



بررسی اثر نمایه چگالی هدف در شتابدهی لیزری پروتون

علی حسن بیگی^۱، فاطمه عزیزیان^{۱*}، محمدجعفر جعفری^۲، سمیه رضائی^۲

۱. گروه پلاسما پزشکی، دانشکده فیزیک، دانشگاه خوارزمی، صندوق پستی: تهران - ایران

۲. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران - ایران

*Email: azizianfatema@gmail.com

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۹/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱/۱۵

چکیده

سازوکار رایج شتابدهی لیزری پروتون، شتابدهی با میدان غلافی از پشت هدف (TNSA) است. در این کار هندسه هدف آلومینیومی به کار رفته در برهم‌کنش پالس لیزر شدت بالا با پلاسما مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. هدف، با نمایه پستی پله‌ای و نمایه با طول مقیاس‌های متفاوت تا $0.85 \mu\text{m}$ به عنوان ورودی در کد شبیه‌سازی دو بعدی ذره‌ای به کار رفته و نتایج توزیع انرژی پروتونی آن‌ها با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد با تغییرات هموار پشت هدف، انرژی پروتونی کاهش یافته و این امر به علت کاهش دامنه میدان الکتروستاتیکی در پشت هدف است. به علاوه، یک طول مقیاس آستانه وجود دارد که با افزایش بیش‌تر این کمیت، انرژی پروتونی تغییر نکرده و توزیع انرژی‌های باریکه پروتون تقریباً بر هم منطبق می‌شوند. انتشار میدان عرضی لیزر و توزیع انرژی الکترونی یکسان برای دو هدف با سطح پستی پله‌ای و نمایه با طول مقیاس $0.67 \mu\text{m}$ نیز مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: انرژی قطع پروتون، شتابدهی لیزری پروتون، طول مقیاس پشت هدف

Investigation of the effect of target density profile in proton laser acceleration

A. Hasan Beigi¹, F. Azizian^{*1}, M.J. Jafari², S. Rezaei²

1. Department of Plasma Medicine, Faculty of Physics, Kharazmi University, P.O.Box: , Tehran - Iran

2. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran - Iran

Research Article

Received 11.12.2022, Accepted 4.4.2023

Abstract

The common mechanism of proton laser acceleration is Target Normal Sheath acceleration. This study investigates the geometry of the aluminum target used in high-intensity laser pulse interaction with plasma. The target with an exponential profile on the front and back sides and with different scale lengths from 0 to $0.85 \mu\text{m}$ is used as an input to the two-dimensional particle simulation code. The results of their proton energy distribution have been compared. It was found that proton energy decreased with smooth changes behind the target. This is due to the reduction in the electrostatic field amplitude behind the target. In addition, there is a threshold scale length (here $67/0 \mu\text{m}$), after which the proton energy does not change with the increase of this quantity and the energy distribution of the proton beam almost overlaps. The transverse laser field emission and the same electron energy distribution were also observed for two targets with zero and $0.67 \mu\text{m}$ scale lengths.

Keywords: Proton cut off energy, Laser acceleration of proton, Rear target profile



۱. مقدمه

بعد از اولین مشاهدات شتابدهی لیزری پروتون تا انرژی‌های چندین مگاالکترون ولت تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است [۱]. با توجه به مشخصه‌های قابل قبول و مطلوب باریکه پروتون شتاب گرفته، از جمله درخشندگی توزیع انرژی و پهنای پالس کوتاه و نیز کاربردهای آن در گرمایش همگن [۲]، تولید نوترون [۳]، افروزش سریع [۴] و پروتون‌تراپی [۵]؛ بهبود هر چه بهتر این روش اهمیت بسزایی دارد. به طور ویژه انرژی لازم باریکه پروتونی برای استفاده در هادرون‌تراپی ۸۰-۲۶۰ MeV است که در حال حاضر کمینه انرژی آن با سازو کار شتابدهی لیزری پروتون قابل تأمین است [۶]. تاکنون مدل‌های مختلفی از توصیف فیزیک برهم‌کنش لیزر با هدف ارائه شده است [۷-۹]. در ساده‌ترین و رایج‌ترین مدل با عنوان شتابدهی از پشت هدف با میدان غلافی^۱ ابتدا طی برهم‌کنش پالس لیزر با هدف، الکترون‌های داغ تولید می‌شوند [۱۰]. این جمعیت الکترونی با دمایی از محدوده چندین مگاالکترون‌ولت در طول هدف پیش رفته و موجب یونش هدف می‌شوند [۱۱]. با جدا شدن جمعیت الکترونی از یون‌های هدف یک میدان جدایی بار تشکیل شده که پروتون‌ها در این میدان شتاب می‌گیرند. میزان انرژی باریکه پروتون به دامنه میدان الکتروستاتیکی تشکیل شده، توزیع چگالی و توزیع انرژی الکترون‌های داغ بستگی دارد [۱۲].

