



تأثیر اندازه قطر نانوذرات هدف در شتابدهی لیزری پروتون در رهیافت TNSA

محمدجعفر جعفری^۱، الناز یزدانی^۲، سمیه رضایی^{*۱}

۱. پژوهشکده‌ی پلازما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران- ایران

۲. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی: ۱۷۵-۱۴۱۱۵، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۷/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۱۱

چکیده

یکی از رایج‌ترین روش‌های شتابدهی پروتون، روش شتابدهی از غلاف پشت هدف (TNSA) می‌باشد. استفاده از یک لایه فوم در جلوی هدف اصلی نقش به‌سزایی در میزان جذب انرژی لیزر توسط الکترون‌ها و به تبع آن شتابدهی پروتون ایفا می‌کند. این لایه می‌تواند با چگالی یکنواخت و همگن و یا با چگالی موضعی در یک ساختار نانو باشد. در این پژوهش با فرض به‌کارگیری لایه فوم با ساختار نانو و با استفاده از شبیه‌سازی‌های دو بعدی ذره‌ای، به مطالعه اثر اندازه نانوذرات پیش‌لایه در انرژی نهایی پروتون پرداخته می‌شود. ذرات با شعاع‌های ۱۰، ۶۰ و ۱۲۰ نانومتر و نیز با اندازه‌های تصادفی در بازه ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر در هدف با لایه فومی در دو ضخامت ۱۰ و ۲۰ میکرومتر و با چگالی میانگین نزدیک بحرانی در شدت لیزری $a = 10$ (معادل $I \approx 10^{20} \text{ W/cm}^2$) مطالعه و شبیه‌سازی شده‌اند. مطابق با نتایج به‌دست آمده در هدف با ضخامت ۱۰ میکرومتر اختلاف بیشینه انرژی جمعیت الکترونی و در نتیجه پروتون‌ها ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. هر چند با افزایش ضخامت هدف، تغییر اندازه شعاع نانوذرات تأثیر قابل توجهی در انرژی نهایی طیف پروتون می‌گذارد. به طوری که با کوچک‌کردن اندازه شعاع نانوذرات از ۱۲۰ نانومتر به ۱۰ نانومتر افزایش حدود ۴۵٪ در بیشینه انرژی پروتون مشاهده می‌شود.

کلیدواژه‌ها: شتابدهی پروتون، TNSA، نانوساختار، اندازه نانوذرات، چگالی نزدیک بحرانی

Target Nano-particles size effect on the laser proton acceleration in the TNSA mechanism

M.J. Jafari¹, E. Yazdani², S. Rezaei^{*1}

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran
2. Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, P.O.Box: 14115-175, Tehran - Iran

Abstract

One of the most common laser proton acceleration mechanism is Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) method. The use of a foam layer in front of the main target plays an important role in the amount of laser energy absorption by the electrons and consequently the acceleration of the proton. The front layer can be either uniform and homogeneous or nano-structured. In this study, by assuming a nanostructured foam layer, and using two-dimensional particle simulations code, the effect of nanoparticle's radius on the proton cut-off energy is investigated. Particles with radii of 10, 60 and 120 nm and random sizes in the range of 10 to 120 nm have been studied and simulated in a front layer with thickness of 10 and 20 μm with near-critical average density at laser intensity $a = 10$ ($I \approx 10^{20} \text{ W/cm}^2$). According to the results, in the case of thin foam layer, the differences of electron and consequently proton spectra are negligible. However, by increasing the foam thickness, the influence of nanoparticle radius causes a further dissociation in the final proton energy spectra. So that, the proton energy increases almost 45% by reducing the nanoparticle size from 120 nm to 10 nm.

Keywords: TNSA, Laser proton acceleration, Nano-structured target, Nano particle size

