

مقایسه پهنا و انرژی جذب شده در منحنی‌های براگ همبرد، برای هادرون‌های سبک در فانتوم آبزهرا سادات طباطبایی اصل^{۱*}، علی اصغر مولوی^۲، محمد هادی هادی زاده یزدی^۱

(۱) دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، گروه فیزیک

(۲) دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده: در این مقاله، منحنی براگ هادرون‌های سبک، خانواده‌های هیدروژن و هلیم (1H , 2H , 3H , 4He , 3He) در یک برد ثابت، به روش مونت کارلو، با استفاده از کد MCNPX ۲.۶ در فانتوم آب شبیه سازی شده است. سپس منحنی‌های ذرات از جهت برتری استفاده در درمان هادرونی مقایسه شده اند. نتایج نشان می‌دهند که در یک عمق نفوذ معین، هلیم ۴ دارای تیزترین منحنی براگ است و درصد جذب انرژی در قله نسبت به کل منحنی برای هلیم ۳، بیشترین است؛ درصد فرار انرژی نیز در هلیم ۳ کمترین مقدار را دارد.

کلید واژه: هادرون‌تراپی، منحنی براگ، کد مونت کارلو MCNPX**مقدمه:**

سرطان یک لفظ مورد استفاده برای وضعیتی است، که در آن سلول‌های غیرعادی بدون کنترل، تقسیم و زیاد شده و به دیگر بافت‌های بدن حمله می‌کنند. درمان سرطان در سه شیوه اصلی خلاصه می‌شود: جراحی، دارو، پرتو درمانی [۱]. هدف نهایی در درمان سرطان، از بین بردن تومور بدون تخریب بافت‌های سالم اطراف آن است [۲]. دو نوع پرتو درمانی وجود دارد، داخلی و خارجی. پرتو درمانی خارجی یک روش غیرتهاجمی از تابش دهی پرتو ذرات پرانرژی به تومور است. در رادیوتراپی با باریکه خارجی معمولی، از پرتوهای الکترون و فوتون استفاده می‌شود [۱]. در این روش، دوز جذبی در فاصله‌های کوتاه از سطح بافت یا فانتوم به دلیل پدیده انباشت افزایش یافته، و سپس با افزایش عمق، بطور نمایی کاهش می‌یابد [۳]. امروزه هادرون‌تراپی یک فناوری پیشرفته در پرتو درمانی خارجی است، که در آن از باریکه یونهای سبک پرانرژی استفاده می‌شود. به علت کاهش دوز روی بافت اطراف تومور، یون‌ها از فوتون‌ها بهترند [۴]. در درمان برخی تومورها، روش هادرونی به دلایل اثر زیست‌شناختی نسبی^۱ (RBE) مفیدتر از رادیوتراپی معمولی است [۵-۶]. مبنای فیزیکی نهفته در هادرون‌تراپی، مربوط به نحوه برهم‌کنش ذره باردار با ماده است [۳]. هنگامی که یک ذره باردار از ماده

^۱ Relative Biological Effectiveness

می گذرد، بخشی از انرژی خود را از دست می دهد. با کاهش انرژی، سطح مقطع برهم کنش افزایش می یابد، تا اینکه در انتهای مسیر ذره، بیشترین مقدار انرژی به ماده سپردمی شود. کاهش انرژی در طول مسیر ذره در ماده، با منحنی براگ توصیف می شود که در انتهای آن یک قله خواهیم داشت موسوم به قله براگ^۱. این پدیده در سال ۱۹۰۳/۱۲۸۲ توسط *William Henry Bragg* کشف شد [۷]. با استفاده از منحنی براگ پهن شده^۲ (SOBP)، می توان تابش پرتو در تومور را طوری طراحی کرد که قله روی تومور، و فلات بر بافت سالم منطبق شود [۷].