مدل‌های حاکم بر شتابدهی پروتون با روش TNSA به طور وسیعی در بین سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۰ به صورت عددی توسعه پیدا کرد. به طور مثال مدل انبساط هم‌دمای پلاسما [۷]، انبساط بی‌دررو پلاسما [۸]، مدل شبه ایستا [۱۳] و مدل هدف لایه لایه [۱۴] بررسی شده‌اند. که در جمع‌بندی همه این موارد، هدف؛ مشخص کردن وابستگی بیشینه انرژی پروتون و شکل طیف انرژی به پارامترهای اولیه است. با توسعه مدل‌ها نتایج آن به نتایج تجربی نزدیک‌تر شد اما به دلیل محدودیت روش‌های تحلیلی در سال‌های اخیر کدهای محاسباتی برای نزدیک شدن و پیش‌بینی نتایج تجربی مورد استفاده قرار گرفته است.

تاکنون مطالعات شبیه‌سازی [۱، ۱۵] و تجربی [۱۶] زیادی بر روی بررسی اثر پارامترهای لیزر از قبیل انرژی شدت پهنای پالس اندازه لکه و نیز پارامترهای هدف [۱۷، ۱۸] انجام شده است. همچنین کارهای پژوهشی مراجع [۱۹، ۲۰] در داخل کشور به بررسی دینامیک شتابدهی ذرات باردار پرداخته‌اند.

به علاوه یکی از پارامترهای مهم که لازم است بررسی شود، تباین^۲ لیزری است که به صورت بیشینه شدت لیزری به شدت پیش پالس تعریف می‌شود. طی برهم‌کنش این پیش‌پالس با هدف جامد، یک پیش‌پلازما در جلوی هدف تشکیل می‌شود به گونه‌ای که برهم‌کنش پالس اصلی لیزر با این پلاسما انجام می‌شود. حضور این پیش‌پلازما با چگالی نزدیک بحرانی موجب بهبود جذب انرژی لیزری و در نهایت بازدهی بالای سازوکار TNSA می‌شود. از طرفی اگر هدف به میزان کافی ضخیم نباشد و یا شدت پیش‌پالس به میزان کافی قوی باشد، موج ضربه تشکیل شده در نتیجه برهم‌کنش این پیش‌پالس با هدف، به پشت هدف رسیده و موجب به هم‌ریختگی پشت هدف می‌شود. شیب تغییرات چگالی در پشت هدف از همان سال‌های اول بررسی سازوکار TNSA و به ویژه گسترش پلاسما مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۲۱].

در سال ۲۰۰۴ کالوزا و همکارانش نشان دادند که برای هر پیش‌پالس با پارامترهای مشخص یک ضخامت بهینه برای هدف وجود دارد که در ضخامت‌های کمتر از آن شتاب پروتون‌ها افت می‌کند [۲۱]. این ضخامت بهینه با شیب $3/6 \mu\text{m}/\text{ns}$ با پهنای پیش‌پالس تغییر می‌کند.

