



## مقایسه‌ی توزیع دوز عمقی یون‌های سنگین کربن ۱۲ و بور ۱۰ با پروتون در

### تومورهای سرطان پستان توسط ابزار GEANT۴

زهرة، نیازمند\*؛ بهنام، آزادگان

دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

#### چکیده:

در این مقاله از یون‌های کربن ۱۲ با انرژی  $1500 \text{ MeV}$ ، بور ۱۰ با انرژی  $1126 \text{ MeV}$  و پروتون با انرژی  $67 \text{ MeV}$  به عنوان چشمه و از یک فانتوم نیم‌استوانه‌ای نزدیک به بافت پستان که توسط ابزار مونت کارلوی GEANT۴ شبیه‌سازی شده، استفاده شده است. درصد جذب انرژی برای کربن در محدوده‌ی تومور ۵۵٪، برای بور ۵۴٪ و برای پروتون ۴۹٪ می‌باشد. ذرات ثانویه‌ی تولید شده توسط کربن ۱۲ و بور ۱۰ ایجاد دنباله‌ای در اطراف قله‌ی براگ می‌کنند که این دنباله در پروتون مشاهده نشده است و بیشترین تاثیر در دنباله مربوط به دوز ذره‌ی آلفا می‌باشد. در بین شار ذرات ثانویه شار نوترون از اهمیت بالایی برخوردار است که بیشترین شار مربوط به نوترون‌های حرارتی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: هادرون تراپی، سرطان پستان، انتقال انرژی خطی، GEANT۴

#### مقدمه:

سرطان اولین دلیل مرگ در کشورهای پیشرفته است. در فرانسه، حدود سیصد هزار مورد جدید از سرطان‌های مختلف در هر سال گزارش می‌شود که نیمی از آنها توسط اشعه x درمان می‌شوند که نرخ درمان آن‌ها حدود ۴۵٪ است. این نسبت موفقیت توسط انواع مختلف درمان‌ها شامل شیمی‌درمانی، جراحی و درمان توسط اشعه x می‌باشد و متاسفانه درمان حدود ۵۵٪ آن‌ها با شکست مواجه می‌شود. دلیل اصلی این شکست نداشتن کنترل موضعی تومور و توسعه و جابه‌جا شدن آن است [۱].

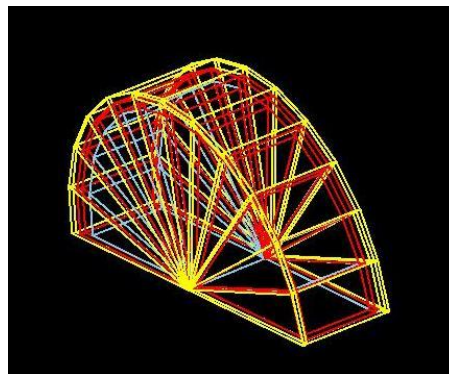
ذرات باردار برد ثابتی در ماده دارند. آن‌ها در طول مسیر خود در ماده برهم‌کنش کرده و تولید یونش می‌کنند، وقتی سرعت آن‌ها کم شود توانایی در یونش و برهم‌کنش نیز افزایش می‌یابد بنابراین یک قله متناسب با انرژی ذره در عمق ماده‌ی هدف به وجود می‌آید. بیشترین دوز در این قله ذخیره شده که قله‌ی براگ نامیده می‌شود [۲].

در انرژی‌های بالا، میدان‌های تابشی از فرآیندهایی که توسط باقیمانده‌های هسته‌ای رخ می‌دهد تاثیر زیادی می‌پذیرند. در اثر برخورد ذرات با ماده ممکن است واکنش‌های هسته‌ای نیز اتفاق بیفتد و یک یا چند نوکلئون از هسته خارج شود. واکنش‌های پاره‌های هسته‌ای باعث کم شدن شار پرتو اولیه شده و پاره‌هایی با Z کمتر و عمق نفوذ بیشتر تولید می‌کنند. پاره‌های با Z کمتر و سرعت یکسان نسبت به یون‌های اولیه برد طولانی‌تری

دارند. برد ذرات متناسب با  $\frac{A}{Z^2}$  می باشد. بنابراین پاره‌های هسته‌ای در اطراف قله‌ی براگ دنباله‌ای را ایجاد می‌کنند [۳].

