

شبیه سازی نهشت انرژی باریکه های یون سنگین در هدف های همجوشی محصور سازی اینرسی با استفاده از کد شبیه سازی OK2

شیوا قاسمی نژاد، عباس قاسمی زاد*، لیلا غلام زاده

دانشگاه کیلان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده

در این کار تحقیقی، نهشت انرژی باریکه های یون سنگین متفاوت، بر روی یک ساچمه سوخت کروی با عدد اتمی بالا که به عنوان کاهنده در هدف همجوشی هسته ای استفاده می شود شبیه سازی شده و برای انجام این کار از کد شبیه سازی OK2 استفاده شده است. برای بررسی دقیق نتایج مربوط به اجرای کد باید به روشی بتوانیم این داده ها را تجزیه و تحلیل کنیم، به همین دلیل با نوشتن یک برنامه کامپیوتری توسط نرم افزار MATLAB2008 امکان ترسیم سه بعدی داده های مربوط به نهشت انرژی روی هدف ها که از اجرای کد OK2 حاصل شده، فراهم آمده است. شکل ها به طور واضح درون هدف را نشان می دهند و نقاطی را که تابش به آنها برخورد کرده را از نقاط دیگر جدا می کنند.

کلید واژه: نهشت انرژی، باریکه های یون سنگین، کد شبیه سازی OK2، ترسیم سه بعدی داده ها، کاهنده

مقدمه

توان توقف یون در ماده یک پدیده طبیعی مهم است که اهمیت بسیار زیادی در کاربرد های عملی دارد. خصوصیت برتر در فرایند همجوشی یون سنگین، جفت شدگی مستقیم انرژی باریکه ها روی هدف و لایه نهشت انرژی نسبتا عمیق آن است. با این حال محاسبه تحلیلی گسیلندگی و نهشت انرژی سیستم های چند باریکه ای مشکل است. کد شبیه سازی OK2 قابلیت شبیه سازی نهشت انرژی سه بعدی باریکه های یونی روی هدف های مختلف، حتی با شکل نا منظم را دارا می باشد [۱-۳]. تفاوت اساسی در نهشت انرژی بین باریکه های یونی و لیزرها این است که یون ها در ماده نفوذ کرده و انرژی خود را کاملا درون هدف به نهشت می گذارند. برخلاف لیزرها در اینجا هیچ گونه پلاسمای بحرانی نداریم، به جای آن یون ها در فاصله معینی متوقف می شوند. بیشتر انرژی آنها در نزدیکی انتهای برد یون و کمی قبل از آن آزاد می شود که این پدیده را پیک براگ (Bragg peak) می نامند [۱-۳].

ساز و کار نهشت انرژی پایه، شامل یونش و برانگیزش الکترون های مقید اتمی از طریق برهم کنش های کولنی با یون ها است. این فرایند با فرمول بته - بلاخ (Bethe-Bloch) برای توان توقف یون ها محاسبه می شود. این معادله، توان توقف ناشی از برخورد با الکترون های مقید را توصیف می کند. در این مدل از توصیف توماس - فرمی ابر الکترونی استفاده می شود و شامل برخورد های کولنی به صورت فرایند های یونش و برانگیزش است [۴ و ۵]. برای یونش های بالا تر باید تصحیحات لایه ای اتمی و اثرات قطبشی نیز وارد محاسبات می شود که در اینجا از مدل LSS لینهارد (Linhard) استفاده می کنیم [۶]. در این صورت، توان توقف یون های پر انرژی در ماده سرد به طور دقیق تر به صورت زیر در می آید [۸]:

$$E_{bound} = E_{LSS} \cup E_{Bethe} \quad (1)$$

فرایند توان توقف هسته ای در انتهای برد ذره مؤثرتر است و برخورد های کولنی الاستیک بین یون های پرتابی و هسته هدف را توصیف می کند [۴]. در ماده داغ چگال، که در همجوشی محصور سازی لختی با آن مواجهیم، توان توقف یک یون برابر با جمع نهشت انرژی در هسته هدف، الکترون های آزاد و مقید هدف و یون های هدف است [۷ و ۸] به طوری که داریم:

