



## محاسبه دز ذرات ثانویه در پروتون درمانی سرطان غده تیموس با استفاده از ابزار مونت

### کارلوی GEANT4 و کد MCNPX

علیمردانی، راضیه؛ تاتاری، منصوره\*؛ هاشمی، زهرا

دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

#### چکیده:

تیموس غده‌ای هرمی شکل است که در قسمت پشت و فوقانی استخوان جناغ سینه قرار دارد. این غده نقش مهمی در تولید لئوسیت تی<sup>۱</sup> دارد و عضو مهمی در سیستم ایمنی و دفاعی بدن است. برای درمان سرطان غده تیموس روش‌های درمانی از قبیل جراحی و پرتودرمانی وجود دارد. پروتون‌درمانی روشی مناسب برای درمان تومورهای در نزدیکی اندام‌های حساس بدن می‌باشد. در این مقاله با قرار دادن مدولاتور و تیغه‌های جبران‌کننده برد بین چشمه و فانتوم بدن میرد و ایجاد قله براگ پهن‌شده دز جذبی تومور و غده تیموس و ۱۲ اندام اطراف تومور را محاسبه کردیم. تمامی محاسبات توسط ابزار مونت کارلوی GEANT4 و کد MCNPX انجام گرفته است و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

**کلمات کلیدی:** غده تیموس، پروتون درمانی، قله براگ پهن‌شده، دز جذبی، ابزار GEANT4 و کد MCNPX

#### مقدمه:

هنوز علت اینکه چرا برخی افراد مبتلا به سرطان غده تیموس می‌شوند مبهم است. محققان برخی تغییرات DNA را در سلول‌های سرطانی تیموس پیدا کرده‌اند. این سرطان در افراد میان‌سال و سفید پوست شایع‌تر است [۱]. رایج‌ترین روش درمانی برای این سرطان جراحی و پرتودرمانی است. پرتودرمانی به دو روش پرتودرمانی داخلی و خارجی صورت می‌گیرد که یکی از روش‌های پرتودرمانی خارجی پروتون‌درمانی است. یکی از مزیت‌های پروتون‌درمانی هدف‌گیری دقیق تومور است. مخصوصاً زمانی که تومور مورد درمان، در نزدیکی اندام‌های حساس

<sup>1</sup> T lymphocytes



وحیاتی قرار گرفته باشد. مزیت پروتون‌درمانی نسبت به دیگر روش‌های پرتودرمانی خارجی در این است که در پروتون‌درمانی بیشترین مقدار دز در ناحیه تومور جذب می‌شود و آسیب بسیار کمی به بافت‌های مجاور تومور می‌رسد [۲ و ۳]. از اندرکنش پروتون‌ها با هسته‌های محیط، تابش‌های ثانویه تولید می‌شوند که خطرات جانبی به همراه دارند. پروتون به علت جرم سنگینی که دارد دارای انتقال خطی انرژی (LET) بیشتری نسبت به تابش‌هایی نظیر الکترون و گاما است. انتقال خطی انرژی رابطه نزدیکی با دز جذبی در ماده دارد. آهنگ کاهش انرژی در اثر عبور ذره بارداری مثل پروتون از ماده با مربع سرعت آن ارتباط معکوس دارد. بنابراین با کاهش انرژی ذره، سرعت حرکت ذره کم می‌شود و آهنگ کاهش انرژی در واحد طول مسیر افزایش می‌یابد. وقتی که سرعت ذره در انتهای برد به صفر نزدیک می‌شود آهنگ کاهش انرژی بیشینه می‌شود. بیشینه ایجاد شده در انتهای برد را قله براگ<sup>۲</sup> می‌نامند. برای اینکه قله براگ بتواند حجم کل تومور را بپوشاند لازم است که پهن شود. این پهن شدن از برهم‌نهی قله‌های براگ ایجاد شده از پروتون‌های با انرژی‌های مختلف به وجود می‌آید [۴-۶]. در این مقاله با استفاده از پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) به عنوان مدولاتور و همچنین تیغه‌های جبران‌کننده برد، قله براگ پهن‌شده<sup>۳</sup> SOBP را برای پوشش تومور ایجاد می‌کنیم. دز جذب شده در بافت سالم تیموس و ۱۲ اندام حساس و مجاور را با استفاده از کد شبیه‌سازی MCNPX و ابزار مونت کارلو GEANT4 محاسبه می‌کنیم.