### روش کار:

در این پروژه به دلیل ناتوانی کد MCNPX در ترابرد ذرات سنگین از کد GEANT<sup>۴</sup> برای شبیه سازی استفاده شده است. چندین روش برای تشکیل فانتوم پستان وجود دارد که بر اساس ویژگی‌های آناتومی پستان و بر اساس بافت مورد نیاز برای ماموگرافی تعیین می‌شود [۴]. در این پژوهش فانتوم نیم استوانه‌ای برای شبیه سازی انتخاب شده است. کل فانتوم به صورت نیم استوانه‌ای به شعاع ۱۰ cm و ارتفاع ۵ cm می باشد. بافت اصلی که در شکل [۱] با رنگ آبی مشخص شده است نیم استوانه‌ای به شعاع ۹ cm و ضخامت ۴ cm است. بافت چربی به رنگ قرمز با ضخامت ۰,۳ cm و بافت پوست به رنگ زرد به ضخامت ۰,۲ cm تعریف شده است. تومور استوانه‌ای به ارتفاع ۲ cm در عمق ۲,۵ cm از پستان واقع شده است.



شکل ۱ فانتوم شبیه سازی شده پستان.

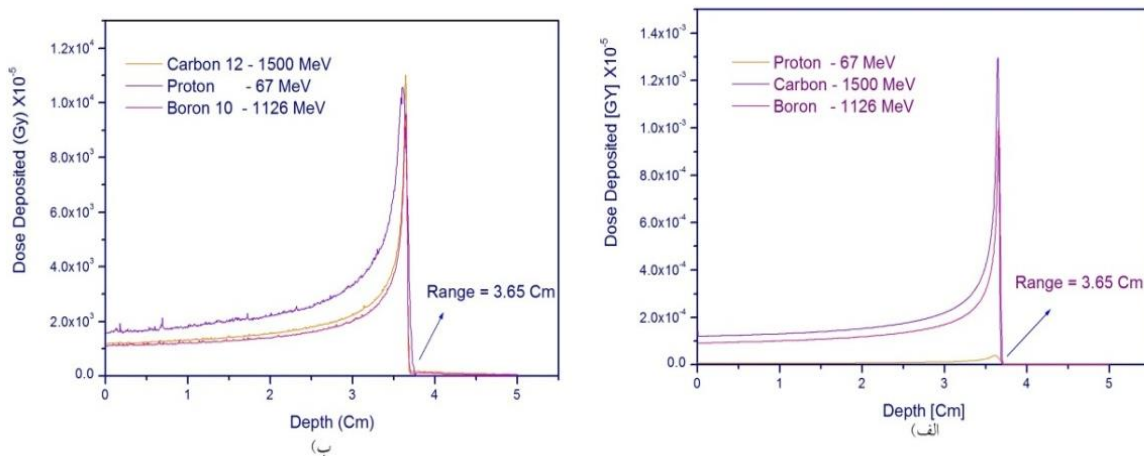
چشمه‌ی تعریف شده در این پژوهش یک چشمه‌ی دایره‌ای به شعاع ۰,۲ mm با توزیع انرژی گاوسی می باشد که بدون فاصله از فانتوم قرار گرفته است. هادرون‌تراپی یکی از روش‌های درمان سرطان می باشد که در آن از ذرات باردار استفاده می‌شود. در این پژوهش دو ذره‌ی کربن ۱۲ و بور ۱۰ از میان ذرات سنگین انتخاب شده‌اند و نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج پروتون مقایسه شده است.

جدول ۱ نسبت جرمی عناصر موجود در بافت‌های مختلف [۵].