هم‌چنین در سال‌های اخیر با اعمال شبیه‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی نشان دادند که ضخامت بهینه کالوزا (به طور مثال $1/8 \mu\text{m}$ برای پالس با پیش‌پالس $0/5 \text{ ns}$) مناسب نبوده و می‌توان هدف را نازک‌تر کرد و به انرژی‌های قطع بالاتری دست یافت [۱۵]. اخیراً نیز آستانه تغییرات ضخامت با در نظر گرفتن تغییرات چگالی در پشت هدف برای بهینه شتابدهی لیزری پروتون شبیه‌سازی و بررسی شده است [۲۲]. در این پژوهش با تمرکز بر روی مکانسیم TNSA اثر تغییرات طول مقیاس پشت هدف در میزان شتابدهی پروتونی برای یک هدف با ضخامت ثابت، با ابزار شبیه‌سازی دوبعدی ذره‌ای بررسی و مطالعه شده است. مهم‌ترین نتیجه این مطالعات افت انرژی قطع باریکه پروتون با افزایش طول مقیاس پشت هدف است. علت این امر به هم‌ریختگی غلاف دی‌بای تشکیل شده در پشت هدف است [۲۳]. مطابق با نتایج به دست آمده یک طول مقیاس آستانه وجود دارد که با افزایش بیش‌تر آن، انرژی پروتونی تغییر زیادی نمی‌کند و طیف انرژی روی هم می‌افتد.

در بخش ۲، فیزیک سازوکار شتابدهی به روش TNSA و در بخش ۳، ابزار شبیه‌سازی و شرایط اولیه استفاده شده در این پژوهش توضیح داده شده است. در بخش ۴ نتایج به دست آمده مورد بحث قرار گرفته و در بخش آخر خلاصه‌ای از نتایج آورده شده است.

1. Target Normal Sheath Acceleration

2. Contrast



۲. فیزیک شتاب‌دهی TNSA

با حل خود متشابه معادلات انبساط پلاسما در یک مرز نیمه‌بی‌نهایت پلاسما رابطه (۱):

$$E_{front} \approx \sqrt{2} E_0 / (\sqrt{2} e + \omega_{pi}^2 t^2)^{1/2} \quad (1)$$

برای میدان الکتریکی و رابطه (۲):

$$\varepsilon_{max} \approx \sqrt{2} \varepsilon_0 [\ln(\sqrt{2} \tau)]^2 \quad (2)$$

برای انرژی بیشینه باریکه پروتون به دست می‌آید که منجر به سرعت بی‌نهایت برای باریکه پروتون با گذشت زمان می‌شود [۷]. در این جا e عدد نپر، $E_0 = (n_e k_B T_e / \varepsilon_0)^{1/2}$ ، چگالی غیرمختل شده در لحظه اول (چگالی اولیه)، T_e دمای الکترون، ε_0 ثابت گذردهی خلأ، k_B ثابت بولتزمن، $\omega_{pi} = (n_e Z e^2 / m_i \varepsilon_0)^{1/2}$ فرکانس یونی پلاسما و $\tau = \omega_{pi} t / \sqrt{2} e$ است. همان‌گونه که از رابطه (۲) مشاهده می‌شود بیشینه انرژی پروتون با گذشت زمان افزایش می‌یابد. این در حالی است که انرژی باریکه پروتون با گذشت زمان با مقدار محدودی قطع می‌شود.

با محدود کردن شرایط مرزی و تصحیح مدل ارائه شده میدان الکتریکی در پشت هدف با رابطه (۳) بیان می‌شود [۲۳]:

$$E_x = \frac{\sqrt{2} k T_H}{\max(l_{back}, \lambda_D)} \quad (3)$$

در این جا T_H دمای الکترون‌های داغ، l_{back} طول مقیاس پشت هدف k_B ثابت بولتزمن و $\lambda_D = (\varepsilon_0 k_B T_e / n_e e^2)^{1/2}$ طول دی‌بای است. همان‌گونه که از رابطه (۳) مشاهده می‌شود مقدار طول مقیاس پشت هدف در تعیین میدان طولی ایجاد شده و در نهایت انرژی پروتون‌ها اثر مستقیم دارد. در این کار این موضوع به صورت شبیه‌سازی بررسی شده است.