### روش کار:

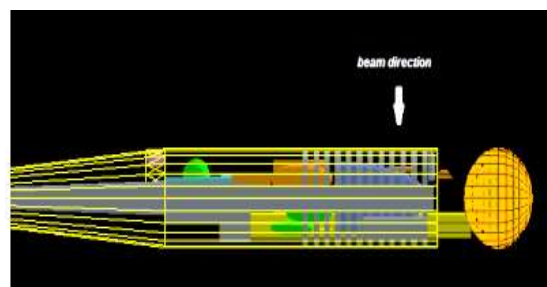
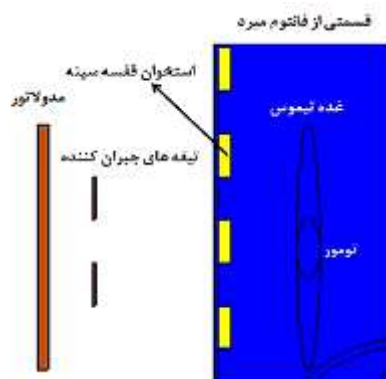
در این مقاله از فانتوم میرد<sup>۴</sup> استفاده شده است که غده تیموس در آن به صورت یک بیضیگون به ابعاد ۸، ۶ و ۱ سانتی‌متر است و مرکز آن در عمق ۴ cm از سطح سینه قرار گرفته است. تومور نیز به صورت یک بیضیگون به قطرهای ۲، ۲ و ۱ سانتی‌متر در مرکز غده تیموس و یک چشمه سطحی پروتون به شعاع ۲ cm در فاصله ۳۰ cm بالاتر از مرکز تومور و با انرژی ۷۷ MeV شبیه‌سازی شده‌اند. پروتون‌ها به صورت عمود بر فانتوم، به محل تومور فرود می‌آیند. در شکل شماره (۱) فانتوم و نحوه قرارگیری چشمه نشان داده شده است. مدولاتوری از جنس PMMA و به شکل مکعب مستطیل در ابعاد ۸ cm × ۸ cm و ضخامت متغیر ۱ mm تا ۹ mm در مسیر پروتون‌ها

<sup>۲</sup> Bragg Peak

<sup>۳</sup> Spread Out Bragg Peak (SOBP)

<sup>۴</sup> Mird phantom

قرار دارد. در جدول شماره (۱) نتایج محاسبات مربوط به وزن باریکه در هر ضخامت مدولاتور نشان داده شده است. به علت وجود استخوان‌های قفسه سینه، در مسیر پروتون‌ها ناهمگنی بافت ایجاد می‌شود. برای جبران این ناهمگنی از دو تیغه جبران‌کننده برد از جنس PMMA به شکل مکعب مستطیل هر کدام به ابعاد  $1/4 \text{ cm} \times 1/4 \text{ cm}$  استفاده می‌شود. نحوه قرارگیری مدولاتور و جبران‌کننده بین چشمه و فانتوم در شکل شماره (۲) نشان داده شده است. در نهایت دز جذب شده ناشی از پروتون‌ها و ذرات ثانویه در ۱۲ اندام اطراف تومور و در بافت سالم تیموس محاسبه شده است. محاسبات و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد MCNPX و ابزار مونت کارلو GEANT4 انجام شده است و نتایج در جدول شماره (۲) نشان داده شده است.



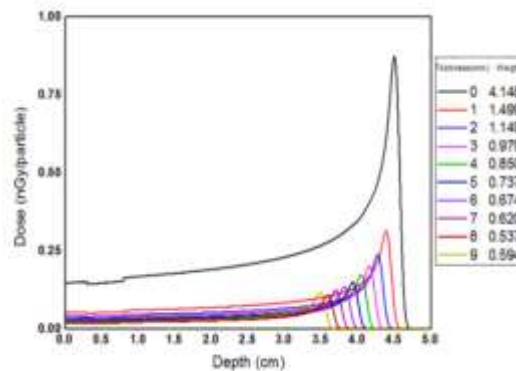
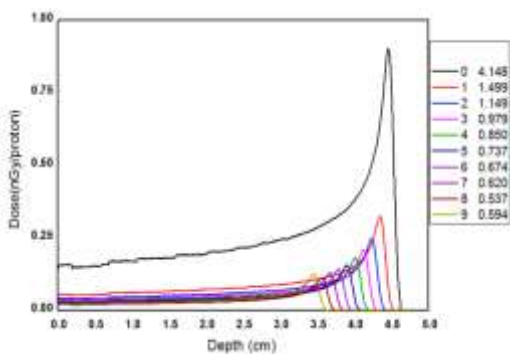
شکل شماره (۱) نحوه قرارگیری چشمه و فانتوم

