

## تحقیق پارامترهای بهینه در شبیه سازی تولید اشعه ایکس ترمزی حاصل از الکترون های

### تولید شده لیزری به عنوان چشمه های فوتونوترونی

لیدا، نیک زاد<sup>۱\*</sup>؛ زعفر، ریاضی<sup>۲</sup>؛ سعیده، نجفی<sup>۳</sup>

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده اپتیک و لیزر

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

۳. دانشگاه آزاد تهران، واحد مرکزی، دانشکده فیزیک

#### چکیده:

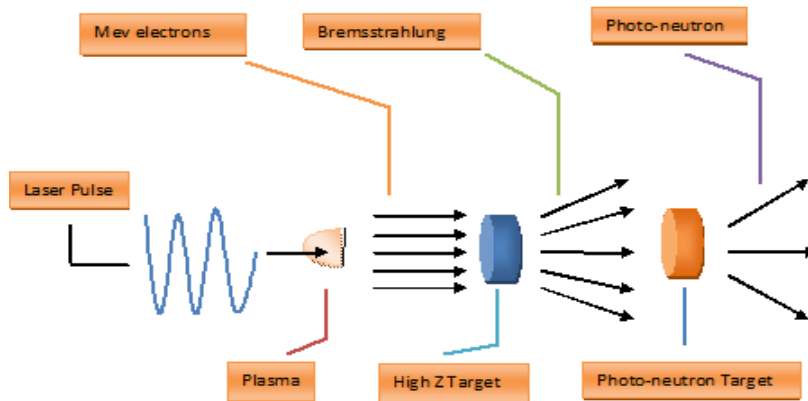
در این مقاله با استفاده از طیف های شبه تکفام الکترونی حاصل از برهم کنش لیزر-پلازما تولید اشعه ایکس تابش ترمزی، و به دنبال آن تولید فوتونوترون ها در هدف های مختلف با استفاده از کد MCNPX شبیه سازی شده اند. طیف الکترونی بهینه جهت تولید اشعه ایکس با بیشترین شار، ضخامت و جنس بهینه هدف های مختلف و زاویه بهینه گسیل فوتون محاسبه گردیده اند. نتایج نشان می دهند که با افزایش انرژی ماکزیمم الکترون، بازدهی تولید فوتون ها در راستای الکترون فرودی، و همچنین ضخامت بهینه هدف افزایش می یابند. همچنین برای هدف های با چگالی بیشتر، افزایش گسیل فوتون های ترمزی، و تولید شار بیشتری از نوترون ها مشاهده می شود.

**کلید واژه:** شتابدهنده لیزری، الکترون های شبه تکفام، فوتون ترمزی، تولید نوترون

#### مقدمه:

در سالهای اخیر از برخورد پالس لیزرهای توان بالا با پلازما برای شتاب ذرات از جمله الکترون ها استفاده شده است. از برخورد الکترون های پر انرژی با هدف جامد با Z بالا می توان برای تهیه منابعی از ذرات مانند پروتون، پوزیترون، فوتون های با انرژی در حد مگا الکترون ولت استفاده نمود [۱]. شتاب دهنده های ذرات کاربردهای بسیار گسترده ای در زمینه های مختلف از جمله در علوم پزشکی، بیولوژی، مواد، و فیزیک پرانرژی دارند. در شتاب دهنده های متداول، میدان های شتاب دهنده محدود به چند  $\text{MeV m}^{-1}$  هستند. بنابراین، تولید طیف های الکترونی پرانرژی معمولاً نیازمند شتاب دهنده های بزرگ و گران قیمت است [۲]. شتاب دهنده های لیزر-پلاسمایی بعنوان نسل بعدی شتاب دهنده های کم حجم مطرح شده اند، و این امر به دلیل قابلیت تحمل میدان های الکتریکی بسیار بزرگ توسط آنهاست (بزرگتر از  $100 \text{ GeV m}^{-1}$ ) [۳]. برای بیشتر کاربردها، به طیف های الکترونی با کیفیت بالا و توزیع تک انرژی نیاز است. طیفی که فاقد این شرایط باشد به سختی قابل استفاده می باشد، زیرا انتقال و یا کانونی کردن آن دشوار خواهد بود. به تازگی سه گروه تحقیقاتی از کالج سلطنتی لندن، لابر اتوار ملی برکلی لارنس (LBNL) و LOA، به طور مستقل به تولید طیف های شبه تک انرژی الکترون با انرژی بالا پرداخته اند، آنها این کار را مستقیماً با کانونی کردن یک پالس لیزر بر روی یک پلاسمای همگن، یا بر روی یک کانال پلازما انجام دادند [۴،۵،۶].