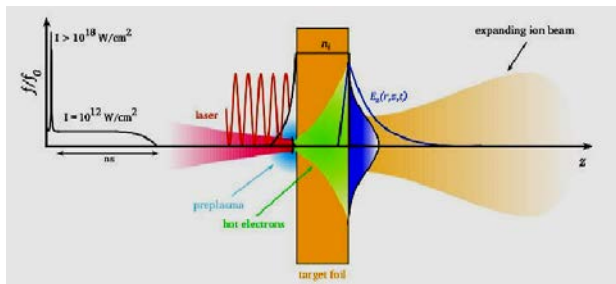
قبل از ورود به قسمت شبیه‌سازی لازم است فیزیک سازوکار TNSA تا اندازه‌ای شرح داده شود. شماتیک فرایندی که طی آن پروتون‌ها در یک میدان غلافی شتاب می‌گیرند در شکل ۱ نشان داده شده است.

برهم‌کنش پالس لیزر شدت بالا یا یک هدف جامد دسته‌ای از الکترون‌های پر انرژی تولید خواهد کرد. این ابر الکترونی در فویل هدف نفوذ کرده و با واگرایی ۳۰ درجه از انتهای هدف خارج می‌شوند. و یک میدان غلافی با فاصله طول دی‌بای و از مرتبه چندین TeV/m تشکیل می‌دهند. یون‌های پشت هدف در چنین میدانی در جهت عمود بر سطح هدف شتاب خواهند گرفت [۶].

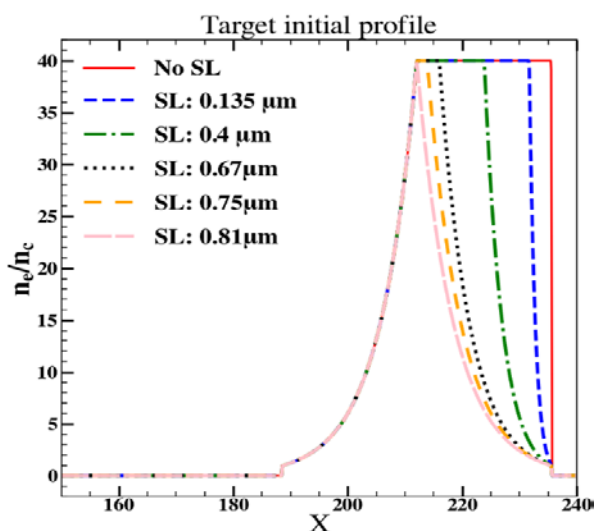
۳. شبیه‌سازی

۱.۳ شرایط اولیه

در این کار از نسخه دویعدی کد شبیه‌سازی اسمایل [۲۴] برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. به منظور بررسی اثر طول مقیاس پشت هدف بر روی شتاب باریکه پروتون، با تغییر این پارامتر و انجام شبیه‌سازی‌ها نتایج با هم مقایسه شده‌اند. شکل ۲ نمایه اولیه چگالی هدف‌های مختلف به کار گرفته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شماتیک از مکانیسم TNSA. یک فویل نازک هدف با ضخامت $5-50 \mu\text{m}$ تحت تابش لیزر شدت بالا قرار می‌گیرد. پیش‌پالس لیزر یک پیش‌پلاسما در جلوی هدف تشکیل می‌دهد و پالس اصلی با این پلاسما برهم‌کنش کرده و الکترون‌هایی با انرژی چندین MeV تولید کرده که رو به جلو شتاب می‌گیرند. برخورد این الکترون‌ها با اتم‌های زمینه موجب واگرایی این باریکه شده و هنگامی که به پشت هدف می‌رسند یک میدان الکتریکی در نتیجه جدایی بار ایجاد می‌شود. دامنه این میدان از مرتبه ($\sim \text{TV/m}$) است. یون‌ها سطح پشتی هدف در این میدان غلافی در جهت عمود بر سطح هدف شتاب می‌گیرند [۶].