شکل شماره (۲) نحوه قرارگیری مدولاتور و

تیغه‌های جبران‌کننده نسبت به فانتوم

### نتایج:

منحنی‌های براگ به دست آمده از پروتون‌های با انرژی  $77 \text{ MeV}$  با استفاده از ابزار مونت کارلو GEANT4 و کد MCNPX در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. در این دو شکل، عمق صفر سطح قفسه سینه را نشان می‌دهد و تومور در عمق  $3/5$  سانتی‌متر تا  $4/5$  سانتی‌متر قرار گرفته است. از برهم‌نهی قله‌های براگ، قله براگ پهن شده را به دست می‌آوریم. در شکل شماره (۵) قله براگ پهن شده حاصل از نتایج GEANT4 و MCNPX نشان داده شده است. همانطور که از شکل شماره (۵) دیده می‌شود در عمق  $0/3$  تا  $0/8$  سانتی‌متر کاهش دز وجود دارد که علت آن عبور پروتون‌ها از استخوان قفسه سینه به چگالی  $1/48 \text{ g/cm}^3$  با ضخامت  $0/5$  سانتی‌متر است که تیغه‌های PMMA این کاهش دز را جبران می‌کنند.



شکل شماره (۴) منحنی های براگ

شبیه سازی شده با استفاده از ابزار

مونت کارلو MCNPX

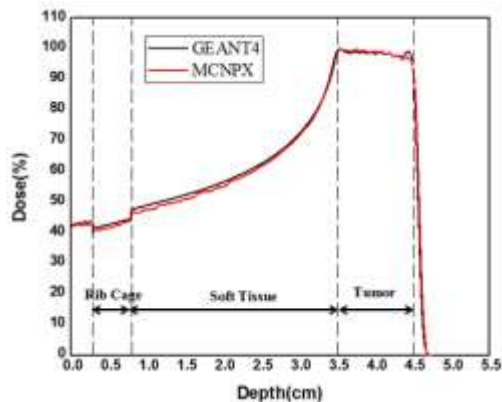
شکل شماره (۳) منحنی های براگ

شبیه سازی شده با استفاده از ابزار

مونت کارلو GEANT4

جدول شماره (۱) وزن باریکه محاسبه شده برای هر ضخامت مدولاتور

وزن باریکه	ضخامت (mm)
۴/۱۴۸	۰
۱/۴۹۹	۱
۱/۱۴۹	۲
۰/۹۷۹	۳
۰/۸۵۰	۴
۰/۷۳۷	۵
۰/۶۷۴	۶
۰/۶۲۰	۷
۰/۵۳۷	۸
۰/۵۹۴	۹



شکل شماره (۵) مقایسه قله های براگ پهن شده به دست آمده از کدهای GEANT4 و MCNPX

همچنین دز جذب شده پروتون های فرودی و ذرات ثانویه در ۱۲ اندام حساس مجاور تومور و دز دریافتی در بافت سالم تیموس در جدول های شماره (۲) و (۳) نشان داده شده است. از نتایج دیده می شود که بیشترین دز دریافتی مربوط به ناحیه تومور است و اندام های مجاور کمترین میزان دز را دریافت می کنند.

جدول شماره (۲) دز جذب شده در تومور و اندام های مجاور آن ناشی از پروتون های فرودی و ذرات ثانویه

دز (nGy/particle) محاسبه شده با ابزار GEANT4	دز (nGy/particle) محاسبه شده با کد MCNPX	اندام
۱/۱۱۵۹۸	۰/۹۸۴۶۶	تومور
۰/۰۵۴۶۷	۰/۰۴۵۴۸	غده تیموس
$۰/۶۳۵۰۱ \times 10^{-6}$	$۵/۴۵۸۲۳ \times 10^{-7}$	تیروئید
$۰/۰۶۴۹۷ \times 10^{-6}$	$۴/۱۶۰۵۹ \times 10^{-7}$	کبد
$۰/۷۳۳۶۱ \times 10^{-6}$	$۸/۳۹۷۳۴ \times 10^{-8}$	معه
$۰/۰۸۸۱۱ \times 10^{-6}$	$۸/۶۹۰۲ \times 10^{-8}$	لوزالمعده
$۰/۰۵۷۶۹ \times 10^{-6}$	$۹/۰۰۸۹ \times 10^{-8}$	طحال
$۰/۰۸۳۰۸ \times 10^{-6}$	$۱/۱۱۲۰۵ \times 10^{-8}$	قلب
$۰/۴۴۷۹۶ \times 10^{-6}$	$۴/۷۱۱۱۷ \times 10^{-8}$	کلیه راست
$۰/۹۲۳۶۸ \times 10^{-6}$	$۶/۸۴۸۴۵ \times 10^{-8}$	کلیه چپ
$۰/۰۵۰۰۸ \times 10^{-6}$	$۷/۱۳۶۹۱ \times 10^{-8}$	فوق کلیه راست
$۰/۰۳۷۹۹ \times 10^{-6}$	$۱/۴۷۰۸ \times 10^{-7}$	فوق کلیه چپ
$۰/۱۳۱۲۵ \times 10^{-6}$	$۳/۱۵۲۴۹ \times 10^{-7}$	ریه راست
$۰/۱۹۴۴۴ \times 10^{-6}$	$۷/۴۲۸۵۹ \times 10^{-7}$	ریه چپ