مواد و روشها:

برای بدست آوردن منحنی های براگ از جدیدترین نسخه کد *MCNP*، *MCNPX2,6*، استفاده شده است. فانتوم آب، مکعب مستطیلی به ابعاد $30 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ در نظر گرفته می شود که آن را در راستای محور *x* در اجزای *cm* ۰٫۱، مشبندی می کنیم. برای هر ذره، برهم کنش های احتمالی و ذرات ثانویه تولید شده در نظر گرفته شده است. به کمک "مش تالی" نوع ۳، عنوان *Total* انرژی جذب شده بر واحد حجم هر مش در واحد ذره به دست می آید؛ عدد حاصله در حجم هر مش ضرب می شود؛ و در نهایت، نمودار انرژی جذب شده بر حسب عمق نفوذ ذره (منحنی براگ) رسم می گردد. پروتون 50 MeV را مبنا قرار داده، مکان قله براگ آن را پیدا می کنیم. سپس انرژی فرودی را برای بقیه هادرون ها آنقدر تغییر می دهیم تا مکان قله آن ها نیز با پروتون یکسان شود. به همین روش، منحنی های هم برد را در دو گروه دیگر، پروتون 100 MeV ، و پروتون 150 MeV ، نیز به دست می آوریم. با به دست آوردن منحنی هم برد ذرات، می توان چگونگی توزیع کمی و کیفی دوز در شرایط یکسان، برای چشمه های مختلف را مقایسه کرد. کمیت های مورد استفاده برای مقایسه منحنی ها عبارت اند از:

- **نیم پهنا** (عرض منحنی گاوسی در نیم بیشینه): برای اینکه بتوانیم پرتو هادرونی را روی نقطه معینی از تومور متمرکز کنیم، باید ناحیه قله در منحنی براگ تا حد ممکن تیز باشد. با مقایسه نیم پهنا در منحنی ها، می توان به برتری هریک از این حیث رسید.
- **درصد انرژی جذب شده در قله**: نسبت سطح زیر قله به کل منحنی، عددی است معرف کسری از مقدار انرژی جذب شده در تومور به کل فانتوم.

^۱ *Brag Peak*

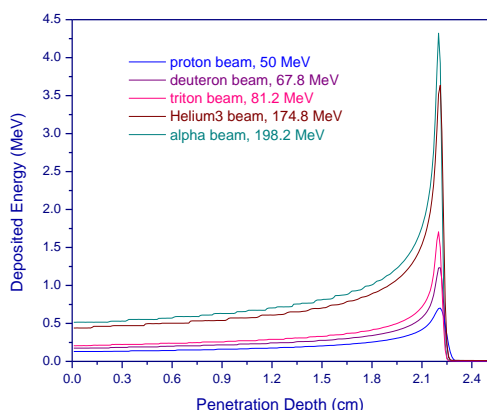
^۲ *Spread Out Bragg Peak*

- درصد فرار انرژی: در برهم‌کنش‌های ثانویه ذره فرودی با ماده، ذرات خنثی نیز تولید می‌شوند. به دلیل برد زیاد این ذرات (نوترون و گاما)، مقداری از انرژی فرودی جذب فانتوم نمی‌شود. نسبت انرژی خارج شده (تفاضل انرژی فرودی با کل انرژی جذب شده در فانتوم)، به انرژی فرودی، درصد فرار انرژی است.

نتایج:

گروه ۱- منحنی‌های براگ هادرون‌های سبک، همبرد با پروتون 50 MeV

با شبیه‌سازی منحنی براگ پروتون 50 MeV می‌بینیم که محل قله براگ در عمق 2.21 cm است. منحنی بقیه ذرات را نیز در این عمق بدست آورده، در نمودار (۱) نشان داده‌ایم. اطلاعات حاصل از منحنی‌ها، در جدول (۱) درج شده است.



جدول ۱: اطلاعات منحنی‌های گروه ۱

ذره فرودی	انرژی فرودی (MeV)	نیم‌پهنا (cm)	درصد انرژی جذب شده در قله	درصد فرار انرژی
پروتون	۵۰	۰.۲۳	۲۹.۳۶	۲.۹۸
دوترون	۶۷.۸	۰.۱۲	۳۰.۴۶	۱.۵۰
تریتون	۸۱.۲	۰.۱	۳۰.۰۶	۱.۸۳
هلیوم ۳	۱۷۴.۸	۰.۱	۳۱.۲۷	۱.۱۰
آلفا	۱۹۸.۲	۰.۰۶	۳۰.۳۰	۱.۶۶