Z	Tissue	Adipose	Skin
۱	۰,۱۰۱۹۹۷	۰,۱۱۹۴۷۷	۰,۱۰۰۵۸۸
۶	۰,۱۲۳	۰,۶۳۷۲۴	۰,۲۲۸۲۵
۷	۰,۰۳۵	۰,۰۰۷۹۷	۰,۰۴۶۴۲
۸	۰,۷۲۹۰۰۳	۰,۲۳۲۳۳۳	۰,۶۷۹۰۰۲
۱۱	۰,۰۰۰۸	۰,۰۰۰۵	۷e-۰۵
۱۲	۰,۰۰۰۲	۲e-۰۵	۶e-۰۵
۱۵	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۱۶	۰,۰۰۰۳۳
۱۶	۰,۰۰۰۵	۰,۰۰۰۷۳	۰,۰۰۰۱۵۹
۱۷	—	۰,۰۰۱۱۹	۰,۰۰۰۲۶۷
۱۹	۰,۰۰۰۳	۰,۰۰۰۳۲	۰,۰۰۰۸۵
۲۰	—	۲e-۰۵	۰,۰۰۰۱۵
۲۶	—	۲e-۰۵	۱e-۰۵
۳۰	—	۲e-۰۵	۱e-۰۵

### نتایج:

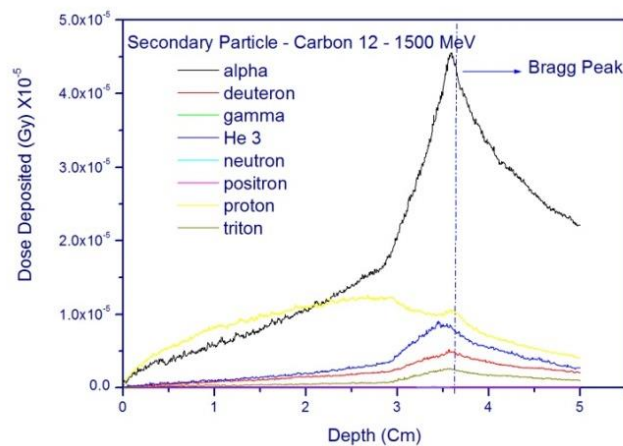
برای رسیدن به برد یکسان، کربن به انرژی بیشتری نیاز دارد همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود کربن با انرژی ۱۵۰۰ MeV، بور با انرژی ۱۱۲۶ MeV و پروتون با انرژی ۶۷ MeV بیشترین انرژی خود را در عمق ۳,۶۵ cm آزاد کرده‌اند. مش اولیه و مش قله در کربن و بور دارای انرژی بیشتر نسبت به پروتون می‌باشند. برای مقایسه‌ی بهتر در قسمت (ب) شکل ۲ نمودارها هم ارتفاع شده‌اند. تمام نمودارهای ارائه شده در این پژوهش به ازاء یک ذره فرودی رسم شده است.



شکل ۲ الف) نمودار هم برد کربن ۱۲، بور ۱۰ و پروتون ب) نمودار هم برد وهم ارتفاع کربن ۱۲، بور ۱۰ و پروتون.



ذرات ثانویه به سه دلیل دارای اهمیت‌اند. اولاً این ذرات در دوز جذبی کل شرکت دارند. دوماً، ممکن است دارای مقادیر انتقال انرژی خطی (LET) بالا باشند و سبب افزایش اثر بیولوژیکی نسبی پرتو (RBE) شوند. سوماً اینکه، نوترون‌ها از برهم‌کنش‌های ثانویه سرچشمه گرفته و این ذرات خنثی، به محیط خارج از حجم هدف، دوز منتقل می‌کنند. در شکل ۳ نمودار ذرات ثانویه برای کربن با انرژی ۱۵۰۰ MeV رسم شده است.



شکل ۳ ذرات ثانویه برای کربن ۱۲ با انرژی ۱۵۰۰ MeV.

