌های پروتونی با انرژی ۱۰۰ تا ۲۲۵ مگاالکترون‌ولت و با گام‌های ۲۵ مگاالکترون‌ولتی در نظر گرفته شده و برای اولین بار منحنی‌های دز عمقی، نسبت معادل آب و همچنین عرض نیم‌سایه برای شش ماده فانتوم پلی‌پروپیلن (PP)، پارافین (PA)، پلی‌اتیلن (PE)، آب (W)، پلی‌استایرن (PS)، پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) و پلی‌کربنات (PC) با استفاده از کد محاسباتی MCNPX محاسبه می‌شوند.

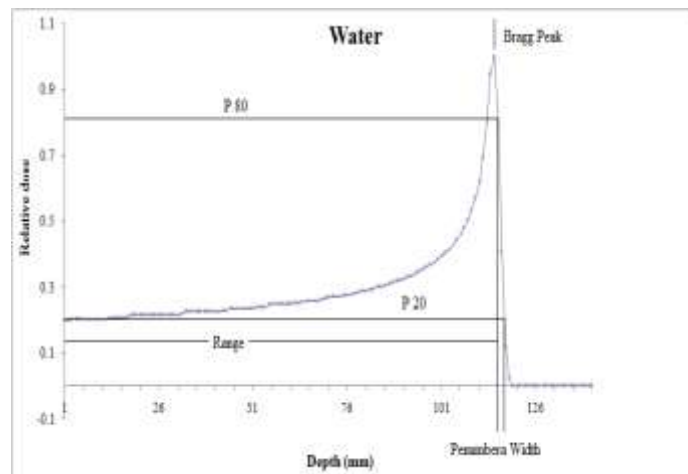
### روش کار :

در این کار پژوهشی یک ارزیابی مونت‌کارلویی از معادل آب بودن شش ماده فانتوم با استفاده از کد محاسباتی MCNPX انجام گرفت.

برد پروتون به صورت فاصله بین نقطه ورودی باریکه به فانتوم مورد بررسی و نقطه دز ۰.۸٪ در قسمت انتهایی منحنی دز عمقی تعریف می‌شود. همچنین نسبت معادل آب (WER)، بصورت نسبت برد پروتون با انرژی معین در آب به برد همان ذره در ماده دزیمتری مورد بررسی از طریق معادله زیر تعریف می‌شود [۷]:

$$WER = \frac{d_{80,water}}{d_{80,material}} \quad (1)$$

در این رابطه صورت و مخرج کسر به ترتیب برد پروتون در آب و ماده فانتوم مورد بررسی می‌باشند. همینطور عرض نیم‌سایه به عنوان فاصله بین نقاط ۰.۸٪ و ۰.۲٪ دز جذبی در قسمت انتهایی منحنی دز عمقی تعریف می‌شود [۸]. در شکل (۱) برد، مکان قله براگ و عرض نیم‌سایه نشان داده می‌شود.



شکل (۱). برد، مکان قله براگ و عرض نیم‌سایه در منحنی دز عمقی.



هندسه استوانه‌ای با ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر و شعاع ۱۵ سانتی‌متر برای مدل‌سازی مواد فانتوم در نظر گرفته شد. چشمه پروتونی بصورت باریکه موازی و تک انرژی با توزیع یکنواخت ذرات پروتونی شبیه‌سازی شد که پروتون‌ها را در راستای محور مثبت Z ها گسیل می‌کند. ویژگی فانتوم‌های هیدروکربنی استفاده شده در این پروژه در جدول (۱) نشان داده شده است.

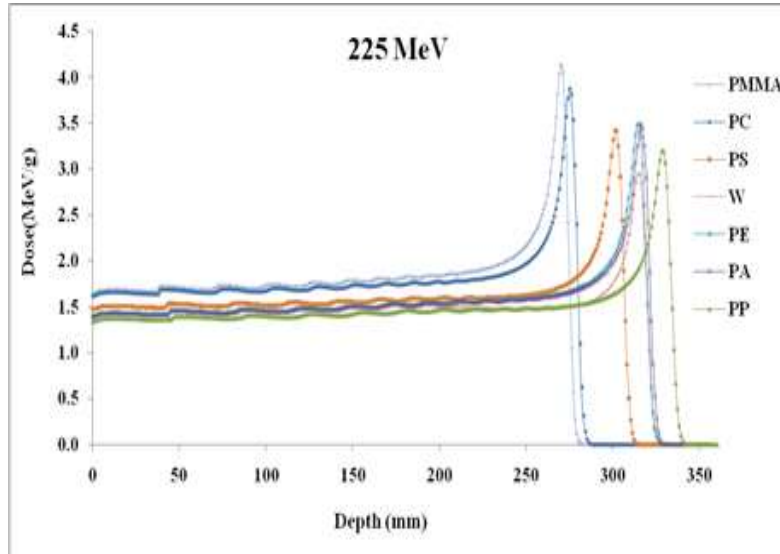
جدول (۱). درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده و چگالی مربوطه‌ی فانتوم‌های بررسی شده.

