

## بررسی تاثیر هندسه هدف و اندازه چشمه در تولید پرتو ایکس با استفاده از

الکترون‌های شبه تک انرژی به روش شبیه سازی

فرنگیس گورنگی<sup>۱</sup>، صدرالدین محمود کلایه<sup>۲</sup>، لیدا نیک زاد<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، گروه فیزیک

<sup>۲</sup> دانشگاه صنعتی شریف، گروه فیزیک

<sup>۳</sup> پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده لیزر و اپتیک

چکیده - الکترون‌های پرا انرژی تولید شده توسط شتابدهنده‌های لیزر-پلاسمائی در برخورد با هدف، پرتوهای ایکس تولید می‌کنند. در این مقاله، تاثیر هندسه هدف و اندازه چشمه الکترونی بر روی تولید پرتو ایکس با استفاده از کد شبیه سازی MCNP4C بررسی می‌شوند. هدف‌های سربی با شکل‌های کره، نیمکره، نیمکره واژگون، استوانه، مخروط، مخروط ناقص و مخروط ناقص واژگون، با ابعاد بهینه، توسط الکترون‌های شبه تک‌انرژی با قطرهای ۹ و ۲۸۰ میکرومتر بمباران شده و فوتون‌های ایکس تولید شده ارزیابی می‌شوند.

کلید واژه: برهم کنش لیزر-پلاسماء، الکترون‌های شبه تک انرژی، شبیه سازی تولید اشعه ایکس

## Effect of target geometry and source size on x-ray generation by using quasi-monoenergetic electrons via simulation

Farangis Goorangi<sup>1</sup>, Sadreddin Mahmood Kalayeh<sup>2</sup>, Lida nikzad<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of physics, Islamic Azad university, Central Branch, Tehran

<sup>2</sup>Physics Department, Sharif university of Technology, Tehran

<sup>3</sup>Laser & optics Research School, NSTRI, Tehran

Abstract- Energetic electrons produced by laser-plasma accelerators can produce x-rays in collision with a target. In this paper, the effects of target geometry and electron source size are considered on x-ray generation by MCNP4C simulation code. The lead targets with shapes of sphere, hemisphere, invert hemisphere, cylinder, truncate cone, cone, invert cone, and invert truncate cone, in the optimum dimensions, are bombarded by quasi-monoenergetic electrons with diameters of 9 $\mu\text{m}$ , and 280 $\mu\text{m}$ , and the produced x-ray photons are evaluated.

Keywords: quasi-monoenergetic electrons, laser-plasma interaction, x-ray simulation