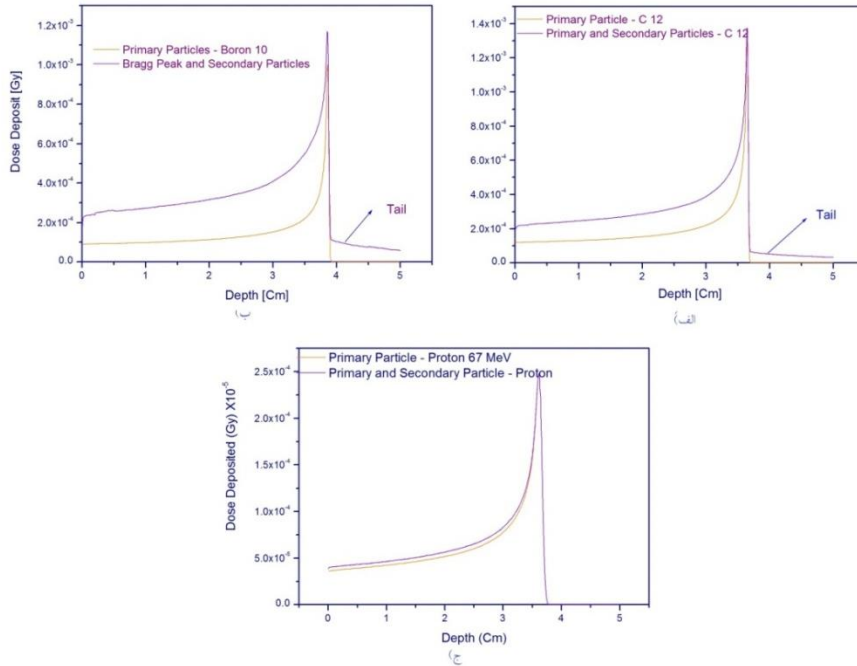
از مجموع ذرات ثانویه با ذرات اولیه چشمه دنباله‌ای در اطراف قله‌ی براگ مشاهده می‌شود. این دنباله برای کربن ۱۲ و بور ۱۰ مشاهده می‌شود اما در اطراف قله‌ی براگ پروتون دنباله‌ای مشاهده نشده است. موضع قله‌ی براگ در ۳٫۶۵ cm می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بین ذرات ثانویه‌ی تولید شده ذره‌ی آلفا بیشترین دوز را داراست و قله‌ای در نزدیکی قله‌ی براگ ایجاد کرده است و بعد از قله نیز در بین ذرات دیگر بیشترین سهم را در دنباله دارد.

بعد از آلفا، پروتون و هلیوم ۳ بیشترین دوز را بعد از موضع قله دارند و نقش به‌سزایی را در دنباله خواهند داشت و سپس به ترتیب دوترون، گاما، تریتیون و نوترون سهم دارند. و کمترین سهم مربوط به پوزیترون است. میزان دوز جذبی برای پروتون بسیار کمتر از کربن ۱۲ و بور ۱۰ می‌باشد و نیز تمام ذرات ثانویه قبل از قله‌ی براگ متوقف شده‌اند. در جدول ۲ درصد جذب انرژی در بافت‌های مختلف پستان برای سه ذره فرودی مقایسه شده‌اند.

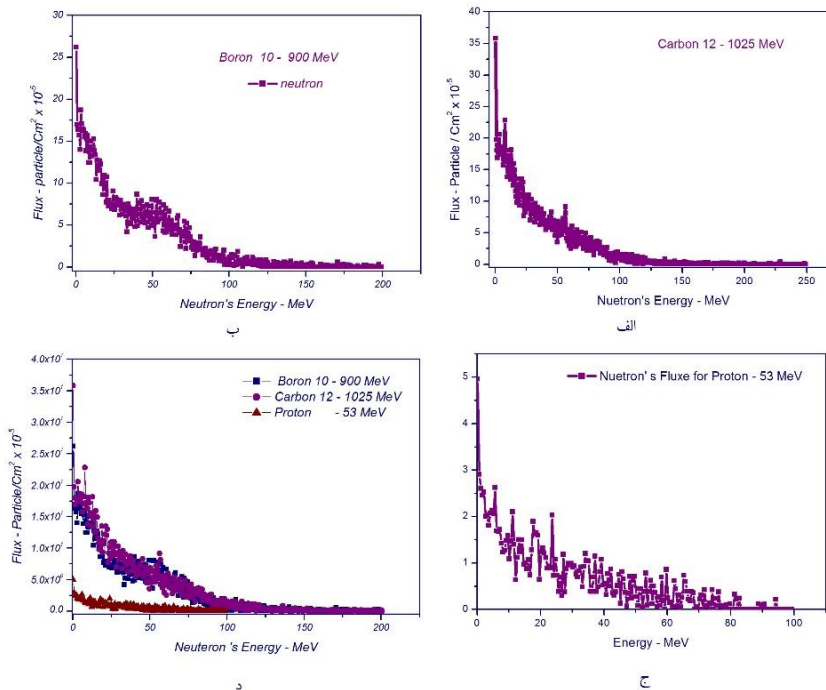
جدول ۲ درصد جذب انرژی در بافت‌های مختلف برای کربن ۱۵۰۰ MeV، بور ۱۱۲۶ MeV، پروتون ۶۷ MeV.