هنگامی که الکترون های پر انرژی بر روی هدف جامد با Z بالا برخورد می کنند، فوتون های ایکس شامل طیف گسسته مشخصه (انرژی در حد keV) و پیوسته تابش ترمزی تولید می شوند. در این کار، مطالعه ما بر روی تابش ترمزی با انرژی بالا متمرکز می شود. نشان داده می شود که شدت تابش ترمزی به طور حساسی به طیف الکترون، جنس و ضخامت هدف و زاویه پراکندگی بستگی دارد [۷]. این فوتون های تابش ترمزی با هسته های ماده هدف ثانویه واکنش نشان داده در اثر واکنش فوتوهسته ای تابش هسته ای تولید می کنند. در شکل ۱ تولید فوتونوترون از برخورد طیف ترمزی حاصل از الکترونها ی لیزری به صورت شماتیک نشان داده شده است. در طی این فرآیند، فوتون جذب هسته هدف شده به عنوان یک تعامل فوتو-نوکلئونی منجر به تولید نوکلئون می شود [۸]. مکانیسم فیزیکی آن را می توان اینگونه شرح داد که وقتی فوتون فرودی به هدف جامد برخورد می کند، انرژی فوتون به هسته منتقل شده و باعث تحریک هسته می شود و آن را به یک حالت گسسته با انرژی بالاتر می برد و منجر به تغییر انرژی نوترون مرز و پروتون داخل هسته شده و انرژی اضافی به فرم نوترون ساطع می شود. این واکنش یک واکنش آستانه ایست زیرا انرژی فوتون می باید حداقل برابر انرژی پیوندی یک نوکلئون باشد و چون انرژی پیوندی نوکلئون به نوع هسته بستگی دارد، بنابراین انرژی آستانه معمولاً بالاست. احتمال وقوع اثر واپاشی در انرژی های بالای ۱۰ MeV بیشتر است. در واکنش های فوتو- نوکلئون انتشار نوترون محتمل تر از پروتون می باشد.



شکل ۱: شمایی از تولید فوتونوترون از طیف ترمزی حاصل از الکترونها ی لیزری

### روش کار:

در این کار برای شبیه سازی تولید تابش ترمزی، از طیف های تجربی شبه تک انرژی الکترون که از برهم کنش لیزر- پلاسما تولید می شوند استفاده شده است. برای تولید چشمه های فوتونوترنی، طیف های شبه تکفام الکترونی با انرژی بالای ۱۰ MeV انتخاب شده اند. هدفها هم به شکل استوانه توپر انتخاب شده اند. در جدول ۱ مشخصات لیزر و پلاسمای مولد طیف های الکترونی و شعاع هدف برای تولید تابش ترمزی آمده است. . شعاع هدف ها متناسب با ابعاد چشمه الکترونی انتخاب شده است.

جدول ۱: مشخصات لیزر و پلاسمای مولد طیف های الکترونی و شعاع هدف

شعاع هدف (mm)	انرژی پیک الکترون (MeV)	چگالی پلاسما ( $cm^{-3}$ )	قدرت لیزر (TW)
---------------	-------------------------	----------------------------	----------------

۱۰	$1 \times 10^{19}$	۱۱	۸
۱۶,۶	$14 \times 10^{19}$	۴۰	۰,۰۱۸
۵۰	$2 \times 10^{19}$	۵۵	۰,۰۰۴
۲۰	$6 \times 10^{18}$	۱۷۵	۰,۰۷۲