*Email: Somayeh.rezaei@gmail.com

۱. مقدمه

از زمان اختراع فن‌آوری لیزر در سال ۱۹۶۰ برهم‌کنش پالس لیزری با ماده مورد توجه بسیاری قرار گرفته و مطالعات بسیاری در این راستا برای کاربردهای فنی و علمی انجام شده است. رژیم برهم‌کنشی به ویژگی‌های پالس لیزری (نظیر طول‌موج، طول پالس، انرژی، اندازه لکه و شدت آن) و نیز مشخصه‌های ماده مورد تابش (مثل نوع ماده، چگالی و ضخامت آن) بستگی دارد. توسعه فن‌آوری لیزرهایی با شدت و انرژی بالا در دهه‌های اخیر، منجر به رژیم برهم‌کنشی جدیدی از لیزر با ماده شده است که شتابدهی ذرات را به دنبال دارد. به‌طور کلی علاوه بر بررسی فیزیک پایه‌ای این پدیده، از نظر کاربردی کم حجم بودن شتاب‌دهنده‌های لیزری مطلوب و مقرون به‌صرفه است و جایگزین مناسبی برای شتاب‌دهنده‌های حجیم و گران معمولی است. اصول شتابدهی ذرات باردار در محیط پلاسما اولین بار توسط وکسلر^۱ در سال ۱۹۵۷ پیشنهاد شده است [۱]. در سال ۲۰۰۰ گسیل شدت بالای پروتون با انرژی چندین مگا الکترون‌ولت در آزمایش‌های برهم‌کنش لیزر با هدف جامد نازک مشاهده شد [۲]. بلافاصله پس از آن تحقیقات روی مطالعه فیزیک این پدیده و کاربردهای ممکن آن پیش رفت. باریکه‌های یونی تولید شده با توجه به استفاده آن در کاربردهای مختلف، نیاز به مشخصه‌های خاصی از طیف دارند. به همین دلیل تحقیقات در این حوزه هم‌چنان در حال انجام است [۳-۴].

سازوکار شتابدهی پروتون نسبت به الکترون به‌علت تغییر جرم زیاد آن‌ها متفاوت است. در رهیافت شتاب الکترون پالس لیزری با یک محیط گازی برهم‌کنش کرده که یک محیط پلاسمایی با چگالی کم تولید شده و لیزر می‌تواند مسافت زیادی را در آن انتشار یابد. در حالی که برای شتاب پروتون، تابش بر روی فویل جامد نازکی است که یک پلاسما با چگالی نزدیک جامد تولید می‌کند. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد یون‌هایی با انرژی چندین مگا الکترون‌ولت این است که ضمن ترابرد در ماده چگال، بیش‌تر انرژی خود را در انتهای مسیر برجای می‌گذارند. در حالی که برای باریکه ایکس و گاما و نیز

باریکه الکترونی این‌گونه نمی‌باشد. این نوع جایگذرای موضعی انرژی در کاربردهایی مثل هادرون‌تراپی مفید است. در حال حاضر امکان تولید باریکه الکترونی با انرژی ۴/۵ گیگا الکترون‌ولت در مسافت چندین سانتی‌متر [۵] و پروتون تا انرژی ۸۵ مگا الکترون‌ولت در مسافت چندین میکرومتر [۶] گزارش شده است. هرچند به‌منظور بهره‌بردن از این باریکه‌ها بایستی کیفیت باریکه بهبود داده شود. تاکنون تحقیقات زیادی با هدف بهبود ویژگی‌هایی مثل افزایش تعداد ذرات شتاب گرفته، پیکربندی تجربی ساده‌تر همراه با قابلیت کنترل و تکرارپذیری بالا، صورت گرفته است. روش رایج برای شتاب پروتون‌ها، سازوکار شتابدهی در اثر تشکیل غلاف از سطح عمود بر پشت هدف^۲ می‌باشد [۷]. در این رهیافت، ابتدا بسیاری از الکترون‌ها به‌دلیل اینرسی کم‌تر نسبت به یون‌ها در اثر تابش لیزر با مرتبه شدت حدود 10^{21} Wcm^{-2} از سمت جلوی هدف از طریق جذب غیربرخوردی انرژی کسب کرده و ابر این الکترون‌های داغ یا سریع از پشت هدف فرار کرده و ابر الکترونی با شعاع طول دی بای تشکیل می‌شود. جدایی بار ایجاد شده منجر به تولید میدان الکتریکی غلافی طولی می‌شود که به فاصله چند میکرون کاهش می‌یابد. این میدان می‌تواند باعث شتاب یون‌ها در جهت عمود بر هدف شود. در این سازوکار پروتون‌های ناشی از ناخالصی‌های پشت هدف تا چندین مگا الکترون‌ولت انرژی کسب می‌کنند. میدان غلافی می‌تواند با افزایش دما و یا چگالی الکترون‌ها افزایش یابد، بنابراین شتابدهی در اثر تشکیل غلاف از سطح عمود بر پشت هدف را می‌توان با تنظیم مناسب پارامترهای هدف بهبود بخشید. گزارشات و مقالات بسیاری از داده‌های تجربی از بررسی روش شتابدهی از غلاف پشتی هدف با ضخامت‌های مختلف و نیز پالس لیزری با شدت‌های متوسط (10^{19} Wcm^{-2}) و بالا (10^{21} Wcm^{-2}) در دسترس است که در آن‌ها به مطالعه پارامترهای لیزر و هدف پرداخته شده است [۸-۱۰]. مارگارون و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۲ شتاب پروتون‌ها را از طریق هدف‌های پلی‌استرین با سطوح شکل داده شده به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی آنالیز و بررسی کردند. این گروه سطح هدف را به‌صورت نانوکورهایی در چیدمان منظم و