Particle	Skin	Adipose	Tissue	Tumor
Proton	۳.۱٪	۴.۹٪	۸۹٪	49%
Boron	۳.۷۵۸٪	۶.۴۳۵٪	۹۰٪	54%
Carbon	۳.۸٪	۵.۶٪	۸۹.۷۶٪	55%





شکل ۴ الف) دنباله‌ی قله‌ی براگ برای کربن ۱۲ با انرژی ۱۵۰۰ MeV (ب) دنباله‌ی قله‌ی براگ برای بور ۱۰ با انرژی ۱۱۲۶ MeV (ج) ذرات اولیه و مجموع ذرات ثانویه و اولیه برای پروتون ۶۷ MeV.



شکل ۵ الف) شار نوترون بر حسب انرژی نوترون برای کربن ۱۰۲۵ MeV (ب) شار نوترون بر حسب انرژی نوترون برای بور ۹۰۰ MeV (ج) شار نوترون برای پروتون ۵۳ MeV (د) مقایسه‌ی شار نوترون برای سه ذره.



یکی از فرآورده‌های برهم‌کنش هادرون‌ها با هسته‌ی اتم‌ها نوترون‌های ثانویه می‌باشند، با توجه به این که نوترون‌ها به راحتی می‌توانند به درون هسته نفوذ کنند ممکن است مشکلاتی را برای درمان به وجود آورند. در شکل ۵ شار نوترون برای سه ذره نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شار نوترون برای کربن ۱۲ و بور ۱۰ در مقایسه با پروتون بیشتر است.

### بحث و نتیجه گیری:

با توجه به محاسبات انجام شده کربن ۱۲ به دلیل سنگین‌تر بودن برای رسیدن به عمق یکسان با پروتون و بور ۱۰، به انرژی بیشتری نیاز دارد و به علت تولید ذرات ثانویه، دنباله‌ای در اطراف قله‌ی براگ ایجاد کرده است که در تومور بررسی شده باعث اثرات درمانی بیشتر می‌شود. درصد جذب انرژی در کربن ۱۲، ۵۵٪ در بور ۱۰، ۵۴٪ و در پروتون ۴۹٪ بوده است. نمودار شار نوترون برای هر سه ذره به صورت نزولی است بدین معنا که تعداد ذراتی که دارای انرژی پایین هستند از تعداد ذراتی که پر انرژی‌اند بیشتر است در نتیجه بیشترین شار نوترون مربوط به نوترون‌های حرارتی است که توانایی نفوذ کمتری به داخل هسته دارند.

### مراجع:

[۱] دکتر ضیاءالدین تابعی؛ دکتر محمد جواد اشرف؛ گیرنده‌های استروژن و پروژسترون در سرطان سینه؛ مجله‌ی غدد درون ریز و متابولیسم ایران، ۱۳۷۹.

[۲] Igor Pshenichnov, Igor Mishastine, Walter Greiner, Distribution of positron-emitting nuclei in proton and ion therapy studied with GEANT<sup>4</sup>, Physics. med. Biol. (۲۰۰۶).

[۳] D. Schardt, Tumor therapy with high-energy carbon ion beams, Nuclear Physics A ۸۷۸ ۶۶۳-۶۴۱; (۲۰۰۷).

[۴] Andy K. W. MA, Ali A. Alghamdi, Development of Realistic Computational Breast Phantom for Dosimetric Simulation. Nuclear Science and Technology ۱۴۷-۱۵۲; (۲۰۱۱).

[۵] The ROOT Team, Geant User's Guide for Application Developers ۲۰۰۹.