

مقایسه نهشت انرژی باریکه های یونی پروتون و کربنی در یک بافت توموری با استفاده از

کد شبیه سازی OK^۳

لیلا غلامزاده

دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک

چکیده:

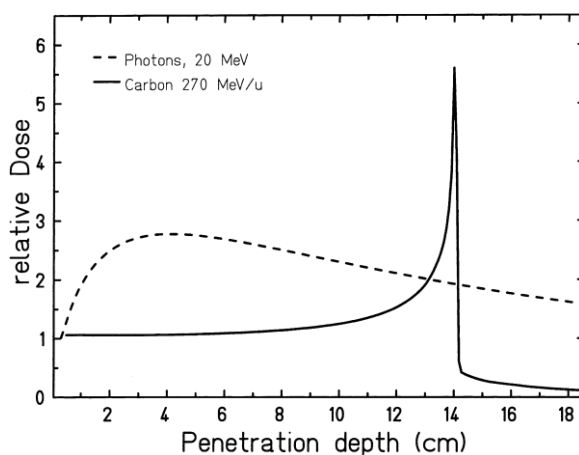
هدف اصلی هر درمانی، تخریب بافت سرطانی بدون آسیب رساندن به بافت سالم اطراف آن است. در بین روشهای به کار گرفته شده، استفاده از تابش به عنوان درمان، کمترین آسیب به دنبال خواهد داشت. باریکه های کربن هم مانند باریکه های پروتونی می تواند برای درمان طیف وسیعی از سرطان ها به کار روند و اثرهای جانبی کمی دارند و بنابراین می توان از دز بالای آنها استفاده کرد. اما یون های کربنی برخلاف یون های پروتونی، می توانند به گونه ای باعث تخریب سلول های سرطانی شوند که آنها دوباره نتوانند خودشان را ترمیم کنند. در رادیوتراپی، محاسبه پروفایل نهشت انرژی باریکه های یونی بسیار اهمیت دارد. برای انجام این کار از کد شبیه سازی OK^۳ استفاده شده است. این کد بر مبنای توان توقف یون ها در ماده پایه گذاری شده است. در این کار، نهشت انرژی سه بعدی باریکه های کربنی و پروتونی بر روی یک هدف کروی توموری، با استفاده از کد شبیه سازی OK^۳ محاسبه و رسم شده است. کلمات کلیدی: یون های کربن و پروتونی، بافتهای توموری، نهشت انرژی، کد شبیه سازی OK^۳

مقدمه:

در رادیوتراپی، باریکه های یونی عملکرد امیدوارکننده ای را برای درمان تومورهای عمیق دارند. باریکه های یونی در مقایسه با باریکه های فوتونی رایج، وابسته به خواص رادیوبیولوژی و فیزیکی متفاوت شان مزیت هایی را دارند: دز آنها با عمق نفوذ افزایش پیدا می کند و یک کاهش تندی را در انتهای پیک نهشت دارند و پروفایل دز آنها در مقایسه با باریکه های فوتونی معکوس می شود. در واقع تفاوت اصلی بین باریکه های فوتونی و یونی در پروفایل عمق نفوذشان است که در شکل ۱ نشان داده شده است. باریکه های یونی اثر بیولوژیکی افزایشی در انتهای بردشان و بنابراین در حجم هدف دارند. هدف اصلی از رادیوتراپی این است که دز دریافتی بوسیله تومور بیشینه باشد و بافت های سالم اطراف تاحد ممکن محافظت شوند. در استفاده از باریکه های فوتونی دز زیادی به بافتهای سالم می رسد سبب آسیب دیدگی آنها می شود. دلیل استفاده از ذرات باردار سنگین، افزایش بسیار زیاد دز آنها در یک عمق معین و افت سریع آنها بعد از این بیشینه است. نسبت

دز در پیک براگ به دز در مکان ورود باریکه، در یون های سنگین بیشتر از پروتون ها است و به علت جرم زیادتر این یونها، پراکندگی زاویه ای و پراکندگی انرژی یونهای سنگین در مقایسه با پروتونها قابل صرف نظر کردن است. یون های سنگین در پیگ براگ، افزایش قابل توجهی در انتقال انرژی خطی (LET) در مقایسه با ناحیه ورودی دارند [۱-۳].