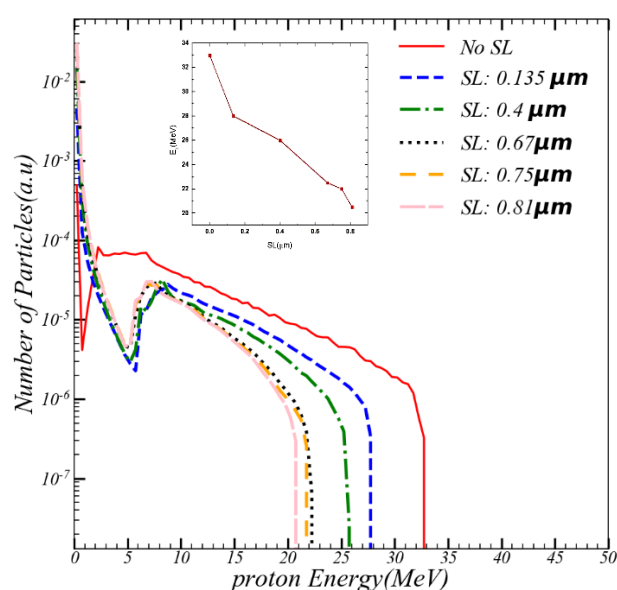
شکل ۲. نمایه لگاریتمی چگالی اولیه هدف در راستای انتشار لیزر که به عنوان ورودی در کد شبیه‌سازی استفاده شده است.



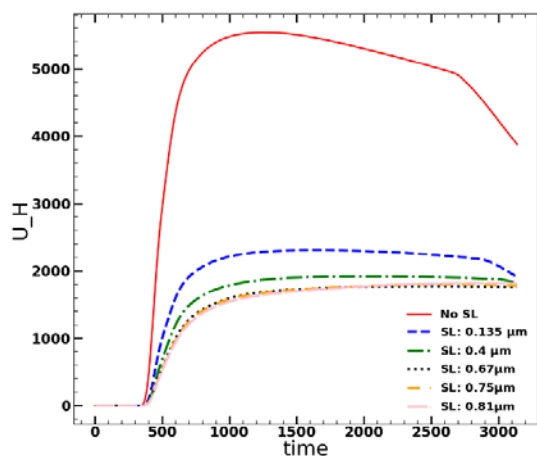
کمیت انرژی پروتونی تغییر زیادی نکرده و توزیع انرژی تقریباً بر هم منطبق می‌شوند.

هم‌چنین میزان جذب انرژی پروتونی برای هدف‌های مختلف در شکل ۴ آورده شده است.

مطابق با شکل ۴ با گذشت زمان، انرژی باریکه پروتون افزایش می‌یابد و این افزایش برای هدف با نمایه پستی شبه پله‌ای بیشینه و برای طول مقیاس‌های $0.67\text{ }\mu\text{m}$ ، $0.75\text{ }\mu\text{m}$ و $0.81\text{ }\mu\text{m}$ نزدیک به هم است. شکل ۴، در توافق با نتایج کارهای مرجع [۲۱] است که در آن نشان دادند برای داشتن بهینه شتابدهی پروتون بایستی گرادیان چگالی در پشت هدف بیش‌ترین مقدار خود را داشته باشد. به عبارتی هندسه پشت هدف بایستی با شیب تندی تغییر کند.



شکل ۳. توزیع انرژی پروتونی برای هدف با طول مقیاس پشت هدف مختلف. نمودار داخلی روند تغییرات انرژی قطع پروتون برحسب طول مقیاس پشت هدف را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تحول زمانی جذب انرژی پروتونی (همه پروتون‌ها) برای هدف با طول مقیاس مختلف در پشت هدف.

همان‌گونه که از شکل ۲ مشاهده می‌شود برای همه هدف‌های به کار رفته جلوی هدف با یک نمایه نمایی (طول مقیاس $0.81\text{ }\mu\text{m}$) به بیشینه چگالی می‌رسد. و پشت هدف با طول مقیاس‌های متفاوت از حالت بدون طول مقیاس تا $0.135\text{ }\mu\text{m}$ ، $0.4\text{ }\mu\text{m}$ ، $0.67\text{ }\mu\text{m}$ و $0.75\text{ }\mu\text{m}$ تغییر می‌کند.

