



## بررسی پارامترهای چشمکه الکترونی لیزری و هدف در تولید پرتو ایکس

لیدا نیک زاد<sup>۱</sup>، علیرضا احصامی سرابی<sup>۲</sup>، فرنگیس گورنگی<sup>۳</sup> و رسول صدیقی بنابی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

<sup>۲</sup> دانشکده مرکز تحقیقات فیزیک پلاسمای، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

<sup>۳</sup> گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران

<sup>۴</sup> گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چکیده - الکترونهاش شبکه‌کانزی حاصل از شتابدهنده‌های لیزر-پلاسمایی با هدفهای تیغه‌ای شکل جامد برخورد کرده و اشعه ایکس تولید شده با استفاده از کد *MCNP4C* شبیه سازی می‌شود. اثر پارامترهای توزیع الکترونی نظیر پهنای پالس ( $\Delta E$ )، انرژی پیک ( $E_p$ )، و انرژی کل الکترونها ( $E_t$ )، اندازه باریکه الکترون، بعلاوه جنس و ضخامت هدف، بر بازدهی اشعه ایکس مورد مطالعه قرار می‌گیرند. نتیجه گرفته می‌شود که در هدفهای ضخیم‌تر، استفاده از چشمکه الکترونی با قطر کوچکتر،  $\Delta E$  کمتر و  $E_p$  بیشتر، و بکارگیری هدف با عدد اتمی و چگالی بزرگ‌تر، بازدهی پرتو ایکس افزایش می‌یابد.

کلید واژه- الکترونهاش شبکه‌کانزی، برهمکنش لیزر-پلاسمای، شبیه سازی اشعه ایکس.

## The parameters of laser-produced-electron source and target in x-ray generation

Nikzad, Lida<sup>1</sup>; Ehtesami-Sarabi, Alireza<sup>2</sup>; Goorangi, Farangis<sup>3</sup>; Sadighi-Bonabi, Rasoul<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laser & Optics Research School, NSTRI, Tehran

<sup>2</sup> Department of Plasma Physics Research Center, Science & Research Branch Islamic Azad University, Tehran

<sup>3</sup> Physics Department, Islamic Azad University, Central Branch, Tehran

<sup>4</sup> Physics department, Sharif University of Technology, Tehran

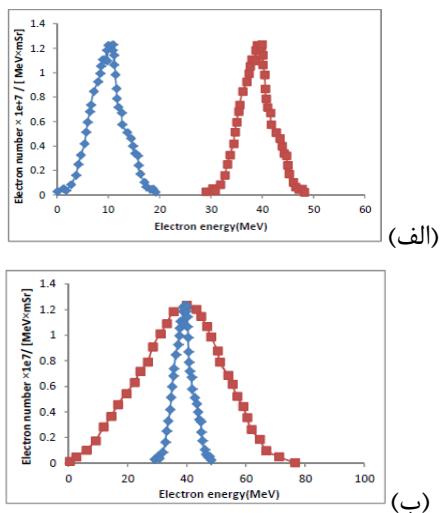
**Abstract-** The quasi-monoenergetic electrons produced by laser-plasma accelerators collide with slab solid targets and the generated x-ray is simulated by MCNP4C code. In this work, the effects of electron profile parameters such as pulse-width ( $\Delta E$ ), energy of the peak ( $E_p$ ), and total energy of electrons ( $E_t$ ), electron beam dimension, plus material and thickness of target are studied on x-ray efficiency. It is resulted that in thicker targets, by using an electron source with smaller diameter, larger  $E_p$  and smaller  $\Delta E$ , also a target with larger atomic number and density, x-ray efficiency is increased.