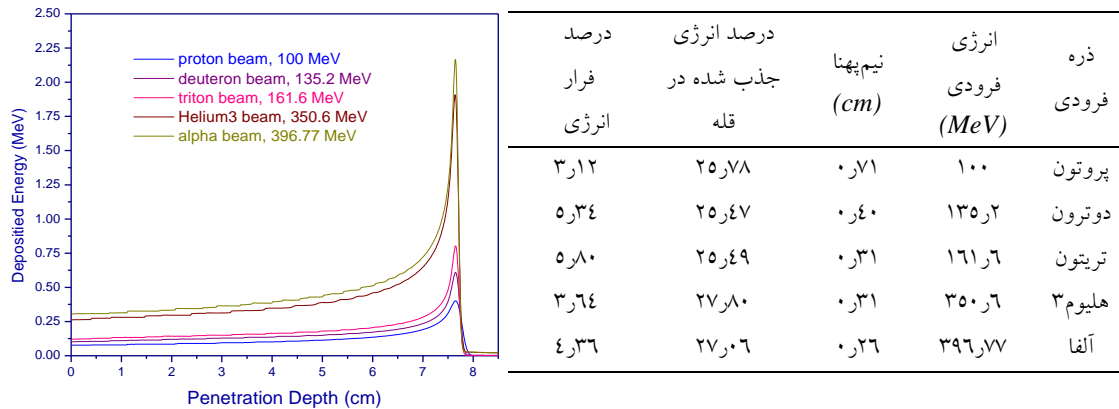
نمودار ۱: منحنی‌های هم‌برد با پروتون 50 MeV مگاالکترون‌ولت

نیم‌پهنا، با افزایش جرم ذره کاهش می‌یابد. منحنی پروتون، که دارای بزرگترین نیم‌پهناست، بعد از نقطه اوج، مانند بقیه ذرات افت آنی ندارد، بلکه در قسمت انتهایی خود بازتر از بقیه است. دو ایزوبار تریتون و هلیوم ۳ ($A=3$)، در این انرژی، دارای نیم‌پهناهای یکسانی هستند. در دوترون و آلفا، با Z/A یکسان، نیم‌پهنا در دوترون دوبرابر آلفا است و همچنین درصد انرژی جذب شده در قله و درصد فرار انرژی این دو ذره حدود یکدیگر است. درصد انرژی جذب شده در قله، در پروتون کمترین مقدار و در هلیوم ۳ بیشترین مقدار است. تغییرات درصد فرار انرژی ذرات دقیقاً عکس درصد انرژی جذب شده در قله است. به این ترتیب، در این گروه (این عمق نفوذ)، پروتون به دلیل دارا بودن بزرگترین نیم‌پهنا و میزان فرار انرژی، و کوچکترین درصد جذب انرژی روی قله برای درمان مناسب نیست. بجز تیزتر بودن منحنی آلفا، از جهت کم بودن درصد فرار انرژی و بالا بودن درصد انرژی جذب شده در قله، هلیوم ۳ مناسبتر به نظر می‌رسد.

گروه ۲- منحنی های براگ هادرون های سبک، همبرد با پروتون 100 MeV

محل قله براگ پروتون 100 مگاالکترون ولت در عمق 7.65 cm قرار دارد. منحنی همبرد ذرات، در نمودار (۲) نشان داده شده است. اطلاعات بدست آمده در جدول (۲) درج شده است.

جدول ۲: اطلاعات منحنی های گروه ۲



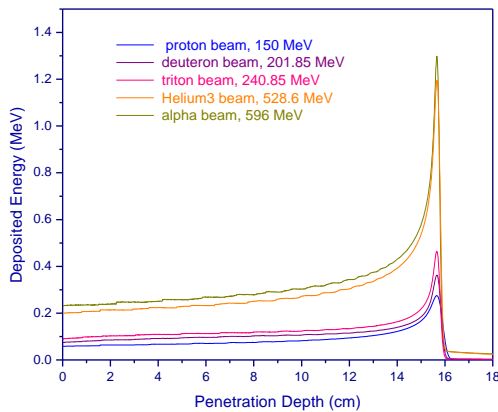
نمودار ۲: منحنی های همبرد با پروتون 100 مگاالکترون ولت