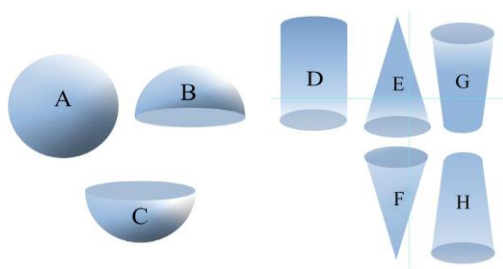
## ۱- مقدمه

توسعه فن آوری تولید پالس‌های بسیار کوتاه و پر شدت لیزری با استفاده از روش تقویت پالس‌های کشیده شده (CPA) منجر به بهره برداری وسیعی از سیستم‌های لیزر با توان چندین تراوات در مقیاس آزمایشگاهی شده است. به علت شدت تمرکز لیزر، با چندین نوسان لیزر، ماده کاملاً یونیزه می‌شود و پلاسما بوجود می‌آورد. سپس لیزر از طریق فرایندهایی نظیر جذب رزونانسی و یا گرمایش خلابی (Absorption Resonance) جذب شده و الکترون‌های پراثری تولید می‌شوند. در سال ۱۹۷۹ تاجیما و داوسون به این نتیجه رسیدند که پالس‌های لیزری شدت بالا با عبور از پلاسما، موج‌های الکترونی پلاسما تولید می‌کنند [۱]. در سال ۲۰۰۲ پوخوف توسط شبیه‌سازی‌های 3D PIC یک سازوکار شتاب دهی را که رژیم حباب خوانده می‌شود به نمایش گذاشت [۲]. در این رژیم، انرژی لیزر کانونی شده، در کره‌ای با شعاعی کوچکتر از طول موج پلاسما متمرکز می‌شوند. نیروی پاندروموتیو میدان لیزر، الکترون‌ها را در راستای شعاعی از پلاسما می‌راند و یک حفره خالی از الکترون با بار مثبت را پشت سر پالس لیزر ایجاد می‌کند. اطراف این حباب را ناحیه‌ای با چگالی زیاد الکترون احاطه کرده است. این الکترون‌ها رانده شده با حرکت روی مرز این حباب، در انتهای آن با هم برخورد می‌کنند و به درون حباب تزریق می‌شوند و این گونه پشت سر پالس لیزر شتاب می‌گیرند و یک دسته الکترون شبه-تک انرژی تولید می‌شود. در تئوری حباب پوخوف شکل حباب به صورت کروی در نظر گرفته شده است [۳]. پیش بینی‌های این مدل نسبت به داده‌های تجربی انحراف قابل توجهی داشت اما نشان داده شد که وقتی برای حباب تشکیل شده شکل بیضوی در نظر گرفته شود [۴-۵] نتایجی که مدل پیش بینی می‌کند، مطابقت بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارند. تابشهای خط از یونیزان لایه K ایجاد می‌شوند تحت نامهای  $k_\alpha$ ،  $k_\beta$ ،  $k_\gamma$  و غیره شناخته شده‌اند. که در این بین، تابش  $k_\alpha$  قویتر و با اهمیت تر می‌باشد [۶]. تابش  $k_\alpha$  که از این طریق تولید می‌شود دارای طول پالس از مرتبه طول پالس لیزر تابشی (فمتوثانیه‌ای) می‌باشد. این منبع جدید اشعه ایکس سخت پرشدت و فوق سریع میتواند برای مطالعه و بررسی دینامیک ماده در مقیاس فمتوثانیه بکار رود. علاوه

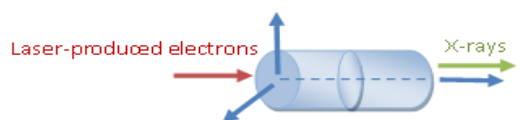
بر این، بدلیل این که نوع تابش اشعه ایکس دارای اندازه و پهنای پالس کوچکی میباشد، در تصویر برداری پزشکی کاربردهای فراوانی دارد [۷].

## ۲- روش کار

هر پالس لیزر با انرژی ۵۰۰ mJ و پهنای پالس ۳۰ فمتو-ثانیه در برخورد با محیط گازی هلیوم، پلاسما تولید می‌کند. در محیط پلاسما، الکترون‌ها شتاب داده می‌شوند و سپس با هدف جامد برخورد کرده و فوتون‌های ایکس تولید می‌کنند. در این تحقیق با استفاده از کد MCNP4C [۸] که بر اساس روش محاسباتی مونت کارلو کار می‌کند، به شبیه سازی تولید اشعه ایکس حاصل از بمباران هدف‌های جامد با هندسه‌های متفاوت توسط الکترون‌های شبه تک انرژی پرداخته می‌شود. در اینجا هدف‌هایی به شکل‌های کره، نیمکره، نیمکره واژگون، استوانه، مخروط، مخروط واژگون، مخروط ناقص واژگون، مخروط ناقص از جنس سرب با عدد اتمی ۸۲ و چگالی  $11.34 \text{ g/cm}^3$  در انرژی مشخصه  $k_\alpha$  که برای سرب ۷۵ keV است مورد بررسی قرار می‌گیرند (شکل ۱). الکترون‌های پراثری در راستای +z، با هدف جامد به صورت عمودی برخورد کرده، و جریان سطحی فوتون‌های ایکس خارج شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند (شکل ۲). در این کار، جنس هدف، فاصله هدف تا چشمه، و توزیع الکترون‌ها یکسان هستند.



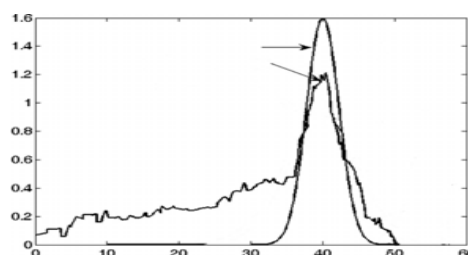
شکل ۱: نمایش شکل‌های مختلف هدف‌های مورد بررسی شامل؛ (A) کره، (B) نیمکره، (C) نیمکره واژگون، (D) استوانه، (E) مخروط، (F) مخروط واژگون، (G) مخروط ناقص واژگون، (H) مخروط ناقص.



شکل ۲: شمایی از نحوه قرار گرفتن هندسی یک هدف در مقابل پاریکه الکترونی و خروج اشعه ایکس برای انجام شبیه سازی.