**Keywords:** Laser-plasma interaction, Quasi-mono-energetic electrons, X-ray simulation.

ابزار محاسباتی برای این کار، کد شبیه سازی MCNP4C [۳] است، که براساس روش مونت کارلو، کار می کند. در هر مورد، مشخصات چشمی و هدف (اندازه و توزیع انرژی الکترونی، و جنس و شکل و ابعاد هدف) به عنوان ورودی به کد داده می شوند و خروجی موردنظر مثلا شار سطحی اشعه ایکس،  $F_X$ ، (تعداد فوتون بر واحد سطح) بدست می آید. در این کار مقایسه طیفهای حاصله، فقط در انرژی مربوط به پیک مشخصه اصلی  $K_a$  در بازه انرژی بین ۱۰ تا ۱۰۰ کیلوالکترون ولت صورت می گیرد.

### ۳- نتایج شبیه سازی و بحث

در انجام شبیه سازیها، یک طیف الکترونی شبه تک انرژی تجربی با قطر ۹ میکرون با پهنهای پالس  $\Delta E = 6 \text{ MeV}$  و انرژی پیک  $E_p = 40 \text{ MeV}$  [۴]، و دو طیف شبه تک انرژی فرضی با پهنهای پالس بیشتر ( $\Delta E = 24 \text{ MeV}$ )، و انرژی پیک کمتر ( $E_p = 10 \text{ MeV}$ ) نسبت به طیف تجربی مذکور استفاده شده است (شکل ۲). در هر دو مورد، انرژی کل الکترونها،  $E$  (سطح زیر نمودارها) با هم متفاوت هستند.



شکل ۲: طیفهای الکترونی شبه تک انرژی تجربی و فرضی؛ (الف) با پهنهای پالس یکسان، ولی انرژی پیک متفاوت؛ (ب) با انرژی پیک یکسان، ولی پهنهای پالس متفاوت.

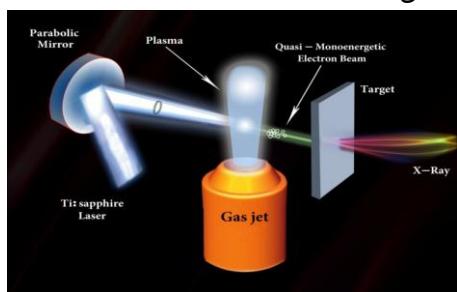
ابتدا، برای بررسی تاثیر انرژی پیک ( $E_p$ )، برخورد طیفهای الکترونی شکل ۲الف به هدف تیغه ای سربی جامد شبیه سازی می شوند. نتایج شبیه سازی با این دو طیف، بصورت نمودار شار اشعه ایکس تولید شده بر حسب انرژی، به عنوان نمونه برای هدف با ضخامت ۲۰۰۰ میکرون، در شکل ۳الف نشان داده شده است.

### ۱- مقدمه

آزمایشگاههای زیادی در جهان پیشگامان تولید لیزرهای پرتوان تا چندین تراوات و حتی پتاوات با کاربردهای جدید در زمینه های مختلف بوده اند. استفاده از تکنیک Chirped-Pulse-Amplification (CPA) [۱] در دهه ۱۹۹۰، باعث تحولات وسیعی در تکنولوژی لیزرهای توان بالا گردید. پالسهای فرمتوانیهای لیزرهای پرشدت می توانند پس از برخورد با ماده و ایجاد پلاسمما، به تولید و شتاب ذراتی همچون الکترونها، پروتونها و یونهای سنگین، پرتوهای ایکس و گاما و ... منجر شوند. از برخورد لیزر با هدف گازی، باریکه های الکترونی با انرژی های چندین MeV و حتی GeV تولید شده اند [۲]. از بمباران یک هدف جامد با الکترونها خروجی از شتابدهنده های لیزر پلاسمایی، تابش ترمیزی و مشخصه اشعه ایکس تولید می شوند. اشعه های ایکس دارای کاربردهای زیادی در علوم پزشکی، مواد، فیزیک، شیمی، و غیره می باشند.