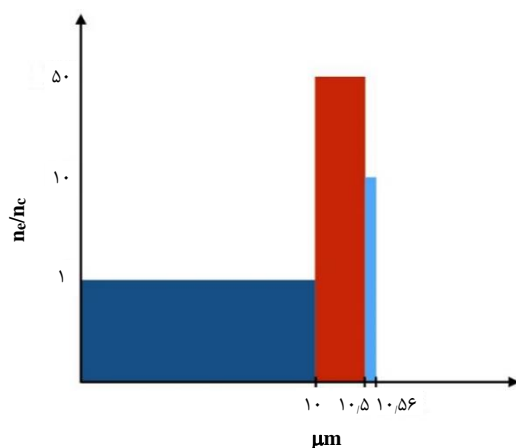
2. Target Normal Sheath Acceleration (TNSA)

1. Veksler

تغییر فرایند گرم شدن الکترون‌ها و نیز انرژی پروتون‌ها با تغییر اندازه شعاع نانوذرات و تأثیر ساختار لایه فوم در شتابدهی پروتون بررسی و تحلیل شده است. با استفاده از کد شبیه‌سازی دوبعد مکان و سه‌بعد سرعت ذره در جعبه، پارامترهای مربوط طیف انرژی الکترون‌ها و پروتون‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت انجام شبیه‌سازی از سیستم‌های کامپیوتری با سرعت پردازش بالا استفاده خواهد شد.

۲. مشخصه‌های شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی‌ها از کد ذره‌ای نسبیتی الکترومغناطیسی دوبعدی پیکانته استفاده شده است [۱۶]. هدف به‌کار رفته در این شبیه‌سازی‌ها شامل سه لایه با ضخامت‌های ۲۰ و ۱۰ میکرومتری (برای لایه کربنی) به‌عنوان پیش لایه در جلوی یک فویل فلزی و لایه آلومینیومی که به لایه نازک پروتونی (لایه هیدروژنی) از پشت جفت شده است می‌باشد (شکل ۱). لایه کربنی (لایه‌ای که لیزر به آن می‌تابد) در ساختار نانو؛ شامل نانوکره‌هایی با چگالی موضعی بالا می‌باشد که در مجموع با فضای خالی بین آن‌ها چگالی این لایه کربنی به‌طور میانگین 1 nc است که با فاکتور حجمی 0.33 این چگالی به‌طور موضعی حدود 30 nc می‌باشد. در این مقاله مختصات مرکز نانوکره‌ها از یک تابع تصادفی انتخاب می‌شوند و در تمامی شبیه‌سازی‌ها چگالی لایه فوم ثابت و به‌صورت میانگین، معادل چگالی بحرانی پلاسما در نظر گرفته شده است.

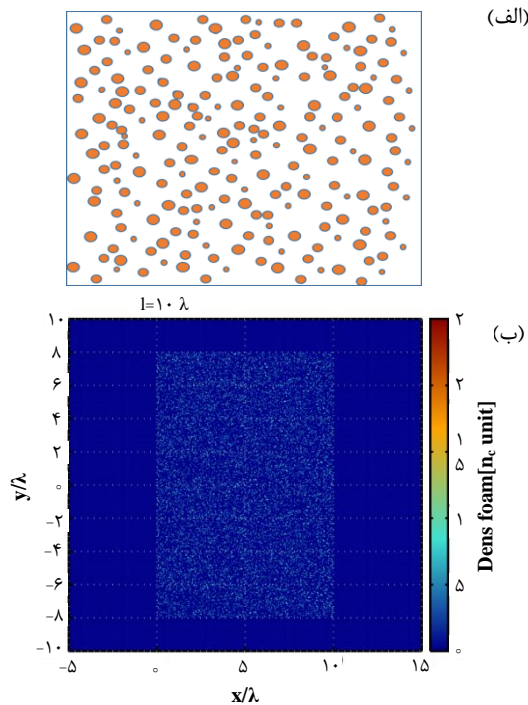


شکل ۱. چیدمان لایه‌های کربنی، آلومینیومی و هیدروژنی در کد شبیه‌سازی.