باریکه های یون سنگین، عملکرد نهشت انرژی قابل توجهی در ماده دارند و می توانند با اتلاف انرژی نسبتاً کمی به درون ماده نفوذ کنند. این باریکه ها به سطح هدف برخورد می کنند و انرژی شان را در یک لایه نسبتاً عمیق و ناحیه پهن به نهشت می گذارند [۴-۵]. محاسبه پروفایل نهشت انرژی در رادیوتراپی بسیار اهمیت دارد. برای انجام این کار از کد شبیه سازی OK^۳ استفاده شده و بعضی اصلاحات روی آن انجام گرفته است. این کد بر مبنای توان توقف یون ها در ماده پایه گذاری شده است. نهشت انرژی باریکه های یون کربنی و پروتونی که بیشتر در رادیوتراپی استفاده می شوند، بر روی یک هدف کروی توموری با استفاده از این کد محاسبه و رسم شده است. برای مقایسه، انرژی اولیه این دو باریکه یکسان در نظر گرفته شده است. در مرحله بعدی از شکل دیگری از باریکه استفاده شده است و این محاسبات انجام گرفته است. ترسیم سه بعدی نهشت انرژی دارای دقت بالایی است و اطلاعات کافی مربوط به هر نقطه و انرژی متناظر با آن مختصات را نشان می دهد [۶-۸].



شکل (۱): مقایسه پروفایل های نفوذ عمقی فوتون پرنرژی و باریکه کربنی . [۱].

روش محاسبه نهشت انرژی

برای محاسبه دقیق نهشت انرژی باریکه های یونی، هر باریکه به ۳۱۶ زیر باریکه تقسیم می شود (شکل (۱)).
زیر باریکه ها نیز انرژی شان را روی سطح مش های مشخص شده در شکل (۲) به

$$E_{\text{stop}} = \frac{dE}{dL} \cdot V \cdot n^{\frac{2}{3}}$$

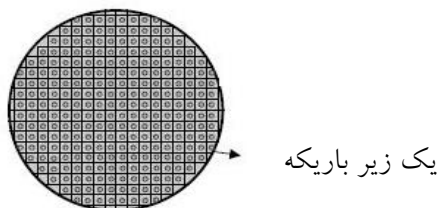
نهشت می گذارند. رابطه زیر نهشت انرژی یک باریکه یون سنگین را در یک مش محاسبه می کند.

(۱)

که dE/dL ، توان توقفی است که نهشت انرژی زیر باریکه را در واحد طول نشان می دهد، n چگالی تعداد ذرات باریکه و V حجم یک سلول در هدف است. وقتی چند باریکه، هدف را روشن می سازند و انرژی شان را روی هدف به نهشت می گذارند، انرژی نهشت کل با رابطه زیر مشخص می شود [۴]:

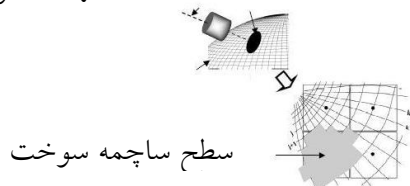
$$E_{ijk} = \sum_N E_{stop} \quad (2)$$

که E_{ijk} انرژی نهشت یافته در هر نقطه مش (i,j,k) ، منطبق بر فضای سه بعدی و N نیز تعداد باریکه های یون سنگین اثر کننده روی هر سلول است. هر زیر باریکه یک ناحیه موثر دارد که انرژی نهشت یافته روی مش ها، روی ناحیه موثر زیر باریکه، توزیع می شود (شکل (۲)).



شکل (۲): تقسیم یک باریکه به تعدادی زیر باریکه [۴].

نقطه نهشت انرژی



شکل (۳): نهشت انرژی در ساختار هر مش [۴].

نهشت انرژی باریکه یون سنگین، ناشی از برخوردهای کولنی بین الکترون های مقید و یا آزاد با یون های باریکه است. علاوه بر این، برخوردهای کولنی بین یون های باریکه و هدف، پراکندگی هسته ای و برانگیختگی امواج پلاسما در توان توقف مشارکت دارند. در ماده داغ چگال، توان توقف یک یون، برابر جمع انرژی نهشت یافته در هسته، الکترون های مقید و آزاد و یون های هدف به صورت زیر است:

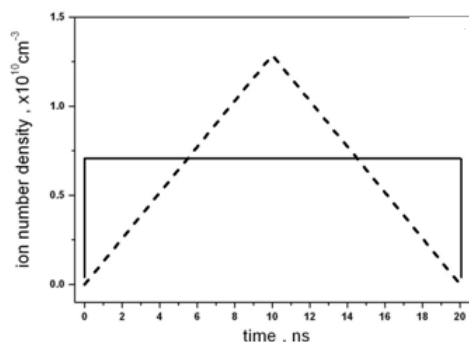
$$E_{\text{stop}} = E_{\text{nuc}} + E_{\text{free}} + E_{\text{bound}} + E_{\text{ion}} \quad (3)$$

که در رابطه فوق، E_{nuc} ، توان توقف هسته‌ای، E_{bound} توان توقف الکترون‌های مقید، E_{free} توان توقف الکترون‌های آزاد و E_{ion} توان توقف یون‌های آزاد است [۴-۸].