### ۲- روش انجام کار

در اثر برهمکنش پالسهای سیستم لیزری با انرژی ۵۰۰ میلی ژول و پهنهای پالس ۳۰ فرمتوانیه با محیط گازی هلیوم، پلاسمما تولید شده و به دنبال آن الکترونها درون پلاسما شتاب داده می شوند. سپس این الکترونها پرانرژی به طور عمودی با یک هدف جامد برخورد کرده و فوتونهای ایکس مشخصه و ترمیزی تولید می شوند. لازم به ذکر است که در این تحقیق، برخلاف کارهای انجام شده که منجر به تولید اشعه ایکس با برهمکنش مستقیم لیزر-هدف می شود، بر روی اشعه ایکس تولیدی با برهمکنش الکtron-هدف کار شده است. در شکل ۱ چیدمان مورد نیاز برای شبیه سازی تولید پرتو ایکس نشان داده شده است.



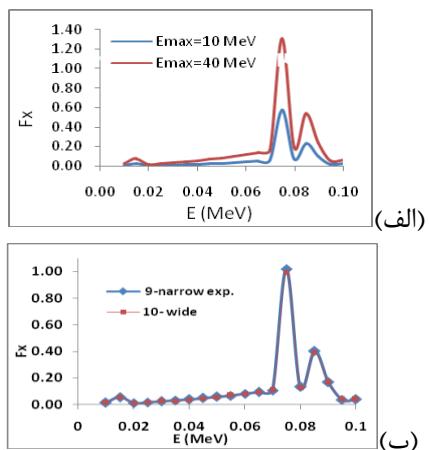
شکل ۱: شماتیک از تولید اشعه ایکس، شامل برهمکنش لیزر با هدف گازی، و برخورد الکترونها پرانرژی تولید شده با هدف جامد.

نتایج شبیه‌سازی حاصل از طیفهای شکل ۴ نشان می‌دهند هنگامی که پهنانی‌پالس و انرژی‌پیک طیفهای الکترونی برابر هستند، میزان شار اشعه ایکس حاصل از برخورد آنها با هدف، در همه ضخامتها تقریباً یکسان می‌باشد، حتی اگر انرژی کل آنها متفاوت باشد. در جدول ۱ تعدادی از خروجی‌های به دست آمده نشان داده شده‌اند.  $F_{Sh}$  و  $F_L$  به ترتیب شار ماکزیمم اشعه ایکس حاصل از طیفهای بلند و کوتاه در شکل ۴، و  $N/A$  نشان‌گر تعداد الکترونها بر واحد سطح می‌باشند.

جدول ۱- شار اشعه ایکس حاصل از دو طیف شکل ۴ برای ضخامت‌های مختلف سرب؛			
$d$ ( $\mu\text{m}$ )	1000	1500	2000
$F_L \approx F_{Sh}$ ( $N/A$ )	1.07	1.24	1.32

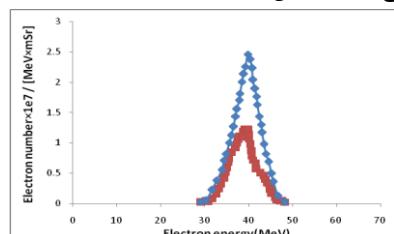
پیش از این نشان داده شده است که با افزایش ضخامت هدف، شار اشعه ایکس حاصل از الکترونها با طیف شبیه‌تکانرژی، افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به الکترونها با طیف شبیه‌ماکسولی نشان می‌دهد، حتی هنگامی که انرژی کل ( $E$ ) دو طیف برابر می‌باشد [۵]. می‌توان چنین نتیجه گرفت که در توزیع‌های الکترونی، دو عامل پهنانی‌پالس و انرژی‌پیک، نقش موثرتری نسبت به انرژی کل در تولید فوتونهای ایکس ایفا می‌کنند.

علاوه بر فاکتورهای چشم، خصوصیات هدف نیز بر روی مقدار شار فوتونهای ایکس موثرند. برای بررسی نقش عدد اتمی و چگالی هدف، طیف الکترونی تجربی به دو هدف تیغه‌ای از جنس نقره و سرب به ترتیب با اعداد اتمی ۴۷ و ۸۲ و چگالیهای  $10.49\text{ gcm}^{-3}$  و  $11.34\text{ gcm}^{-3}$  تابانیده می‌شود. نمودار شار فوتونهای ایکس حاصل بر حسب انرژی برای ضخامت برابر  $2000$  میکرون در شکل ۵ نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد اتمی و چگالی ماده، شار اشعه ایکس تولید شده در انرژی پیک مشخصه  $K_a$  افزایش یافته و به سمت انرژی‌های بیشتر حرکت می‌کند. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازیها با نتایج تجربی مطابقت دارند [۶].