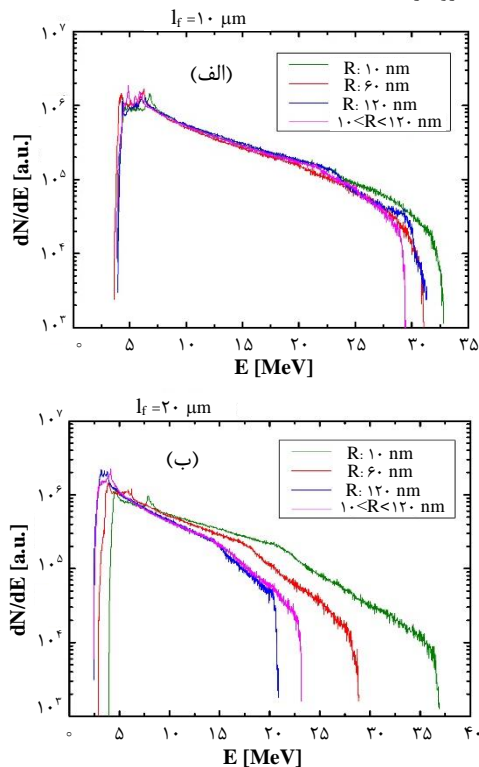
پیوسته از جنس خود پلی‌استرین و با همان چگالی در نظر گرفته و بیشینه انرژی پروتونی را برای نانوکره‌های با اندازه شعاع مختلف حدود ۱۰ مگاالکترون‌ولت به‌دست آورده‌اند [۹]. در حال حاضر، سازوکار شتابدهی از غلاف تشکیل شده از پشت هدف با تولید طیف وسیعی از انرژی پروتون و گسیل آن با درخشندگی کم برای کاربردهای مهم و خاص مثل رادیوگرافی پروتونی مناسب است [۱۱].

ایده اصلی برای افزایش بازدهی در تولید الکترون‌های نسبیتی در فرایند شتابدهی از پشت غلاف، استفاده از پلاسمایی با چگالی نزدیک بحرانی است که فوم نامیده می‌شود. در این مطالعات مشخص شده است که با استفاده از این پیکربندی هدف اگر مقادیر پارامترهای فوم (از قبیل چگالی و ضخامت) به‌طور مناسبی برای پالس لیزری خاص طراحی شوند، بیشینه انرژی پروتون می‌تواند به‌طور چشمگیری افزایش پیدا کند [۱۲]. هر چند چالش‌های فراوانی در زمینه ساخت هدف با ویژگی‌های مشخص وجود دارد، اما کدهای شبیه‌سازی ذره‌ای در دوبعد و سه‌بعد برای بررسی ابعاد مختلف هدف با پارامترهای متفاوت می‌توانند استفاده شود. مطالعه و شبیه‌سازی به‌کارگیری لایه‌های با چگالی همگن و ضخامت‌های مختلف و تأثیر آن‌ها در شتابدهی پروتون در مرجع [۱۳] بررسی شده است. از نقطه نظر تجربی پلاسمایی با چگالی نزدیک بحرانی را می‌توان با موادی با ساختار نانو تولید کرد و این نوع طراحی هدف اخیراً در حوزه برهم‌کنش پالس لیزری با پلاسما مورد توجه قرار گرفته است [۱۴، ۱۵]. یکی از عوامل مهم، شکل و اندازه شعاع نانوذرات لایه فوم می‌باشد. در حالی که مطالعاتی در زمینه مقایسه لایه با چگالی یکنواخت و لایه با ساختار نانو انجام شده است [۱۴]، اما در این پژوهش، تمرکز اصلی بر استفاده از فوم‌هایی با ساختار نانو در جلوی فویل آلومینیومی می‌باشد و هدف اصلی این پژوهش، بررسی اندازه قطر نانوذرات لایه فوم در میزان گرمایش جمعیت الکترونی و نیز انرژی نهایی پروتون‌ها می‌باشد. برای این منظور نانوذرات در سه شعاع ۱۰، ۶۰ و ۱۲۰ نانومتری در هدف با دو ضخامت ۱۰ و ۲۰ میکرومتری چیده شده‌اند. به علاوه از آن‌جا که لایه‌های فومی در واقعیت شامل هنگردی از نانوذرات با قطرهای مختلف می‌باشند، یک هدف با ساختار نانو شامل کره‌هایی با اندازه شعاع متفاوت در بازه ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر نیز مطالعه شده است.

۶۰ نانومتر می‌باشد، از این‌رو میزان شتاب‌دهی پروتون در این حالت نیز نزدیک به نتایج مربوط به حالت ۶۰ نانومتر می‌باشد.



شکل ۲. الف) طرح‌واره‌ای از چیدمان تصادفی نانوکره‌ها در لایه کربنی (ب) چیدمان لایه کربنی در لحظه صفر حاصل از کد شبیه‌سازی برای هدف با لایه ۱۰ میکرومتری.