$$E_{stpower} = E_{nuc} + E_{bound} + E_{free} + E_{ion} \quad (2)$$

روش شبیه سازی

تقسیم بندی باریکه و هدف به پیچیدگی شکل و ساختار هدف بستگی دارد. در تست های کد OK2 هر باریکه را به صورت ۳۱۶ زیر باریکه در نظر می گیریم و هدف هم شامل ۶۴۸۰۰۰ مش (۲۰×۱۸۰×۱۸۰) در جهت های R و θ و ϕ می باشد. سطح خارجی هدف نیز شامل ۳۲۴۰۰ چهار ضلعی کوچک است. هر چهارضلعی با یک صفحه با بردار نرمال $\vec{n}(A, B, C)$ تعریف می شود که معادله صفحه آن به صورت زیر است [۸ و ۱]:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3)$$

برای معادله مسیر زیر باریکه ها نیز داریم:

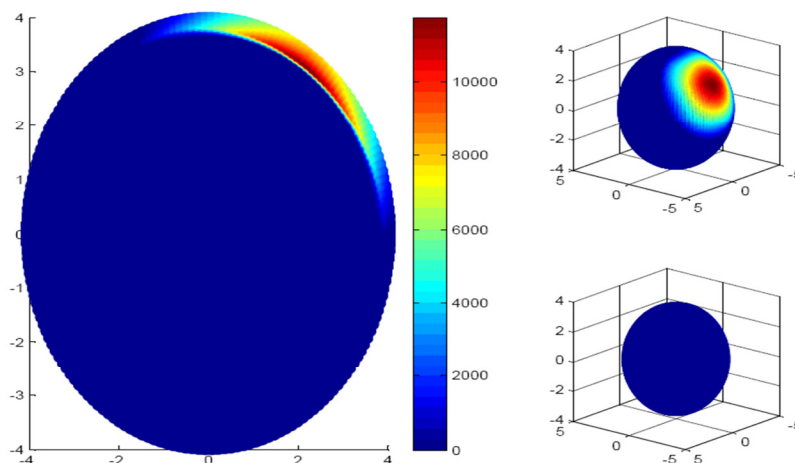
$$\vec{r}_{bmt} = \vec{b}_0 + \vec{b} \cdot t, \quad (t = \frac{\vec{n} \cdot \vec{b}_0 + D}{\vec{n} \cdot \vec{b}}, \vec{n} \cdot \vec{b} < 0, t \geq 0) \quad (4)$$

که در آن b_0 نقطه تقاطع زیر باریکه ها با صفحه α و بردار b جهت باریکه را تعیین می کند. برای صفحات انتخاب شده، ما فقط صفحاتی را انتخاب می کنیم که نقطه تقاطع آنها درون صفحه قرار گیرد. در تمامی شبیه سازی ها نهشت انرژی یک باریکه نشان داده شده است. نهشت انرژی روی یک کره تک لایه با ضخامت

۱mm و شعاع خارجی ۴mm صورت می گیرد [۱۶و۲۰]. نتایج در دستگاه مختصات دکارتی تبدیل می شود و به صورت یک فایل متنی در کامپیوتر ذخیره می گردد. فایل های حاصل از اجرای تست های OK2 به صورت چهار ستون است که ستون های اول، دوم و سوم به ترتیب نشان دهنده (Z و Y و X) و ستون چهارم نهشت انرژی در واحد حجم برحسب ژول بر میلیمتر مکعب برای هر کدام از این نقاط متناظر است [۱]. برای بررسی و مطالعه نقاط مورد تابش قرار گرفته باید این داده ها را به صورت پیوسته بررسی نمود، یعنی هر نقطه را در سه بعد ترسیم کرد و سپس به هر نقطه انرژی مورد نظر آن را نسبت داد. به این کار به اصطلاح ترسیم سه بعدی داده ها (3D visualization) می گویند. برای این کار ابتدا یک برنامه توسط نرم افزار MATLAB نوشته شده که با استفاده از این برنامه می توان به هر کدام از نقاط انرژی متناظر با آن، یک رنگ مشخص نسبت داد. در این برنامه، گستره رنگ ها از آبی تا قرمز تیره تعریف شده اند که آبی متناظر با کمترین نهشت انرژی یعنی صفر (نقاطی که تحت تابش قرار ندارند) و قرمز تیره متناظر با بیشترین نهشت انرژی می باشد که در تست های مختلف با باریکه ها و هدف های مختلف، مقدار متفاوتی را دارا می باشد.