جدول شماره (۳) دز جذب شده در تومور و اندام های مجاور آن ناشی از پروتون‌ها، نوترون‌ها و فوتون‌ها

اندام	دز پروتون (nGy/particle)	دز نوترون (nGy/particle)	دز فوتون (nGy/particle)
تومور	$0.98413$	$0.24402 \times 10^{-3}$	$0.288428 \times 10^{-3}$
غده تیموس	$0.2319$	$0.1236$	$0.09928$
تیروئید	$2381.01 \times 10^{-7}$	$976.01 \times 10^{-8}$	$210.121 \times 10^{-7}$
کبد	$92342 \times 10^{-8}$	$150.611 \times 10^{-7}$	$173.0176 \times 10^{-7}$
معهه	$253091 \times 10^{-8}$	$271561 \times 10^{-8}$	$315081 \times 10^{-8}$
لوز المعده	$281015 \times 10^{-8}$	$287501 \times 10^{-8}$	$300504 \times 10^{-8}$
طحال	$285989 \times 10^{-8}$	$303789 \times 10^{-8}$	$3111092 \times 10^{-8}$
قلب	$0.29174 \times 10^{-5}$	$0.39891 \times 10^{-5}$	$0.421401 \times 10^{-5}$
کلیه راست	$0.98751 \times 10^{-8}$	$171.057 \times 10^{-8}$	$201309 \times 10^{-8}$
کلیه چپ	$189622 \times 10^{-8}$	$229386 \times 10^{-8}$	$265838 \times 10^{-8}$
فوق کلیه راست	$200099 \times 10^{-8}$	$209598 \times 10^{-8}$	$303987 \times 10^{-8}$
فوق کلیه چپ	$0.9774 \times 10^{-8}$	$0.4885 \times 10^{-7}$	$0.88456 \times 10^{-7}$
ریه راست	$0.9762 \times 10^{-7}$	$101963 \times 10^{-7}$	$115662 \times 10^{-7}$
ریه چپ	$192124 \times 10^{-7}$	$270105 \times 10^{-7}$	$2806295 \times 10^{-7}$

### بحث و نتیجه گیری:

در اثر برهم کنش پروتون با هسته، ذرات ثانویه که مهم‌ترین آن‌ها نوترون و فوتون هستند تولید می‌شود. در پروتون درمانی بایستی به دز جذبی ذرات ثانویه که خطرات جانبی به همراه دارند توجه شود. در این مقاله با به کار بردن مدولاتور و تیغه‌های جبران‌کننده، قله براگ پهن شده برای پوشش تومور داخل غده تیموس شبیه‌سازی شده است. دز جذبی ناشی از پروتون‌ها و ذرات ثانویه در ناحیه تومور و غده تیموس و ۱۲ اندام حیاتی با استفاده از ابزار GEANT4 و کد MCNPX محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین دز دریافتی در ناحیه تومور بوده و دز کمتری توسط بافت سالم و بخش‌های حیاتی مجاور تومور دریافت شده است. در نتیجه پروتون درمانی عوارض جانبی کمی به علت تابش دقیق به محدوده تومور دارد. مشاهده می‌شود که نتایج دو ابزار مونت کارلوی GEANT4 و MCNPX تفاوت چشم‌گیری ندارند و در توافق با یکدیگر هستند.





مراجع :

- [1] S. M. Gadalla, A. Rajan, R. Pfeiffer, S. Y. Kristinsson, M. Bjorkholm, O. Landgren and G. Giaccone, A population-based assessment of mortality and morbidity patterns among patients with thymoma, International Journal of Cancer, 128, 2688–2694, 2010.
- [2] F. Attanasi, N. Belcari, M. Camarda, A. D. Guerra, S. Moehrs, V. Rosso, S. Vecchio, N. Lanconelli, G. A. P. Cirrone, F. Di Rosa, G. Russo, Experimental validation of the filtering approach for dose monitoring in proton therapy at low energy, Phys. Med. 24, 102– 106. 2008.
- [3] W. P. Levin, H. Kooy, J. S. Loeffler, T. F. de Laney, Proton beam therapy, British J. Cancer, 93, 849–854. 2005.
- [4] W.D. Newhauser, R. Zhang , The physics of proton therapy, Phys. Med. Biol. 60, R155-R209, 2015.
- [5] H. Paganetti, Proton Therapy Physics, boston, CRC Press, 2012.
- [6] F. M. Khan, J. P. Gibbons, The Physics of Radiation Therapy, 2014.