برای شبیه سازی با کد MCNPX که از تقریب بون برای نمونه برداری فوتون های تابش ترمزی استفاده نموده است [۹]، ابتدا مشخصات چشمه و هدف به عنوان ورودی به کد داده شده و بعد از اجرا، خروجی به صورت تعداد کل فوتونهای تولید شده حاصل می شود. داده های طیف های تجربی چشمه الکترونی را به کمک نرم افزار digxy استخراج شده و به کد معرفی می شوند. هدف های بررسی شده در این تحقیق شامل استوانه های حجمی از جنس سرب ( $z=82, \rho=11,34 \text{ g/cm}^3$ )، تنگستن ( $z=74, \rho=19,3 \text{ g/cm}^3$ ) و تانتالیم ( $z=73, \rho=16,6 \text{ g/cm}^3$ ) هستند. ضخامت هدف (همان ارتفاع استوانه)، از ۱۰۰ میکرون تا ۳۰۰۰ میکرون در نظر گرفته شده و ضخامت بهینه برای هر طیف و هر ماده بدست آورده شده است. بعد از بدست آوردن ضخامت و جنس بهینه برای هدف، توزیع زاویه ای پراکندگی طیف ترمزی، و در نهایت تولید نوترون از فوتون های ترمزی شبیه سازی شده اند.

### نتایج: الف) یافتن طیف ترمزی بهینه

برای مقایسه طیف ها و یافتن بهترین ضخامت ها از پارامتری به نام کسر موثر استفاده می کنیم. این پارامتر به صورت زیر تعریف می شود:

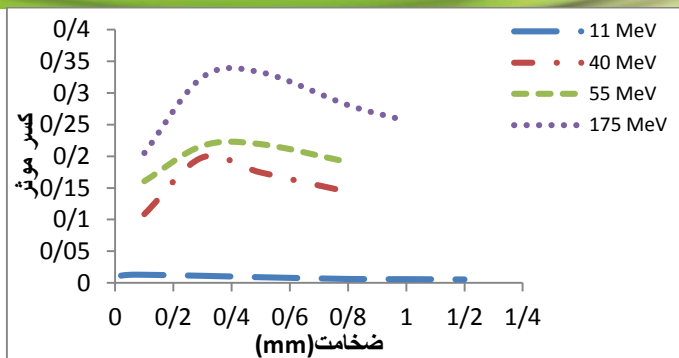
$$(1) \quad \text{کسر موثر} = \frac{\text{تعداد فوتونها با انرژی بیش از } E}{\text{تعداد کل فوتونها}}$$

که انرژی  $E$ ، حداقل انرژی لازم فوتونها برای شرکت در فرایند فوتونوترونی می باشد. مقادیر  $E$  برای انجام فرایند فوتونوترونی برای هدف های تنگستن، سرب و تانتالیم در جدول ۲ آمده اند:

جدول ۲: مقادیر  $E$  برای انجام فرایند فوتونوترونی برای هدف های تنگستن، سرب و تانتالیم

ایزوتوپ	کمترین انرژی $E$ (MeV)	فراوانی (%)
Pb-۲۰۸	۷,۳۷	۵۲,۴۰
Ta-۱۸۱	۷,۵۸	۹۹,۹۹
W-۱۸۴	۷,۴۱	۳۰,۷۰

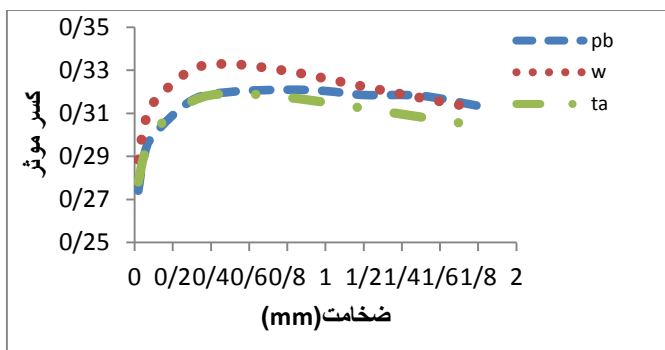
در شکل ۲ نمودار کسر موثر با استفاده از چهار طیف الکترونی مذکور، برای ضخامت های مختلف تنگستن رسم شده است.



شکل ۲: نمودار کسر موثر برای ضخامت های مختلف تنگستن با استفاده از طیف های الکترونی

همانطور که در شکل مشاهده می شود برای طیف الکترونی با انرژی پیک بیشتر، کسر موثر بیشتری به دست می آید، یعنی با استفاده از الکترونهاى پر انرژی تر، تعداد فوتون های بیشتری با قابلیت تولید فوتون ترون تولید می شود.