پالس لیزر با قطبش P و با تابش عمود بر سطح هدف تابیده می‌شود. هدف، از دو لایه فویل آلومینیم (با ضخامت $6\text{ }\mu\text{m}$) و یک لایه نازک هیدروژن (با ضخامت 50 nm) تشکیل شده است. لایه آلومینیمی به صورت Al^{+9} و هیدروژن به صورت کاملاً یونیزه در نظر گرفته می‌شود. پالس لیزر با طول موج 800 nm و با نمایه مکانی گوسی با پهنای باریکه $3\text{ }\mu\text{m}$ و نمایه زمانی $\sin^2$ با $\text{FWHM} = 25\text{ fs}$ در راستای محور X منتشر می‌شود. پارامتر بدون بعد شدت لیزر برابر $a_0 = 10$ است. با توجه به تعریف $a_0 = \lambda(\text{nm}) \sqrt{\frac{I(\text{W/cm}^2)}{1.37 \times 10^{18}}}$ مقدار $a_0 = 10$ معادل شدت $2.1 \times 10^{20}\text{ W/cm}^2$ می‌باشد.

جعبه شبیه‌سازی با اندازه $100\text{ }\mu\text{m}$ در 30 و طول هر سلول $0.1\text{ }\mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است. چگالی الکترون‌ها با نمایه نمایی (شکل ۲) به بیشینه 40 n_c می‌رسد. و چگالی الکترونی و یونی هیدروژن در هر دو حالت 4 n_c (چگالی بحرانی) در نظر گرفته شده است. تعداد ماکرو ذرات الکترون در هر سلول 49 و این مقدار برای یون‌ها 25 می‌باشد.

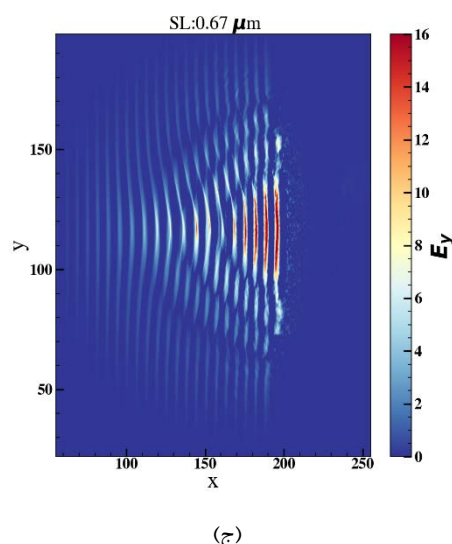
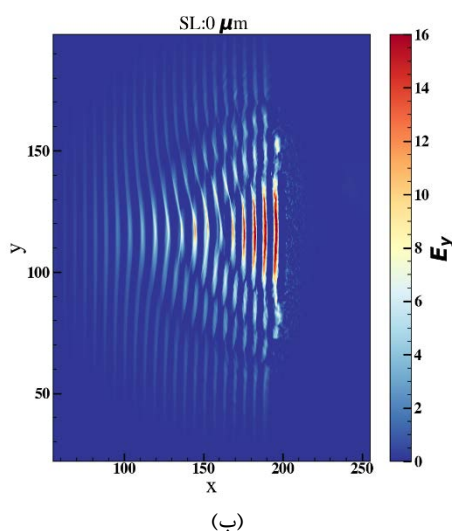
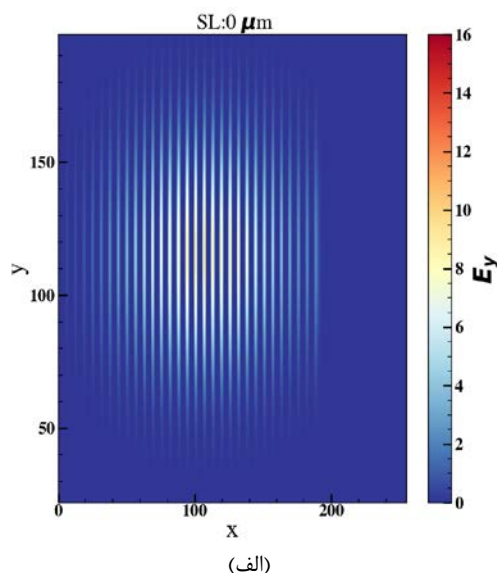
در تمام این کار، مقادیر موقعیت (X)، میدان الکتریکی به ترتیب به λ ، $\omega_p m_e c / q_e$ بهنجار می‌شوند (ω_p و q_e به ترتیب، بار الکترونی و فرکانس لیزر است).