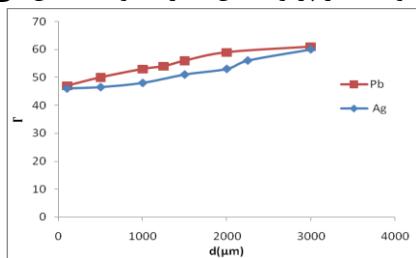
شکل ۳: شار اشعه ایکس حاصله با استفاده از یک تیغه سربی و دو طیف الکترونی، (الف) دارای  $E_p$  متفاوت و هدف  $2000$  میکرونی، (ب) دارای  $2$  متفاوت و هدف  $3500$  میکرونی.

در بررسی تاثیر پهنانی‌پالس ( $\Delta E$ )، از دو طیف الکترونی شکل ۲ ب استفاده شده است. نتایج حاصله برای هدف با ضخامت نمونه  $3500$  میکرون، در شکل ۳ ب نشان داده شده است. از بررسی نتایج بدست آمده از طیفهای مذکور برای ضخامت‌های گوناگون، نتیجه گرفته می‌شود که در هدفهای با ضخامت بیشتر، طیف الکترونی با انرژی‌پیک بزرگتر در تولید فوتونهای اشعه ایکس بهتر عمل می‌کند، زیرا الکترونها انرژی لازم برای عبور از ضخامت ماده و تولید فوتون را دارند. همچنین در هدفهای با ضخامت کمتر، طیف الکترونی دارای پهنانی‌پالس بیشتر، شار اشعه ایکس بیشتری تولید می‌کند؛ علت آن است که طیف پهنانتر دارای تعداد بیشتری الکترون از هر دو نوع کم انرژی و پرانرژی می‌باشد، و در ضخامت‌های کمتر، کل این الکترونها قادر به عبور از ماده و تولید فوتون می‌باشند. در مرحله بعد، دو طیف الکترونی با پهنانی‌پالس و انرژی‌پیک، تعداد الکترونها طیف فرضی دو برابر طیف تجربی می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۴: طیفهای الکترونی شبه‌تکانرژی تجربی (کوتاه به رنگ قرمز) و فرضی (بلند و آبی رنگ) با انرژی‌پیک و پهنانی‌پالس یکسان و انرژی کل نابرابر.

الکترونی، و افزایش عدد اتمی و چگالی ماده، درصد افزایش تولید شار پرتو ایکس سیر صعودی نشان می‌دهد.



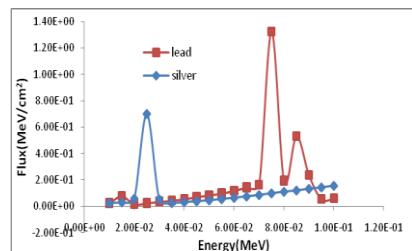
شکل ۷: درصد افزایش  $\Gamma$  بر حسب ضخامت برای دو هدف نقره و سرب.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در بمباران هدفهای جامد توسط الکترونها شبه‌تکانتری ناشی از برهمنکنش لیزر-پلاسم، اشعه ایکس تولید شده توسط کد MCNP4C شبیه‌سازی شده است. در این مقاله، نقش مشخصه‌های توزیع چشممه الکترونی و هدف، در افزایش بازدهی فوتونهای حاصله ارزیابی شده است. نشان داده شده که در هدفهای با ضخامت کمتر، استفاده از طیف الکترونی با پهنه‌ای پالس بیشتر و انرژی پیک کمتر، و در ضخامت‌های بیشتر استفاده از توزیع با پهنه‌ای پالس کمتر و انرژی پیک بیشتر نقش بهسزایی در افزایش تولید اشعه ایکس دارد. بعلاوه، با بکارگیری باریکه الکترونی با ابعاد کوچکتر، ضخامت بهینه هدف و تولید اشعه ایکس افزایش می‌یابند. همچنین انتخاب هدفی با عدد اتمی و چگالی بزرگتر، باعث افزایش بازدهی اشعه ایکس می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که به منظور افزایش بازدهی تولید پرتو ایکس، انتخاب فاکتورهای مناسب برای چشممه الکترونی و هدف مورد استفاده، اجتناب ناپذیر است.