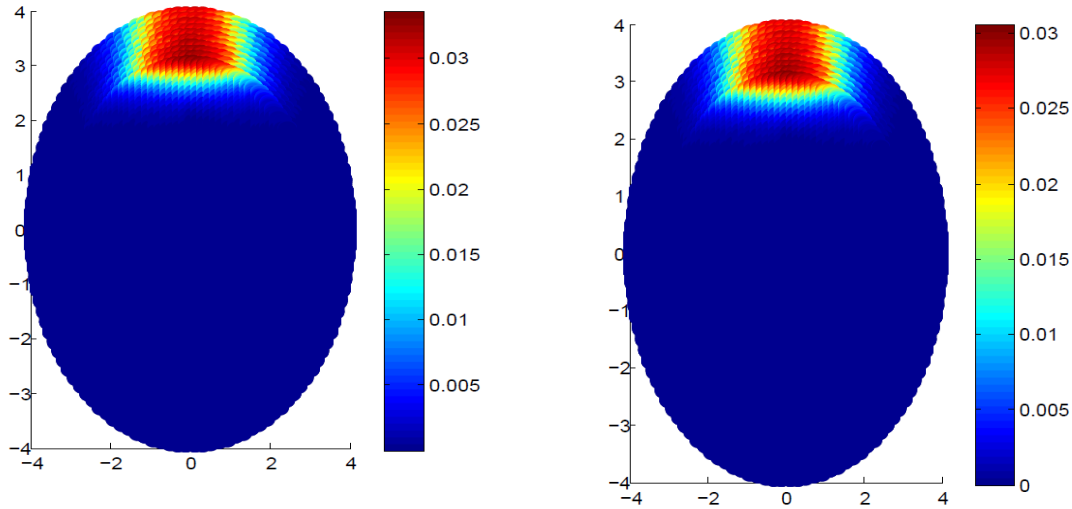
نتایج شبیه‌سازی:

مدل نهشت انرژی براساس تئوری ولاسو (Vlasov) است که توان توقف یون‌ها در ماده را محاسبه می‌کند. برای شبیه‌سازی نهشت انرژی، پارامترهای باریکه به صورت زیر است:

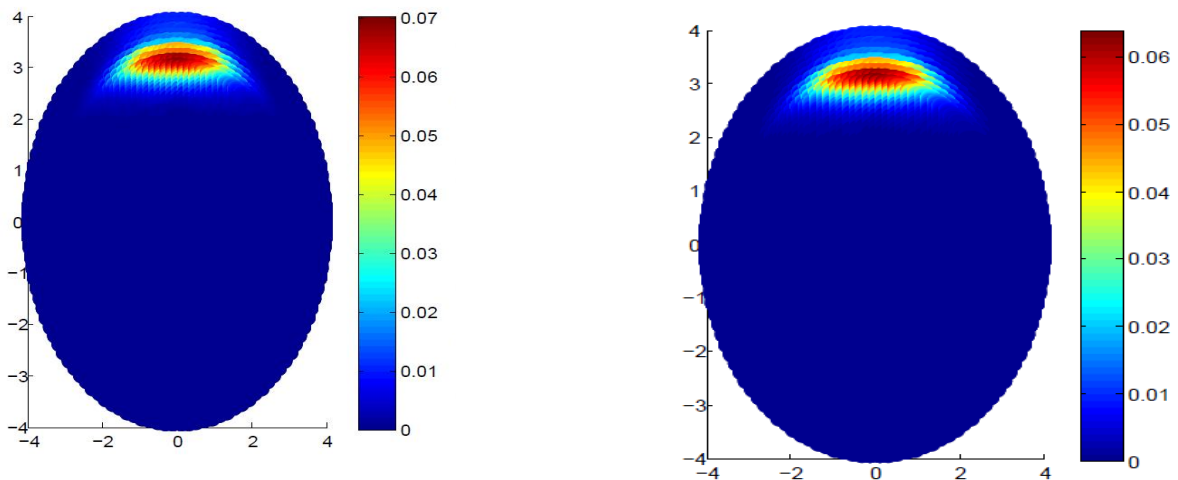
توزیع چگالی ذرات باریکه گاوسی شکل است و همه یون‌ها انرژی یکسان 150 MeV را دارند. نتایج نهشت انرژی به دست آمده به دستگاه مختصات مرکز هدف منتقل و در فایل خروجی `View3D().dat` ذخیره می‌شوند. مدت زمان اجرای آزمون برای بررسی نهشت تک باریکه، کمتر از ۲ ثانیه است. خروجی این شبیه‌سازی شامل چهار ستون است: ستون‌های اول، دوم و سوم x ، y ، z نشان دهنده مختصات هدف (کره) و ستون چهارم $dE/dV [\text{J}/\text{mm}^3]$ نهشت انرژی واحد حجم هریک از این نقاط را مشخص می‌کند. برای شبیه‌سازی، در دو تست مختلف از دو شکل پالس ورودی متفاوت که در شکل (۴) نشان داده شده، استفاده شده است. به ترتیب، شکل‌های (۵) و (۶) تصویر سه بعدی نهشت انرژی تک-باریکه پروتونی ($Z=1$) و کربنی ($Z=12$) با انرژی 150 MeV در یک هدف کرومی با مشخصات تومور نشان می‌دهند. برای ترسیم این شکل‌ها از نرم افزار `Matlab 2009` استفاده شده است. برای شکل پالس ورودی صاف (Flat)، بیشینه نهشت انرژی باریکه پروتونی $0.336 \text{ J}/\text{mm}^3$ و باریکه کربنی $0.0704 \text{ J}/\text{mm}^3$ است و این مقدار برای شکل پالس ورودی سه گوشه $0.306 \text{ J}/\text{mm}^3$ برای یون‌های پروتونی و $0.0640 \text{ J}/\text{mm}^3$ برای یون‌های کربنی است و کمینه نهشت انرژی آنها صفر (با رنگ آبی مشخص شده) است.