## ۳- نتایج شبیه‌سازی‌ها

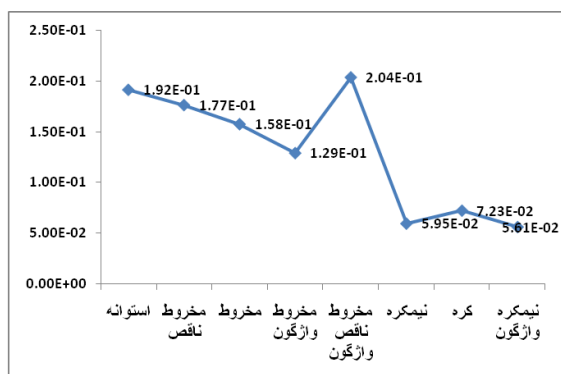
توزیع انرژی و ابعاد چشمه الکترونی، همچنین شکل و جنس و ابعاد هر هدف روی میزان تولید پرتو ایکس تاثیر می‌گذارند؛ برای هر توزیع الکترونی مشخص، پارامترهای بهینه‌ای برای هر شکل هدف وجود دارند که بیشترین شار اشعه ایکس (شامل ترمزی و مشخصه) را در انرژی پیک مشخصه  $k_{\alpha}$  تولید می‌کنند. در اینجا، برای تعریف چشمه، از توزیع شبه‌تک‌انرژی الکترونی مدل تئوری ارائه شده [9] برای نتایج تجربی بدست آمده در مرجع [10] استفاده شده است (شکل ۳). در ابتدا ابعاد چشمه حدود  $9\mu\text{m}$  (در حدود قطر حباب) در نظر گرفته شده است. توزیع فضایی برای الکترون‌های چشمه به صورت گوسی و توزیع انرژی چشمه دارای انرژی قله  $40\text{ MeV}$  می‌باشد. در مرحله بعد، برای بررسی اثر توزیع فضایی چشمه، از چشمه الکترونی با شعاع  $280\mu\text{m}$  استفاده می‌کنیم.



شکل ۳: توزیع الکترونی تجربی [۴] و تئوری [۳]. فلش بالایی مدل تئوری و فلش پایینی مدل تجربی را نشان می‌دهند

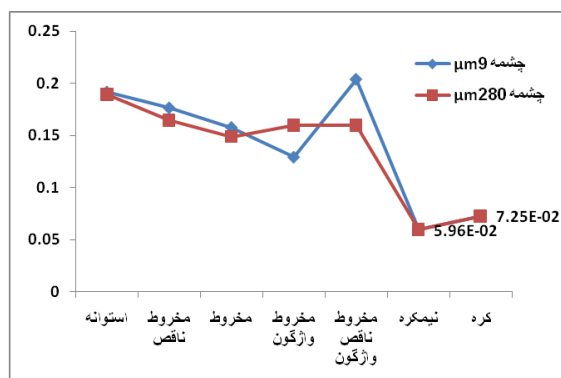
در ابتدا، با استفاده از چشمه  $9\mu\text{m}$  هدف‌های سربی به شکل‌های کره، نیمکره، نیمکره واژگون، که با شعاع مشخص می‌شوند، با شکل‌های استوانه، مخروط، مخروط واژگون، مخروط ناقص واژگون (که با ارتفاع و شعاع قاعده مشخص می‌شوند)، مقایسه شده‌اند. با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد، ابعاد بهینه هر هدف به دست می‌آید. این مقادیر برای کره  $400\mu\text{m}$ ، برای نیمکره  $700\mu\text{m}$  و برای نیمکره واژگون  $500\mu\text{m}$  هستند. پارامترهای بهینه مابقی شکل‌ها که دارای ارتفاع و شعاع قاعده هستند با استفاده از استوانه‌ای با پارامترهای بهینه شعاع قاعده  $350\mu\text{m}$  و ارتفاع  $5\text{mm}$  به دست می‌آیند که این اشکال در آن محاط می‌شوند. در نتیجه ارتفاع بهینه همه این اشکال  $5\text{mm}$  و بهینه شعاع قاعده بزرگ آنها  $350\mu\text{m}$  می‌باشند؛ و شعاع قاعده کوچک برای مخروط و مخروط ناقص

$175\mu\text{m}$  در نظر گرفته شده‌اند نتایج شبیه‌سازی‌ها که در شکل ۴ ارائه شده‌اند، نشان می‌دهند که هدف‌های دارای ارتفاع و شعاع قاعده، نتایج بهتری نسبت به هدف‌های با شکل کره و نیمکره نشان می‌دهند، و در میان هشت هدف نام برده، بهترین نتیجه مربوط به هدف مخروط ناقص واژگون می‌باشد.