شکل ۳. طیف انرژی باریکه پروتون در هدف با لایه فومی الف) ۱۰ میکرومتری و ب) ۲۰ میکرومتری. طیف مربوط به شعاع‌های مختلف رنگ‌های مختلف نشان داده شده است.

لایه آلومینیمی و هیدروژنی به ترتیب با چگالی $45n_c$ و $8n_c$ می‌باشند. جعبه شبیه‌سازی در ابعاد ۶۰ در ۲۰ و قدرت تفکیک مکانی 0.12 برابر طول موج لیزر است. لایه فومی با ضخامت ۱۰ و یا ۲۰ میکرومتر و ضخامت لایه آلومینیمی 0.5 میکرومتر و لایه هیدروژنی ۶۰ نانومتر می‌باشد. در تمامی شبیه‌سازی‌ها دو لایه فلزی و هیدروژنی ثابت و اثر تغییر ضخامت و اندازه شعاع نانوذرات پیش لایه فومی در انرژی نهایی پروتون بررسی شده است. در این کار ساختار نانو به صورت هنگردی از نانوکره‌ها با شعاع ثابت (۱۰ یا ۶۰ یا ۱۲۰ نانومتر) در یک چیدمان تصادفی به کار گرفته شده است.

شکل ۲، طرح‌واره‌ای از چیدمان لایه کربنی و نیز توزیع چگالی این لایه در لحظه صفر شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. به‌علاوه، برای به‌دست آوردن نتایج نزدیک به واقعیت، حالت نانوکره با شعاع‌های متغیر بین ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر نیز بررسی شده است. پالس لیزری با قطبش p و پروفایل زمانی \cos^2 طول موج $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ ، $\text{FWHM} = 15\lambda/c$ و کمر باریکه $5 \mu\text{m}$ از سمت چپ به صورت عمودی به هدف برخورد می‌کند. شدت لیزری در بازه $a_0 = 10$ معادل با 10^{12}W/cm^2 ثابت در نظر گرفته شده است.

۳. بحث و نتایج

در این قسمت نتایج به‌دست آمده حاصل از تغییرات پارامترهای مختلف و تأثیر آن‌ها بر روی بیشینه انرژی پروتون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای اندازه‌های مختلف از نانوذرات با در نظر گرفتن شدت لیزری $a_0 = 10$ ، چگالی میانگین لایه فوم $n = n_c$ و برای دو ضخامت $I_f = 10 \mu\text{m}$ و $I_f = 20 \mu\text{m}$ در شکل ۳ رسم شده است.

همان‌گونه که از شکل ۳ الف) مشاهده می‌شود، برای هدف با ضخامت فوم $I_f = 10 \mu\text{m}$ مقدار انرژی نهایی پروتون تقریباً برای همه حالت‌ها یکسان است و با تغییر اندازه شعاع نانوذرات تغییر قابل توجهی در طیف انرژی پروتون مشاهده نمی‌شود. هرچند ساختار شامل نانوذرات کوچک‌تر (منحنی سبز رنگ) بیش‌ترین مقدار انرژی را نشان می‌دهد.

با افزایش ضخامت لایه فوم در شکل ۳ ب) مشاهده می‌شود اندازه نانوذرات تأثیر قابل توجهی در شتاب پروتون می‌تواند بگذارد. به‌طوری‌که با افزایش این اندازه از انرژی نهایی پروتون کاسته می‌شود. از آن‌جا که در حالتی که اندازه نانوذرات به صورت تصادفی تغییر می‌کند، میانگین مابین حالت ۱۲۰ و

همان‌گونه که از شکل ۴ (الف) مشخص است طیف الکترونی برای حالت‌های مختلف از نانوذرات با شعاع‌های مختلف تقریباً روی هم می‌باشد. به عبارتی اثر تغییر اندازه نانو ذرات در هدفی با لایه فوم نسبتاً نازک $I_f = 10 \mu\text{m}$ ، بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. در حالی که الکترون‌ها در هدفی با لایه فوم نسبتاً ضخیم $I_f = 20 \mu\text{m}$ و با ذراتی با اندازه کوچکتر ۱۰ نانومتر به انرژی حدود ۹۰ مگا الکترون ولت شتاب گرفته که حدود دو برابر انرژی الکترون‌ها در حالت با شعاع ۱۲۰ نانومتر می‌باشد. به همین ترتیب میدان بار فضای تولیدشده توسط این الکترون‌ها بیشتر و در نتیجه شتابدهی پروتون‌ها در چنین ساختاری مؤثرتر می‌باشد. همان‌گونه که از شکل ۴ (ب) مشاهده می‌شود، در هدف با نانو ذرات کوچکتر (منحنی سبز رنگ)، جمعیت الکترون‌هایی که در قسمت انتهایی تابع توزیع می‌باشند و به‌طور مستقیم شتاب می‌گیرند نیز بیشتر از حالت‌های دیگر است. این الکترون‌ها که الکترون‌های داغ می‌باشند، نقش به‌سزایی در فرایند شتاب‌گیری پروتون‌ها دارند.