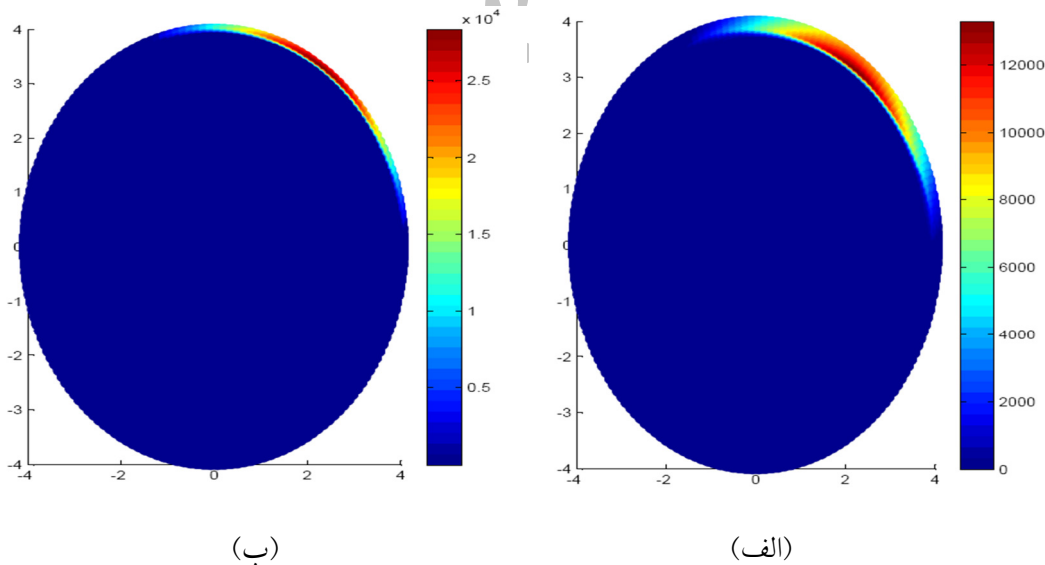
نتایج

در شکل (۱) تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 را مشاهده می کنید. این شکل مربوط به هدف کروی Al بوده و باریکه های مورد استفاده سرب ($Z=82$) هستند که انرژی ۸GeV دارند. این تصویر مربوط به مقطع عرضی کره می باشد که نهشت انرژی باریکه در عمق هدف را به خوبی نشان می دهد. میزان بیشینه نهشت انرژی در واحد حجم برابر با $11743/55J/mm^3$ و کمینه نهشت انرژی صفر است. نقاط با رنگ های مختلف نشان دهنده انرژی های مختلف می باشد.