Element	Atomic number	Material						
		PP	PA	PE	W	PS	PMMA	PC
Hydrogen	1	14.37	14.86	14.37	11.19	7.74	8.05	5.55
Carbon	6	85.63	85.14	85.63	---	92.26	59.99	75.57
Oxygen	8	---	---	---	88.81	---	31.96	18.88
Density (g cm <sup>-3</sup> )		0.9	0.93	0.94	1.00	1.06	1.19	1.20

برای به دست آوردن مقادیر نسبت معادل آب (WER)، آشکارسازهای استوانه‌ای با قطر ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر با استفاده از دستور مش تالی استوانه‌ای در کد MCNPX در امتداد مسیر باریکه پروتونی در نظر گرفته شد. بسته به مواد فانتوم و انرژی باریکه پروتونی، شبیه‌سازی با حدود ۵ تا ۵۰ میلیون تاریخچه انجام گردید. تمام داده‌های شبیه‌سازی بدست آمده با خطای کمتر از ۰/۰۲ درصد گزارش شدند.

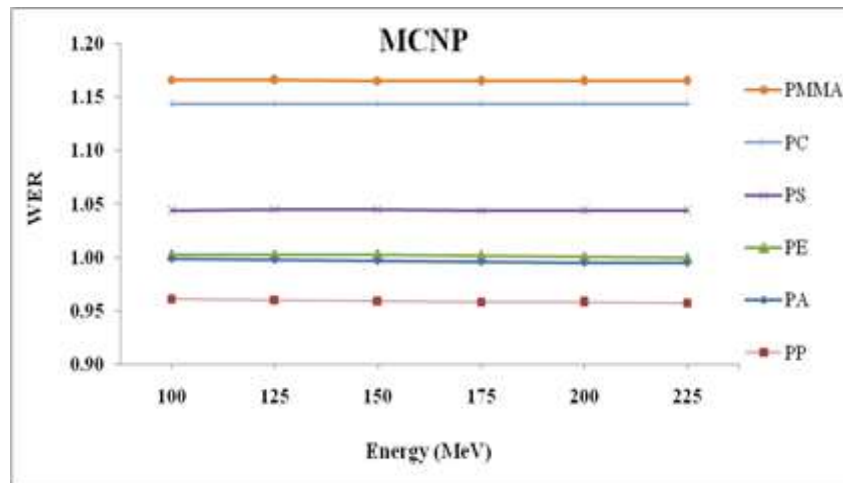
## نتایج :

در شکل (۲) منحنی دز عمقی تمام فانتوم‌های بررسی شده در انرژی ۲۲۵ مگاالکترون‌ولت نشان داده می‌شود.



شکل (۲). منحنی دز عمقی در مواد مورد مطالعه برای انرژی ۲۲۵ مگاالکترون‌ولت.

در شکل (۳) مقادیر نسبت معادل آب (WER) محاسبه شده از طریق کد MCNPX برای فانتوم‌های مورد مطالعه، در انرژی‌های مختلف پروتونی نشان داده شده است.



شکل (۳). مقادیر WER در مواد مورد مطالعه با استفاده از کد MCNPX.

همچنین عرض نیم‌سایه (فاصله بین نقاط ۸۰٪ و ۲۰٪ دز جذبی در قسمت انتهایی منحنی دز عمقی) در جدول (۲) برای انرژی‌های مختلف پروتون و با استفاده از کد MCNPX نشان داده شده است.



جدول (۲). نتایج کد MCNPX برای عرض نیم‌سایه (بر حسب mm) فانتم‌های مورد بررسی در انرژی‌های مختلف پروتون.

Material	Proton energy (MeV)					
	100	125	150	175	200	225
PP	1.36	1.83	2.36	2.95	3.68	4.40
PA	1.34	1.71	2.30	2.89	3.52	4.24
PE	1.32	1.78	2.23	2.87	3.52	4.24
W	1.36	1.75	2.30	2.94	3.59	4.30
PS	1.30	1.68	2.26	2.80	3.37	4.12
PC	1.17	1.56	2.09	2.61	3.20	3.80
PMMA	1.30	1.60	1.59	2.52	3.09	3.75

در جدول (۳) مقادیر شبیه‌سازی WER حاصل از کد MCNPX مربوط به پلاستیک‌های جامد PMMA, PS, PE و PC با داده‌های تجربی موجود در محدوده انرژی ۱۰۰ تا ۲۲۵ MeV مقایسه شده‌اند.

جدول (۳). مقادیر تجربی مربوط به نسبت معادل آب (WER) در انرژی‌های مختلف پروتون برای برخی از مواد مورد مطالعه در این تحقیق.