۴. بحث و نتایج

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، در این کار هدف، بررسی تغییرات توزیع انرژی پروتون‌ها با تغییر طول مقیاس پشت هدف است. از این‌رو نمودار طیف انرژی پروتون برای شرایط اولیه مختلف هدف در شکل ۳ رسم شده است. تعداد ذرات در نمودارهای طیف انرژی دارای واحدهای دلخواه هستند و فقط در شبیه‌سازی سه‌بعد می‌توان تخمینی از تعداد الکترون‌ها یا یون‌های "واقعی" معادل در یک بازه انرژی را به دست آورد. به عبارتی تعداد ذرات به گونه‌ای نرمالیزه می‌شود که انتگرال منحنی طیف انرژی یک باشد. و این یک انتخاب دلخواه برای واحد تعداد ذرات می‌باشد.

از شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش طول مقیاس پشت هدف از حالت بدون طول مقیاس تا طول مقیاس $0.81\text{ }\mu\text{m}$ انرژی قطع پروتون‌ها کاهش می‌یابد. به علاوه از یک طول مقیاس آستانه (در این‌جا $0.67\text{ }\mu\text{m}$) به بعد با افزایش این





شکل ۵. میدان عرضی لیزر در زمان (الف) ۱۵ fs، (ب) و (ج) ۲۲ fs پس از شروع شبیه‌سازی.

از آن‌جا که عامل اصلی شتابدهی پروتون‌ها توزیع انرژی الکترون‌ها، شدت پالس لیزر (مؤلفه عرضی میدان الکتریکی) و میدان الکتروستاتیکی پلاسما در پشت هدف است لذا برای آنالیز دقیق‌تر به بررسی این سه پارامتر می‌پردازیم.

در شکل ۵ مؤلفه E_y میدان الکتریکی لیزر در زمانی که هنوز پالس لیزر به هدف نخورده (۵ (الف)) و نیز در لحظه‌ای که درون هدف منتشر شده و منعکس می‌شود (۵ (ب) و (ج)) برای دو هدف با سطح پشتی بدون طول مقیاس و نیز طول مقیاس $0.67 \mu\text{m}$ نشان داده شده است. مهم‌ترین نکته مشاهده شده برای تغییرات میدان عرضی لیزر افزایش شدت آن پس از انتشار در هدف است. که این امر به علت خودکانونی شدن پالس لیزر در برهم‌کنش آن با پلاسمای کم چگال است. شایان ذکر است از آن‌جا که نمایه چگالی در جلوی هدف برای هر دو هدف مورد بررسی یکسان است لذا اثرات خودکانونی در هر دو حالت مشابه بوده و علت تغییر انرژی قطع پروتون نمی‌تواند مؤثر از پدیده خودکانونی باشد.

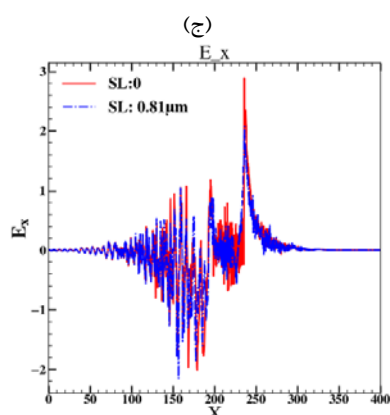
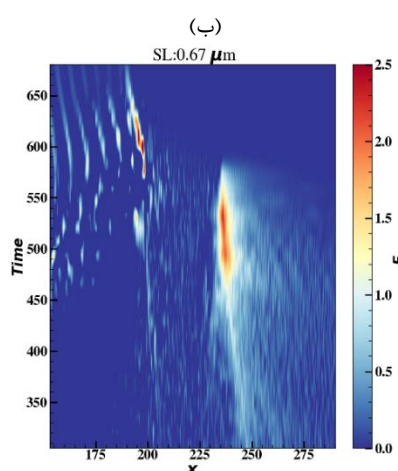
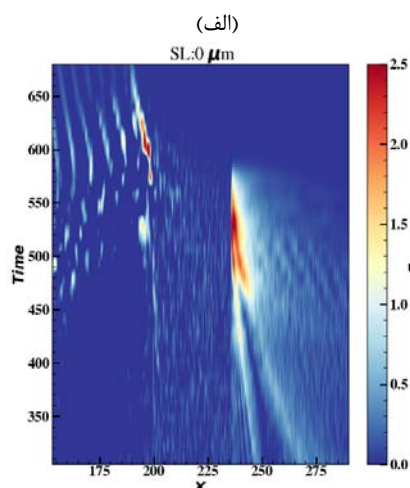
عامل مهم بعدی توزیع انرژی الکترون‌های شتاب گرفته است که این پارامتر در شکل ۶، برای همان دو هدف آورده شده در شکل ۵ رسم شده است.