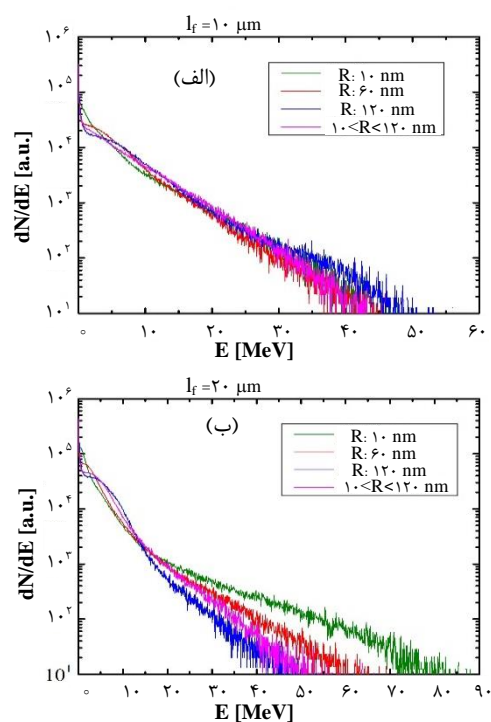
هم‌چنین برای واضح شدن نتایج، با در نظر گرفتن حالتی که شعاع نانوذرات به‌صورت متغیر در بازه ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر می‌باشد (از آن‌جا که این حالت به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد)، نمودارهای فضای فاز مربوط به الکترون‌های لایه فوم و نیز پروفیل فضایی میدان الکتریکی درست لحظه‌ای که به هدف آلومینیومی می‌رسد به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است.

با مقایسه نمودار فضای فاز در دو حالت هدف نازک و ضخیم، مشاهده می‌شود که دسته‌ای از الکترون‌ها در حالت هدف ضخیم‌تر ۲۰ میکرومتری شتاب بیشتری گرفته و با سرعت بیشتری حرکت می‌کنند. این مطابق با نتایج حاصل از شکل ۴ برای طیف انرژی الکترونی است. اما آن‌چه که موجب کاهش شتاب پروتونی در این حالت می‌شود را می‌توان از شکل ۶ که برای میدان الکتریکی رسم شده است نتیجه گرفت.

همان‌گونه که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، شکل میدان الکتریکی در هدف بزرگتر نسبت به هدف کوچکتر به هم ریختگی بیشتری دارد و به صورت فیلمان‌ها جدا شده است. این به علت پراکندگی بیشتر شدت لیزری در هدف ضخیم‌تر و در نتیجه موجب کاهش عملکرد مؤثر شتابدهی پروتون می‌شود.

پالس لیزری در هدف با ضخامت کم $I_f = 10 \mu\text{m}$ به نسبت هدف ضخیم‌تر $I_f = 20 \mu\text{m}$ مدت زمان کم‌تری حضور دارد. از این‌رو ساختارهای متفاوت نانو در این ضخامت مجال اثرگذاری نداشته و نتایج تقریباً هم‌پوشانی دارند. با بزرگ‌تر شدن ضخامت هدف، وقتی نانوذرات با شعاع بزرگتر به کار گرفته می‌شود، پراکندگی پالس لیزری بیشتر بوده و در نهایت از میزان شدت لیزری که به فویل آلومینیومی می‌رسد، کاسته می‌شود. به عبارتی، بازدهی جذب انرژی لیزر با پراکندگی آن کاهش می‌یابد. به علاوه، برای حالتی که نانوذرات با شعاع‌های تصادفی در بازه ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر به کار گرفته شده‌اند، با افزایش ضخامت این لایه میزان انرژی پروتون کاهش می‌یابد. و از آن‌جا که این حالت چیدمان هدف (با شعاع‌های متفاوت) به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد، در این حالت به کارگیری لایه فومی با ضخامت کم‌تر نتایج بهتری را به دنبال دارد.

از آن‌جا که پروتون‌ها انرژی خود را از میدان الکتریکی بار فضای ایجاد شده توسط الکترون‌های شتاب گرفته دریافت می‌کنند، لذا به‌منظور توضیح فیزیکی نمودارهای طیف انرژی الکترون‌ها نیز درست در لحظه‌ای که به فویل آلومینیومی می‌رسند، برای نانوذرات با شعاع‌های مختلف در شکل ۴ رسم شده است.