برای بررسی تاثیر جنس هدف در تولید تابش ترمزی، سه ماده سرب، تنگستن، تانتالیم مورد بررسی قرار گرفته اند؛ نتایج حاصله کسر موثر بر حسب ضخامت، با بکارگیری طیف الکترونی ۱۷۵ MeV، در شکل ۳ نشان داده شده اند. همان گونه که از شکل مشاهده می شود، در بین سه ماده، استفاده از تنگستن با چگالی بزرگتر، فوتونهای با کسر موثر بیشتری تولید می کند.



شکل ۳: نمودار کسر موثر برای ضخامت های مختلف هدف های سرب، تنگستن، تانتالیم

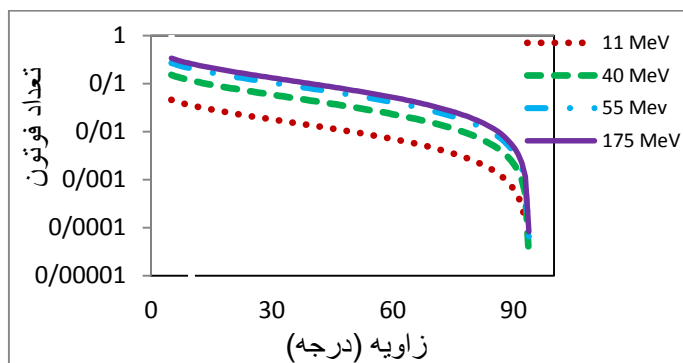
### ب) بررسی توزیع زاویه ای تابش ترمزی

بر طبق رابطه زیر برای زاویه انتشار تابش ترمزی، برای الکترون های با انرژی های کمتر، توزیع زاویه ای فوتون ترمزی در جهت عمودی پرتو فرودی، ماکزیمم است. هرچقدر که انرژی الکترون افزایش یابد، ماکزیمم توزیع زاویه ای در راستای پرتو فرودی قرار می گیرد:

$$\theta_{\text{photon}} \approx \frac{m_e c^2}{E_e} \quad (2)$$



که  $m_e$  جرم الکترون،  $E_e$  انرژی الکترون، و  $C$  سرعت نور است، و  $\theta$  زاویه گسیل فوتون نسبت به راستای فرود باریکه الکترونی می باشد. نتایج شبیه سازی تعداد فوتون های حاصله بر حسب زاویه  $\theta$ ، برای چهار طیف الکترونی، با استفاده از کد MCNPX در شکل ۵ ارائه شده اند.

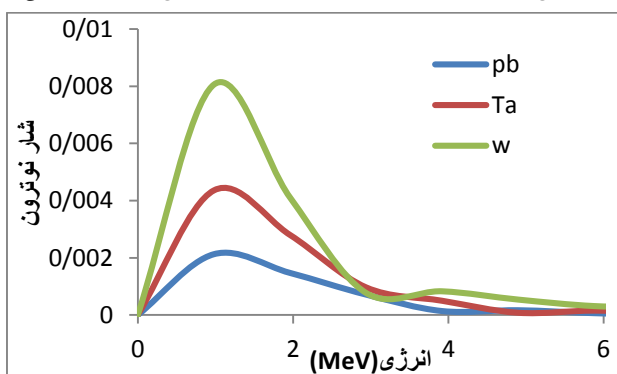


شکل ۵: توزیع زاویه ای تابش ترمزی برای طیف های مختلف الکترونی و هدف تنگستن

همانطور که ملاحظه می شود، بیشترین تولید فوتون تابش ترمزی در حوالی راستای فرود باریکه الکترون یعنی  $\theta=0$  است و هر چقدر انرژی الکترون فرودی بیشتر می شود، پراکندگی کمتری مشاهده می شود و فوتون ها متمرکزتر شده و در راستای الکترون فرودی قرار می گیرند.

### ج) تولید فوتونوترون

در این مرحله به بررسی تولید نوترون از فوتونهای ترمزی می پردازیم. بر طبق شکل ۱، ابتدا در تولید تابش ترمزی از هدف اولیه با جنس بهینه تنگستن، و طیف الکترونی  $40\text{ MeV}$  استفاده می کنیم. سپس برای تولید نوترون، فوتونهای حاصله به هدف ثانویه از جنس های مختلف تابانیده می شوند. به عنوان مثال، نتایج شبیه سازی تولید نوترون به صورت نمودار شار نوترون بر حسب انرژی آن، با استفاده از هدف های دوم از جنس سرب و تانتالیم با ضخامت ۲ میلی متر و تنگستن با ضخامت ۰,۵ میلی متر در شکل ۴ نشان داده شده اند.