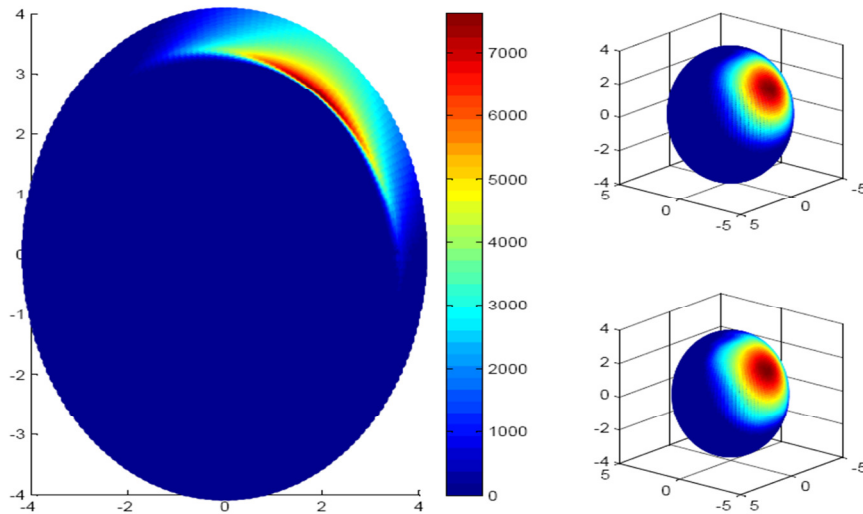


شکل (۱): ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 برای هدف Al با ضخامت ۱mm و باریکه سرب با انرژی ۸GeV.

در شکل (۲-الف) تصویر مربوط به ترسیم سه بعدی داده های حاصل از اجرای کد برای باریکه های اورانیوم ($Z=92$) با انرژی 8 GeV در همان هدف AI را مشاهده می نمایید. همان طور که مشخص است میزان نهشت انرژی باریکه های اورانیوم به دلیل این که عدد اتمی بالاتری دارد بیشتر از باریکه های سرب است. میزان بیشینه نهشت انرژی باریکه های اورانیوم در هدف آلومینیوم برابر با $13287/45\text{ J/mm}^3$ و کمترین نهشت انرژی صفر می باشد. در شکل (۲-ب) تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی نهشت انرژی باریکه های اورانیوم ($Z=92$) با انرژی 8 GeV را در هدف کروم از جنس سرب با همان ضخامت مشاهده می کنید. با توجه به این که در این حالت هم عدد اتمی باریکه مورد استفاده و هم عدد اتمی ماده هدف بالاتر است، میزان توان توقف باریکه ها درون هدف نسبت به موارد قبلی بسیار بالاتر بوده و بیشینه نهشت انرژی در این حالت به مقدار $28330/33\text{ J/mm}^3$ می رسد. همچنین با توجه به شکل (۲-ب) کاملاً واضح است که عمق نفوذ باریکه در این حالت کمتر بوده و باریکه ها در عمق کمتری متوقف می شوند. این یعنی اگر بخواهیم از این هدف و این باریکه استفاده کنیم می توانیم لایه سرب را نازک تر انتخاب کنیم.



شکل (۲): تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 تحت تابش باریکه اورانیوم با انرژی 8 GeV برای هدف های کروم با ضخامت 1 mm (الف) آلومینیوم و (ب) سرب.



شکل (۳): تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی داده های مربوط به اجرای کد OK2 برای هدف کروی از جنس AI با ضخامت ۱ mm و باریکه سزیم با انرژی ۸ GeV.

در شکل (۳) تصویر حاصل از ترسیم سه بعدی حاصل از نهشت انرژی باریکه های سزیم ($Z=55$) با انرژی ۸ GeV را در هدف کروی از جنس آلومینیوم مشاهده می کنید. در این حالت چون هم عدد اتمی ماده هدف و هم عدد اتمی باریکه مورد استفاده کمتر از حالت های قبلی است، مقدار توان توقف کمتر از تمام حالت های قبلی است و همان طور که از شکل معلوم است باریکه های سزیم به طور کاملا محسوس در عمق بیشتری از ماده نفوذ کرده اند. پس هر چه باریکه مورد استفاده از نظر عدد اتمی سبک تر باشد، یا باید از هدف با عدد اتمی بالاتری استفاده کنیم و یا ضخامت لایه را متناسب با عمق نفوذ باریکه افزایش دهیم تا از ورود باریکه ها به لایه بعدی جلوگیری کنیم. چون هدف ما این است که باریکه ها در لایه اول متوقف شوند و انرژی به نهشت گذاشته شده در این لایه به گرما تبدیل شود. بیشینه نهشت انرژی در این حالت برابر با 7608 VJ/mm^3 می باشد و همچنین در این حالت بیشترین عمق نفوذ را مشاهده می کنید.