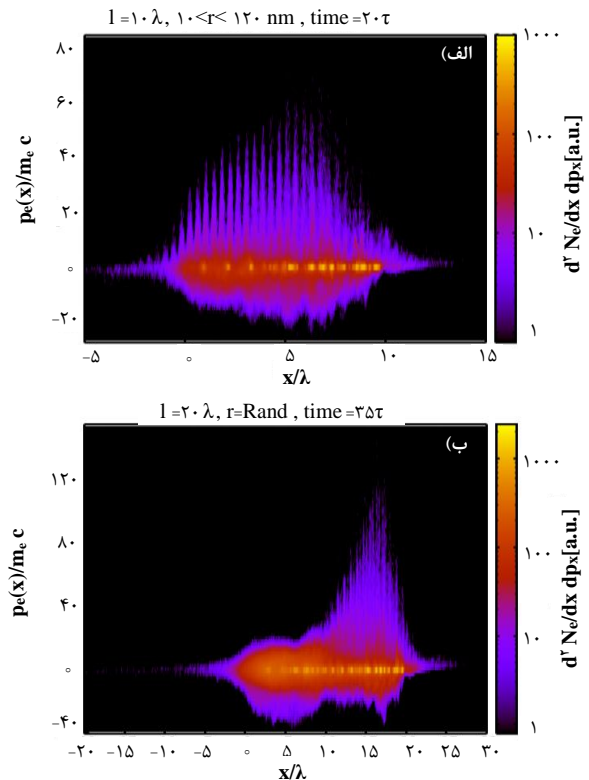


شکل ۴. طیف انرژی باریکه الکترونی در هدف با لایه فومی (الف) ۱۰ میکرومتری و (ب) ۲۰ میکرومتری. طیف مربوط به شعاع‌های مختلف با رنگ‌های مختلف نشان داده شده است.

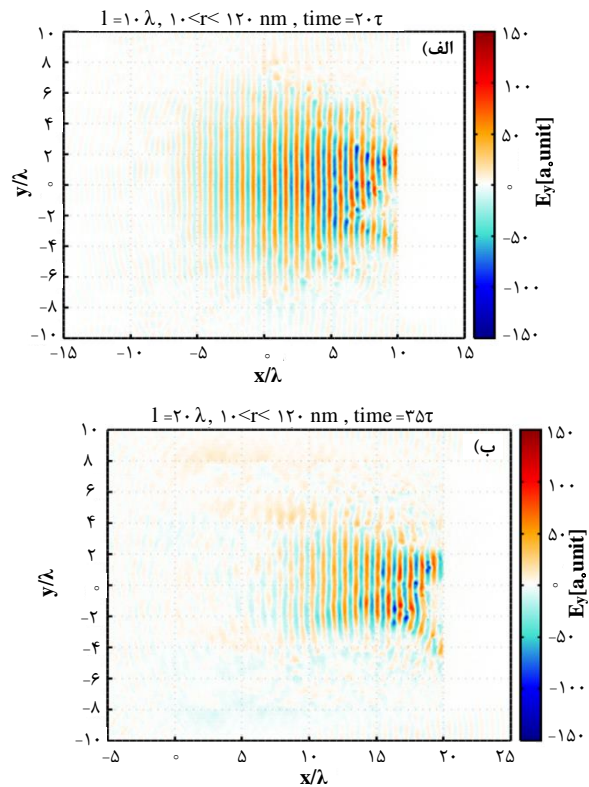
۴. نتیجه‌گیری

در این کار با به‌کارگیری ابزار شبیه‌سازی دوبعدی ذره‌ای نقش اندازه شعاع نانوذرات لایه فوم در فرایند شتاب‌دهی پروتون در روش رایج TNSA مطالعه و بررسی شده است. ایده استفاده از ساختار نانو به جای ساختار ایده‌آل یکنواخت برای لایه فوم به‌منظور نزدیک شدن به حالت واقعی مطرح شده است. در این پژوهش اثر شعاع‌های مختلف ۱۰، ۶۰ و ۱۲۰ نانومتر و نیز شعاع متغیر بین ۱۰ و ۱۲۰ نانومتر در دو ضخامت ۱۰ و ۲۰ میکرومتری از لایه فومی بر روی شتاب‌دهی پروتون و گرم شدن الکترون‌ها شبیه‌سازی شده است. مطابق با نتایج به‌دست آمده اندازه‌های متفاوت نانوذرات در هدف نازک‌تر تأثیری بر شتاب نهایی پروتون ندارند. در حالی‌که با بزرگ‌شدن هدف مدت زمان حضور پالس لیزری در هدف بیش‌تر بوده و نانوذرات با شعاع بزرگ‌تر موجب پراکندگی بیش‌تر پالس لیزری و در نتیجه کاهش بازدهی جذب انرژی الکترون‌ها می‌شوند. به‌علاوه محاسبات ما نشان می‌دهد که جذب انرژی و گرمایش الکترون‌ها در هدف ضخیم‌تر بهتر صورت می‌گیرد که در این میان هر چه ساختار به‌صورت یکنواخت‌تر باشد (به عبارتی ذرات با اندازه شعاع کوچک‌تر استفاده شود) انرژی الکترون‌ها بیش‌تر و شتاب‌دهی پروتون‌ها مؤثرتر اتفاق می‌افتد.