شکل ۴ نتایج شبیه سازی تولید نوترون برای هدف دوم از جنس سرب و تانتالیم در ضخامت ۲ میلی متر و تنگستن در ۰,۵ میلی متر و انرژی الکترون فرودی  $40\text{ MeV}$





همانطور که مشاهده می شود، ماکزیمم انرژی نوترون در  $1\text{MeV}$  است، و بهترین بازدهی تولید نوترون با بکارگیری تنگستن با ضخامت کمتر، به دست می آید. مابین دو جنس دیگر با ضخامت یکسان، تانتالیم از سرب بهتر عمل می کند. به این ترتیب، استفاده از ماده با چگالی بزرگتر، منجر به تولید نوترون بیشتری شده است.

### بحث و نتیجه گیری:

با توجه به نقش اشعه ایکس در درمان تومورها و همچنین نیاز به چشمه های فوتونوترونی جهت کاربردهای پزشکی و صنعتی، تولید یک چشمه اشعه ایکس کم حجم و کم هزینه دارای اهمیت است. در این مقاله، نتایج شبیه سازی های انجام شده بوسیله کد MCNPX برای تولید فوتونهای تابش ترمزی از برهمکنش الکترونهای لیزری با سه جنس مختلف هدف ارائه شده اند. علاوه بر تاثیر نحوه توزیع انرژی الکترونهای شبه تکفام، اثر ابعاد هدف و جنس هدف بر روی نتایج حاصله نیز بررسی شده اند. همچنین، توزیع زاویه ای پراکندگی فوتونهای تولید شده در تابش ترمزی مورد مطالعه قرار گرفته اند. نتایج شبیه سازیها نشان می دهند که طیف الکترونی با انرژی پیک بیشتر، فوتون های بیشتری تولید می کند و بیشترین تولید فوتون تابش ترمزی در راستای فرود باریکه الکترون است. همچنین شبیه سازی تولید نوترون از برخورد فوتونهای ترمزی با هدف ثانویه با کد مذکور انجام شده اند. نشان داده شده است که با استفاده از هدف های با چگالی بالاتر، بازدهی تولید فوتون و نوترون افزایش می یابد.

### مراجع:

- [۱] C. Courtois, R. Edwards, A. Compant La Fontaine, C. Aedy, S. Bazzoli et al., Phys. Plasmas ۲۰, ۰۸۳۱۱۴ (۲۰۱۳); doi: ۱۰.۱۰۶۳/۱.۴۸۱۸۵۰۵.
- [۲] T. Tajima & J. M. Dawson, Laser electron accelerator, Phys. Rev. Lett. ۴۳, ۲۶۷-۲۷۰ (۱۹۷۹).
- [۳] A. Modena et al., "Electron acceleration from the breaking of relativistic plasma waves", Nature ۳۳۷, ۶۰۶-۶۰۸ (۱۹۹۵).
- [۴] J. Faure, et al., "A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams", Nature ۴۳۱, ۵۴۱ (۲۰۰۴).
- [۵] A. Pukhov, and J. Meyer-ter-Vehn, "Laser wake field acceleration: the highly non linear broken-wave regime", Appl. Phys. B ۷۴, ۳۵۵ (۲۰۰۲).
- [۶] F. S. Tsung, et al., "Near GeV energy laser wakefield acceleration of self-injected electrons in a cm scale plasma channel", Phys. Rev. Lett. ۹۳, ۱۸, p.۱۳۸۳ (۲۰۰۴).
- [۷] Xu Hai-Bo, Peng Xian-Ke, and Chen Chao-Bin, Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing ۱۰۰۰۹۴, China.
- [۸] G. Kim et al, "Measurement of Photoneutron Spectrum at Pohang Neutron Facility", Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A ۴۸۵, ۴۵۸ (۲۰۰۲).
- [۹] Martin J. Berger and Stephen M. Seltzertiona/ Bureau of Standards, Washington, D. C. ۲۰۲۸۴ (۱۹۷۰).