در نمودار (۲) می بینیم، انرژی جذب شده در قله براگ برای تریون، دو برابر انرژی جذب شده در قله براگ پروتون است. نیم پهنای همچنان با افزایش جرم ذره کم می شود. در این برد، نیم پهنای دوترون، تقریباً نصف نیم پهنای پروتون است، و برای دو ایزوبار تریون و هلیوم ۳، یکی است. درصد انرژی جذب شده در قله، برای خانواده هیدروژن در حدود یکدیگر است، و بالاترین مقدار مربوط به هلیوم ۳ می باشد. درصد انرژی خارج شده از فانتوم، برای چشمه تریون نسبت به بقیه ذرات بالاتر است (که این می تواند به دلیل پرتوزا بودن تریون باشد)، و در پروتون از همه کمتر است.

گروه ۳- منحنی های براگ هادرون های سبک، همبرد با پروتون 150 MeV

محل قله براگ پروتون 150 مگاالکترون ولت در عمق 15.66 cm قرار دارد. منحنی های همبرد ذرات در نمودار (۳) نشان داده شده است. اطلاعات بدست آمده در جدول (۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، ایزوتوپ های هیدروژن در این برد، در قسمت ابتدایی دارای منحنی هایی با تفرع منفی هستند. نیم پهنای در تریون، حدوداً نصف نیم پهنای پروتون در این انرژی است. درصد انرژی جذب شده در قله نیز در پروتون بیشتر از دو ایزوتوپ دیگر است. در تریون به دلیل افزایش انرژی این هسته پرتوزا، درصد فرار انرژی افزایش چشمگیری دارد. در این گروه نیز بیشترین درصد انرژی جذب شده در قله مربوط به هلیوم ۳، و کمترین نیم پهنای مربوط به آلفاست.

جدول ۳: اطلاعات منحنی‌های گروه ۳

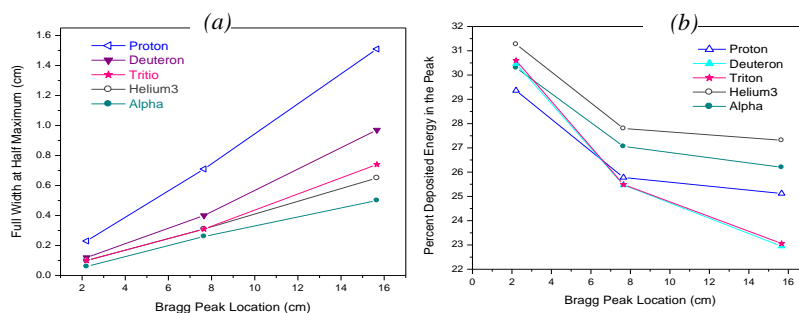


ذره	انرژی فرودی (MeV)	نیم‌پهنا (cm)	درصد انرژی جذب شده در قله	در صد فرار انرژی
پروتون	۱۵۰	۱٫۵۱	۲۵٫۱۲	۴٫۲۲
دوترون	۲۰۱٫۸۵	۰٫۹۷	۲۲٫۹۵	۹٫۷۷
تریتون	۲۴۰٫۸۵	۰٫۷۴	۲۳٫۰۶	۱۱٫۰۶
هلیوم ۳	۵۲۸٫۶	۰٫۶۵	۲۷٫۳۱	۸٫۱۲
آلفا	۵۹۶	۰٫۵۰	۲۶٫۲۰	۸٫۸۴

نمودار ۳: منحنی‌ها هم‌برد با پروتون ۱۵۰ مگا الکترون‌ولت

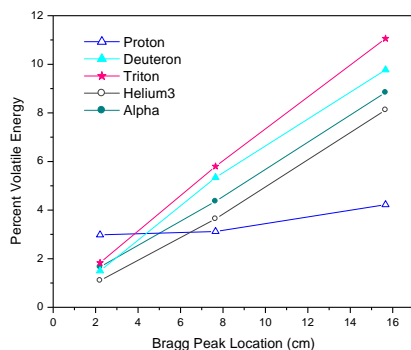
بحث و نتیجه‌گیری:

اگر منحنی هریک از ذرات را در سه گروه مورد بحث بررسی کنیم، مشاهده می‌شود با افزایش انرژی برای هر ذره: ۱- برد افزایش می‌یابد، چون در طی عبور از ماده انرژی ذره کم می‌شود، تا نهایتاً به انرژی که در آن سطح مقطع واکنش ذره با محیط بالاترین مقدار است، برسد. ۲- ارتفاع قله براگ کاهش می‌یابد. ۳- انرژی جذب شده در ابتدای مسیر ذره کم می‌شود. ۴- نیم‌پهنا زیاد می‌شود. ۵- در خانواده هلیوم از 100 MeV انتهای منحنی‌ها دارای دنباله^۱ خواهند بود، که به دلیل حضور ذرات ثانویه است. در هر گروه با افزایش جرم ذره، انرژی جذب شده در مکان قله افزایش می‌یابد. در شکل (۴) به ترتیب نمودارهای نیم‌پهنا (a)، درصد انرژی جذب شده در قله (b)، و در شکل (۵)، درصد فرار انرژی، بر حسب عمق نفوذ، برای هریک از ذرات رسم شده است.



شکل ۴: نمودار نیم‌پهنا (a) و درصد انرژی جذب شده در قله (b) بر حسب عمق نفوذ برای ایزوتوپ‌های هیدروژن و هلیوم

همانطور که از نمودار (a) می بینیم: نیم پهنا، متناسب با $1/A$ است. چون منحنی براگ ذره هر چه تیزتر باشد، برای هادرون تراپی مناسب تر است، بنابراین برای این ذرات مورد بررسی، در هر عمق، از جهت نیم پهنا، ذره سنگین تر (آلفا) بهتر است. با توجه به نمودار (b) خانواده هلیوم و بالخصوص هلیوم ۳ بیشترین میزان جذب انرژی روی



شکل ۵: نمودار درصد خروج انرژی بر حسب عمق نفوذ برای ایزوتوپ های هیدروژن و هلیوم

تومور را خواهند داشت. در شکل (۵) همانطور که ملاحظه می شود، شیب تغییرات پروتون بسیار کند است. یعنی با وجود افزایش ۲ و یا ۳ مرتبه انرژی فرودی ذره، فرار انرژی افزایش ناچیزی دارد. شیب منحنی تریتون، به دلیل پرتوزا بودنش، از همه زیادتر است. بعد از پروتون، هلیوم ۳ کمترین میزان فرار انرژی از فانتوم را دارد. با توجه به موارد مورد بررسی، خانواده هلیوم نسبت به ایزوتوپ های هیدروژن، به لحاظ فیزیکی دارای ویژگی های مناسبتری جهت هادرون تراپی است.

مراجع:

- [۱] IAEA. International Atomic Energy Agency and the International Commission: Relative Biological Effectiveness in Ion Beam Therapy. Technical report, IAEA, ۲۰۰۸.
- [۲] Torunn I Yock and Nancy J Tarbell. Technology insight: Proton beam radiotherapy for treatment in pediatric brain tumors. Nat ClinPractOncol, ۱(۲): ۹۷-۱۰۳, ۲۰۰۴.
- [۳] G. Gordon Steel, Basic Clinical Radiology, ۲۰۰۶.
- [۴] M. Dosanjh, B. Jones, and R. Meyer. Enlight and other eu-funded projects in hadron therapy. Br J Radiol, ۸۳(۹۹۴): ۸۱۱-۸۱۳, ۲۰۱۰.
- [۵] A.J. Lomax, T. Bortfeld, G. Goitein, J. Debus, C. Dykstra, P. A. Tercier, P. A. Coucke, and R. O. Mirimanoff. A treatment planning inter-comparison of proton and intensity modulated photon radiotherapy. RadiotherOncol, ۵۱(۳): ۲۵۷-۲۷۱, ۱۹۹۹.
- [۶] Eugen B Hug. Protons versus photons: a status assessment at the beginning of the ۲۱ st Century. RadiotherOncol, ۷۳ Suppl ۲: S۳۵-S۳۷, ۲۰۰۴.
- [۷] <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK۴۴۵۴۳/>