Dosimetric material	Method	Density (g.cm <sup>-3</sup> )	Proton energy (MeV)						
			100	125	135	150	175	200	225
PMMA	MCNPX	1.19	1.166	1.166	1.165	1.166	1.165	1.165	1.165
	Moyers et al. [9]	1.185	---	---	1.170	---	1.162	---	1.167
PS	MCNPX	1.06	1.044	1.045	1.044	1.045	1.044	1.044	1.044
	Moyers, et al. [9]	1.048	---	---	1.034	---	1.039	---	1.042
PE	MCNPX	0.94	1.002	1.003	1.002	1.002	1.001	1.001	1.000
	Moyers et al. [9]	0.964	---	---	1.036	---	1.031	---	1.035
PC	MCNPX	1.20	1.143	1.143	1.143	1.144	1.144	1.143	1.143
	Moyers et al. [9]	1.214	---	---	1.145	---	1.141	---	1.15

بحث و نتیجه گیری :



در این مقاله، منحنی های دز عمقی و پارامترهای مرتبط با آن (نسبت معادل آب و عرض نیم‌سایه) با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX برای باریکه های پروتونی با انرژی ۱۰۰ تا ۲۲۵ MeV در فانتوم های پلی پروپیلن، پارافین، پلی اتیلن، آب مایع، پلی استایرن، پلی متیل متاکریلات و پلی کربنات مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند.

شکل (۲) به وضوح نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف فاصله بین موقعیت قله‌های براگ آب مایع و یک فانتوم بررسی شونده، برای فانتوم‌های پلی متیل متاکریلات (PMMA) و پلی پروپیلن (PP) در دو سوی قله براگ مربوط به آب مایع اتفاق می‌افتد. همچنین پلاستیک‌های جامد پلی اتیلن (PE) و پارافین (PA) خصوصیات دز عمقی مشابه‌تر و قابل مقایسه‌تری نسبت به دز عمقی آب مایع را در مقایسه با بقیه فانتوم‌های مورد بررسی از خود نشان می‌دهند. به طور کلی، پلی اتیلن و پلی متیل متاکریلات دارای کمترین و بیشترین تفاوت برد نسبت به آب می‌باشند (۰/۱۰ و ۴۵/۰۰ میلی‌متر به ترتیب برای PMMA و PE در انرژی پروتون ۲۲۵ MeV).

از جدول (۲) به وضوح دیده می‌شود که عرض نیم‌سایه با افزایش انرژی پروتون افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که برای باریکه‌های پروتونی با انرژی معین، بطور کلی هرچه چگالی فانتوم مورد نظر بیشتر باشد، عرض نیم‌سایه در منحنی دز عمقی آن ماده بیشتر است.

همچنین جدول (۳) نشان می‌دهد که به‌طور کلی توافق خوبی بین مقادیر محاسبه شده و تجربی مشاهده می‌شود و تفاوت‌ها در حد و بزرگی خطاهای تجربی گزارش شده یعنی کمتر از ۳ درصد می‌باشند [۹]. پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) با تراکم ۰/۹۴۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب توسط مویر و همکاران در نتایج تجربی استفاده شده است این در حالیکه در این تحقیق مقادیر کمتر از این مقدار در نظر گرفته شد.

مقادیر WER محاسبه شده با استفاده از کد MCNPX (به شکل ۳ مراجعه کنید) نشان می‌دهند که روش مدل‌سازی بکار رفته در این شبیه‌سازی می‌تواند برای تعیین مقادیر WER و ویژگی‌های منحنی براگ سایر مواد دزیمتری بکار رود که قبلاً مقادیر تجربی برای آنها گزارش نشده است.

## مراجع :

- [1]. Kraft, G., 2000. Tumor therapy with heavy charged particles. Prog. Part. Nucl. Phys. 45, 473–544.
- [2]. Park, S.H., Jung, W.G., Suh, T.S., Jang, H.S., Choi, B.O., Rah, J.E., Park, S., Lee, S.B., 2011. Variation of Bragg curve characteristic induced by changing the position of inhomogeneous material: Geant4 simulation study. J. Korean Phys. Soc. 58, 187-197.
- [3]. Koehler, A.M., Preston, W.M., 1972. Protons in Radiation Therapy: comparative Dose Distributions for Protons, Photons and Electrons. Radiology 104,191-195.



- [4]. Seymour, A., Munzenrider, M.J., et al., 1990. Fractionated Proton Radiation Therapy of Cranial and Intracranial Tumors. Am. J. Clin. Oncol. 13, 327-330.
- [5]. Khan, F.M., Gibbons, J.P., 2010. Khan's the physics of radiation therapy, fifth ed. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia.
- [6]. Levin, W.P., Kooy, H., Loeffler, J.S., de Laney, T.F., 2005. Proton beam therapy. Br. J. Cancer 93, 849–854.
- [7]. de Vera, P., Abril, I., Garcia-Molina, R., 2014. Water equivalent properties of materials commonly used in proton dosimetry. Appl. Radiat. Isotopes 83, 122–127.
- [8]. Al-Sulaiti, L., Shipley, D., Thomas R., et al., 2010. Water equivalence of various materials for clinical proton dosimetry by experiment and Monte Carlo simulation. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 619, 344-347.
- [9]. M.F. Moyers, M. Sardesai, S. Sun et al., 2010. Ion stopping powers and CT numbers. Med. Dosim. 35, 179–194.