بحث و نتیجه گیری

این شبیه سازی با دقت بالایی می تواند مختصات دقیق نقاطی که باریکه ها انرژی خود را به نهشت می گذارند تعیین کند. کار ترسیم سه بعدی (3D visualization) داده ها راهی برای مطالعه داده های خروجی از کد شبیه سازی OK2 می باشد. همان طور که در شکل ها مشاهده شد، هر چقدر عدد اتمی باریکه بالاتر باشد، مقدار توان توقف باریکه هم بیشتر می شود که این موضوع با تئوری ها مطابقت دارد و در فرمول های مربوط به نهشت انرژی هم این وابستگی واضح می باشد. این موضوع با مقایسه نتایج بدست آمده در شکل های (۱) و (۲) با یکدیگر کاملا مشاهده می شود، بدین معنی که برای هدفی با ضخامت و جنس یکسان و

انرژی یکسان باریکه ها، بیشترین نهشت انرژی مربوط به باریکه های اورانیوم بدست آمد که بیشترین عدد اتمی را دارا می باشد. عدد اتمی ماده هدف هم عامل تأثیر گذار بر توان توقف و نهشت انرژی باریکه ها است به طوری که هدف های با عدد اتمی بالاتر، باعث افزایش توان توقف باریکه می شوند. این تأثیر گذاری نیز در تطابق با تئوری می باشد و با توجه به مقایسه شکل های (۲-الف) و (۲-ب) کاملاً مشهود است. در انتهای تجزیه و تحلیل داده ها معلوم شد که نمی توان از یک هدف مشترک برای تمامی باریکه ها استفاده کرد. بدین معنی که با تغییر نوع باریکه، نوع ماده هدف در لایه اول و یا ضخامت آن باید تغییر کند. این امر در مقایسه داده های مربوط به شکل های اشاره شده باعث افزایش قیمت تمام شده برای ساخت هدف ها می شود چون نمی توان تولید انبوه آنها را به سادگی انجام داد. این هدف می تواند در آزمایش های همجوشی یون سنگین با روش راه اندازی مستقیم مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این شبیه سازی و ترسیم دقیق مقدار انرژی در نواحی مختلف درون کره به ما کمک می کند تا طراحی بهینه را برای هدف های همجوشی با توجه به باریکه ها و هدف های متفاوت بدست آوریم. همچنین با توجه به عمق نفوذ باریکه درون هدف می توان ضخامت مناسب هدف را به گونه ای طراحی کرد که نهشت انرژی باریکه ها در عمق مناسب صورت گیرد و ضخامت باریکه به اندازه ای باشد که پیک براگ باریکه، کاملاً درون این لایه قرار داشته باشد.

مراجع

- [۱] A.I. Ogoyski, S. Kawata, T. Someya, *Code OK2—A simulation code of ion-beam illumination on an arbitrary shape and structure target*, Computer Physics Communications 161, 143–150, 2004.
- [۲] A.I. Ogoyski, T. Someya, T. Sasaki, S. Kawata, *Heavy ion beam irradiation non-uniformity in inertial fusion*, Physics Letters A 315, 372–377, 2003.
- [۳] T. Someya, A. Ogoyski, S. Kawata, T. Sasaki, *Heavy ion beam illumination uniformity in heavy ion beam inertial confinement fusion*, IEEJ Trans, Vol. 124, No.1, 2004.
- [۴] S. Pfalzner, *An Introduction to Inertial Confinement Fusion*, CRC press, New York, 2006.
- [۵] S. Atzeni, J. Meyer-Ter-Vehn, *The Physics of Inertial Fusion*, Clarendon Press, 2004.
- [۶] H.H. Andersen, J.F. Ziegler, *The Stopping Power and Range of Ions in Matter*, Pergamon Press, 1977.
- [۷] A.I. Ogoyski, T. Someya, S. Kawata, *Code OK1—Simulation of multi-beam irradiation on a spherical target in heavy ion fusion*, Computer Physics Communications 157, 160–172, 2004.
- [۸] A. I. Ogoyski, S. Kawata, *ICF Modelling of Interaction of Large Heavy Ion Beams with a Target*, Utsunomiya University, Utsunomiya 321-8585, Japan, 2005.