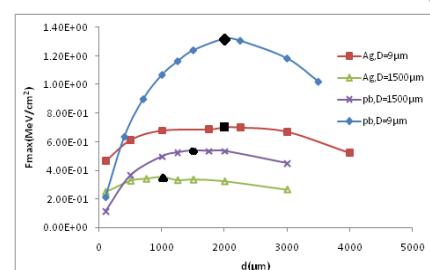
#### مراجع

- [1] D. Strickland and G. Mourou, “Compression of amplified chirped optical pulses”, Opt. Commun. 56, 219 (1985)
- [2] W. P. Leemans et al., GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator, Nature Physics 2, 696-699 (2006).
- [3] MCNP<sup>TM</sup>-A General Monte Carlo N-Particle transport Code, edited by J. F. Briesmeister (Version 4C, Los Alamos National Laboratory, LA-13709-M, 2000).
- [4] R. Sadighi-Bonabi, H. A. Navid, and P. Zobdeh, Observation of quasi mono-energetic electron bunches in the new ellipsoid cavity model, Laser Part. Beams 27, 223 (2009).
- [5] L. Nikzad et al., Simulation of enhanced characteristic x rays from a 40-MeV electron beam laser accelerated in plasma, Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 021301 (2012).
- [6] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement (John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000), 3rd ed.



شکل ۵: مقایسه شار اشعه ایکس تولید شده بر حسب انرژی برای هدفهای تیغه‌ای سرب و نقره با ضخامت ۲۰۰۰ میکروم.

به منظور بررسی نقش ابعاد چشممه الکترونی بر روی بازدهی اشعه ایکس، قطر باریکه الکترونی از ۹ میکروم به ۱۵۰۰ میکروم، افزایش داده می‌شود. لازم به ذکر است که برای هر چشممه الکترونی و هر ماده، ضخامت بهینه‌ای برای هدف وجود دارد که شار اشعه ایکس به بیشترین مقدار خود می‌رسد. برای دو هدف سرب و نقره، و دو چشممه مذکور با ابعاد مختلف، ضخامت‌های بهینه و شارهای ماکزیمم با رنگ مشکی روی نمودارهای شکل ۶ مشخص شده‌اند.



شکل ۶: مقایسه ماکزیمم شار اشعه ایکس تولید شده بر حسب ضخامت برای هدفهای تیغه‌ای سرب و نقره، برای دو طیف الکترونی با قطر نابرابر.

مشاهده می‌شود که با استفاده از قطر باریکه کوچکتر ۹ میکروم نسبت به ۱۵۰۰ میکرومی، یعنی با افزایش تمرکز مکانی (یا همدوسي مکانی) الکترونها، شار ماکزیمم و ضخامت بهینه هدف افزایش می‌یابند. برای محاسبه درصد افزایش تولید شار پرتو ایکس حاصل از دو باریکه الکترونی با ابعاد مختلف، از رابطه  $\Gamma = [(F_1 - F_2) / F_1] \times 100$  استفاده می‌شود.  $F_1$  و  $F_2$  به ترتیب نشان دهنده ماکزیمم شار اشعه ایکس حاصل از باریکه الکترونی با قطرهای ۹ و ۱۵۰۰ میکروم می‌باشند. درصد افزایش  $\Gamma$  بر حسب ضخامت برای دو هدف نقره و سرب در شکل ۷ مقدار مثبتی را نشان می‌دهد. به طور مثال برای ضخامت ۲۰۰۰ میکروم افزایش ۵۹ درصدی برای سرب و ۵۳ درصدی برای نقره بدست می‌آید. در نتیجه با کاهش قطر باریکه