شکل ۴: کل تابش پرتو ایکس با انرژی  $75\text{ keV}$  برای شکل‌های متفاوت هدف.

در این مرحله برای بررسی تاثیر توزیع فضایی چشمه، هدف‌های کره، نیمکره، استوانه، مخروط، مخروط واژگون، مخروط ناقص واژگون، مخروط ناقص را در چشمه  $280\mu\text{m}$  در قطرهای ذکر شده مقایسه می‌کنیم. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که برای چشمه  $280\mu\text{m}$ ، تمام هدف‌های با ارتفاع و شعاع قاعده به جز مخروط واژگون، شاهد کاهش تابش  $k_{\alpha}$  نسبت به چشمه  $9\mu\text{m}$  هستیم. اما برای هدف‌های دارای شعاع مانند کره و نیمکره، این کاهش وجود ندارد و شاهد درصد کمی افزایش تابش  $k_{\alpha}$  هستیم.



شکل ۵: مقایسه اشعه ایکس حاصل از دو چشمه  $9\mu\text{m}$  و  $280\mu\text{m}$  در هدف‌های مختلف.

زیرا برای چشمه  $9\mu\text{m}$ ، در برهمکنش با باریکه الکترونی، کل حجم هدف در تولید فوتون‌های ایکس مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. اما با افزایش شعاع چشمه الکترونی  $280\mu\text{m}$ ، امکان برخورد‌های بیشتری درون هدف وجود دارد در نتیجه شاهد افزایش تابش هستیم.

#### ۴- نتیجه‌گیری

دست آوردها نشان می‌دهند که هندسه هدف و ابعاد چشمه الکترونی، بر روی تولید اشعه ایکس تاثیر بسزایی دارد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که هدف‌های دارای ارتفاع و شعاع قاعده (با شکل‌های باریک و بلند) دارای نتیجه بهتری نسبت به هدف‌های کره‌ای شکل هستند و در مقایسه با هفت هدف دیگر، هدف مخروط ناقص واژگون بهترین بازدهی را داراست. در واقع، تطابق بهتر مابین شکل الکترون‌های فرودی و هدف‌های به‌کار رفته، منجر به افزایش بازدهی تولید اشعه ایکس می‌شود. برای هر چشمه الکترونی، با انتخاب پارامترهای مناسب هدف (نظیر شکل، جنس، و ابعاد)، تولید الکترون‌ها و فوتون‌های ثانویه بیشتر شده و میزان جذب و پراکندگی فوتون‌های تولید شده کاهش می‌یابند، که این عوامل منجر به بهبود بازدهی تولید پرتو ایکس می‌شوند.

#### ۵- مراجع

- [1] Tajima T. and Dawson J. M., *phys. Rev. Lett.* 43 (1979) 267.
- [2] A. Pukhov, and J. Meyer-ter-Vehn, *Appl. Phys. B* 74, 355–361 (2002)
- [3] A. Pukhov et al 2004 *Plasma Phys. Control. Fusion* 46B176
- [4] R. Sadighi-Bonabi, SH. Rahmatollahpur, *Physics of Plasmas* 17, 033105 (2010)
- [5] R. Sadighi-Bonabi, SH. Rahmatollahpur, *Phys. A* 81, 023408 (2010e).
- [6] Tadashi Nishikawa. et.al. "x-ray generation enhancement from a laser-produced plasma with a porous silicon target" *App. Phys. Lett.* 70 (13)
- [7] P.P. Rajeev, S. Banerjee, A.S. Sandhu, R.C. Issac, L.C. Tribedi and G. R. Kumar, "Role of surface roughness in hard-x-ray emission from copper plasmas" *Phys. Rev. A* 65, 052903 (2002).
- [8] Briesmeister J. F., editor; *Las Alamos National Laboratory, LA - 13709 - M* (2000).
- [9] Sadighi Bonabi R., Rahmatollahpur SH., "A complete accounting of the monoenergetic electron parameters in an ellipsoidal bubble model"; *physics of Plasmas* 17 (2010) 033105.
- [10] Sadighi Bonabi R., Navid H. , and Zobdeh P., "Observation of quasi mono-energetic electron bunches in the