شکل (۴): دو شکل پالس ورودی مختلف استفاده شده: سه گوشه (Tringle) و تخت (Flat)



شکل (۵): تصویر سه بعدی نهشت انرژی تک باریکه سه گوش (Tringle) (سمت راست) و صاف (Flat) (سمت چپ) پروتونی با انرژی اولیه 150 MeV روی هدف کروی توموری.



شکل (۶): تصویر سه بعدی نهشت انرژی تک باریکه سه گوش (Tringle) (سمت راست) و صاف (Flat) (سمت چپ) کربنی با انرژی اولیه 150 MeV روی هدف کروی توموری.

بحث و نتیجه گیری

در رادیو تراپی، تعیین الگوی نهشت انرژی و عمق نفوذ یا برد باریکه، از اهمیت زیادی برخوردار است. این کد توانایی محاسبه الگوی نهشت را برای باریکه های مختلف بر روی شکل های هدف مختلف دارد که می

توان با تغییر داده های ورودی آنها را شبیه سازی کرد. با شبیه سازی سه بعدی نهشت انرژی، می توان مختصات دقیق نقاط و انرژی مربوط به آنها و همچنین بیشینه و کمینه نهشت انرژی را در هدف مشخص کرد. این شبیه سازی دارای دقت بالایی است و می تواند در پرتو پزشکی با باریکه های یونی مورد استفاده قرار گیرد. با مقایسه شکل های ۵ و ۶ مشاهده می کنیم که باریکه کربنی دارای نهشت انرژی بیشتر و عمق نفوذ کمتر است اما باریکه پروتونی برعکس است. که این کاملا با رابطه بته همخوانی دارد. در اینجا تغییر شکل پالس ورودی (صاف یا سه گوش) به میزان ناچیزی روی نهشت انرژی، تاثیرگذار است.

مراجع:

- [۱] M. Scholz, Heavy Ion tumor therapy, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol. ۱۶۱, ۷۶-۸۲ (۲۰۰۰).
- [۲] G. Kraft, Tumor Therapy with Heavy Charged Particles, Progress in Particle and Nuclear Physics ۴۵, S۴۷۳ (۲۰۰۰).
- [۳] J.J. Bevelacqua, Systematics of Heavy Ion Radiotherapy, Bevelacqua Resources, Radiation Protection Management • Volume ۲۲, No. ۶, (۲۰۰۵).
- [۴] A.I. Ogoyski, T. Someya, S. Kawata, Code OK^۱—Simulation of multi-beam irradiation on a spherical target in heavy ion fusion, Computer Physics Communications, Vol. ۱۵۷, ۱۶۰-۱۷۲ (۲۰۰۴).
- [۵] A. I. Ogoyski, S. Kawata, ICF modelling of interaction of large heavy ion beams with a target, Utsunomiya University, Utsunomiya ۳۲۱, ۱-۱۰ (۲۰۰۷).
- [۶] T. Someya, et. al. Heavy-ion beam illumination on a direct-driven Pellet in heavy-ion inertial fusion, Physical Review Special-Topics-Accelerators and Beams, Vol. ۷, ۰۴۴۷۰۱-(۱-۱۳) (۲۰۰۴).
- [۷] T. Someya, et. al. HIB illumination on a target in HIF, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. ۵۴۴, ۴۰۶-۴۱۱ (۲۰۰۵).
- [۸] A.I. Ogoyski, T. Someya, et, al. Heavy ion beam irradiation non-uniformity in inertial fusion, Physics Letters A, Vol. ۳۱۵, ۳۷۲-۳۷۷ (۲۰۰۳).