به‌طور کلی، نتایج به‌دست آمده در این کار نشان می‌دهد با به‌کارگیری لایه فومی با چگالی نزدیک بحرانی در فرایند شتاب‌دهی لیزری پروتون و کنترل پارامترهای آن می‌توان انرژی نهایی پروتون را افزایش داد.



شکل ۵. فضای فاز الکترون‌های لایه فوم برای هدف با ضخامت الف) ۱۰ میکرومتر و ب) ۲۰ میکرومتر. شعاع نانو ذرات به‌صورت متغیر در بازه ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر می‌باشد.



شکل ۶. میدان الکتریکی درست لحظه‌ای که به هدف آلومینیومی می‌رسد برای هدف با ضخامت الف) ۱۰ میکرومتر و ب) ۲۰ میکرومتر. شعاع نانو ذرات به‌صورت متغیر در بازه ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر می‌باشد.

مراجع

1. V. Veksler, *The principle of coherent acceleration of charged particles*, [The Soviet Journal of Atomic Energy](#), 2(5), 525 (1957)
2. E. Clark, et al. *Energetic heavy-ion and proton generation from ultraintense laser-plasma interactions with solids*, [Phys. Rev. Lett.](#) 85(8), 1654 (2000).
3. P. Poole, et al. *Laser-driven ion acceleration via target normal sheath acceleration in the relativistic transparency regime*, [New J. Phys.](#) 20(1), 013019 (2018).
4. H. Daido, M. Nishiuchi, A.S. Pirozhkov, *Review of laser-driven ion sources and their applications*, [Rep. Progr. Phys.](#) 75(5), 056401 (2012).
5. W. Leemans, et al., *Multi-GeV electron beams from capillary-discharge-guided subpetawatt laser pulses in the self-trapping regime*, [Phys. Rev. Lett.](#) 113(24), 245002 (2014).
6. F. Wagner, et al. *Maximum proton energy above 85 mev from the relativistic interaction of laser pulses with micrometer thick ch 2 targets*, [Phys. Rev. Lett.](#) 116(20), 205002 (2016).
7. S. Wilks, et al. *Energetic proton generation in ultra-intense laser–solid interactions*, [Physics of plasmas](#), 8(2), 542 (2001).
8. D. Neely, et al. *Enhanced proton beams from ultrathin targets driven by high contrast laser pulses*, [Appl. Phys. Lett.](#) 89(2), 021502 (2006).
9. D. Margarone, et al. *Laser-driven proton acceleration enhancement by nanostructured foils*, [Phys. Rev. Lett.](#) 109(23), 234801 (2012).
10. F. Dollar, et al. *High contrast ion acceleration at intensities exceeding 10^{21} W cm⁻²*, [Phys. Plasmas](#). 20(5), 056703 (2013).
11. T. Bartal, et al., *Focusing of short-pulse high-intensity laser-accelerated proton beams*, [Nat. Phys.](#) 8(2), 139 (2012).
12. A. Sgattoni, et al. *Laser ion acceleration using a solid target coupled with a low-density layer*, [Phys. Rev. E.](#) 85(3), 036405 (2012).
13. E. Yazdani, et al. *Enhanced laser ion acceleration with a multi-layer foam target assembly*, [Laser Part. Beams](#). 32(4), 509 (2014).
14. L. Fedeli, et al. *Ultra-intense laser interaction with nanostructured near-critical plasmas*, [Sci. Rep.](#) 8(1), 3834 (2018).
15. L. Fedeli, et al. *Parametric investigation of laser interaction with uniform and nanostructured near-critical plasmas*. [Eur. Phys. J. D.](#) 71(8), 202 (2017).
16. A. Sgattoni, et al. *Optimising piccante-an open source particle-in-cell code for advanced simulations on tier-0 systems*, [arXiv preprint arXiv:1503.02464](#) (2015).