توزیع انرژی در لحظه‌ای که الکترون‌ها به بیشینه انرژی خود رسیده‌اند (در زمان ۲۲ fs) رسم شده است و بعد از این لحظه با انتقال انرژی به پروتون‌ها انرژی الکترونی کم می‌شود. مطابق با شکل ۶ انرژی و دمای باریکه الکترونی (عکس شیب لگاریتمی توزیع انرژی) برای هر دو هدف بر هم منطبق است و افزایش انرژی قطع پروتون ناشی از اختلاف در دمای الکترونی نیز نمی‌تواند باشد.

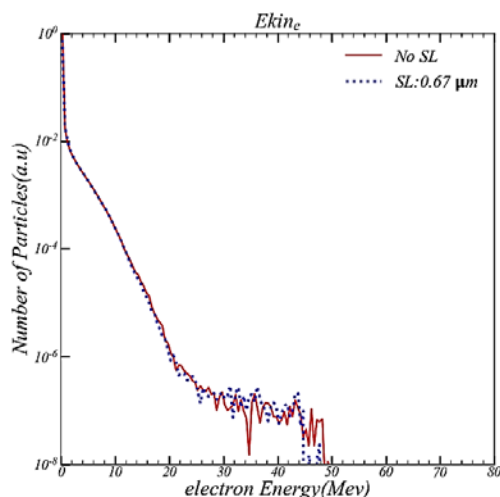
همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، هندسه پشت هدف یک پارامتر مهم و مؤثر در شکل‌گیری میدان الکتروستاتیک است که این میدان مسئول شتابدهی پروتون‌ها می‌باشد و با رابطه (۱) بیان می‌شود. مطابق با رابطه (۱) هر چه طول مقیاس پشت هدف کم باشد و به عبارتی پشت هدف با چگالی شبه‌پله‌ای (شیب تند) تغییر کند شدت میدان طولی ایجاد شده در پشت هدف افزایش می‌یابد. و در نتیجه با اعمال طول مقیاس‌های متفاوت در پشت هدف بیشینه انرژی پروتونی تغییر خواهد کرد (شکل ۳).



پشت هدف بیش‌تر باشد انرژی قطع پروتون‌ها افزایش یافته که این ناشی از افزایش دامنه میدان E_x در پشت هدف است. با توجه به بهبود فرایند جذب به هنگام تشکیل پیش‌پلازما در جلوی هدف، وجود پیش‌پالس لیزر تا حدی که موجب تخریب پشت هدف نباشد مفید است. و در این کار با بررسی طول مقیاس پشت هدف اثر این پارامتر به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شده است.



شکل ۷. تحول مکانی و زمانی میدان الکتروستاتیکی پلازما برای دو هدف با سطح پشتی (الف) شبه‌پله‌ای و (ب) با طول مقیاس $0.67 \mu\text{m}$ در پشت هدف. (ج) نمایه عمقی میدان E_x برای دو هدف در زمان 19 fs .



شکل ۶. توزیع انرژی باریکه الکترونی شتاب گرفته در برهم‌کنش پالس با هدف با سطح پشتی پله‌ای و نمایه با طول مقیاس $0.67 \mu\text{m}$.

بنابراین تنها عامل مطابق با رابطه (۱) گرادیان تغییرات چگالی در پشت هدف است که موجب تغییرات میدان طولی پلازما شده است. در شکل ۷ تغییرات مکان و زمانی میدان الکتریکی طولی برای دو هدف با سطح پشتی پله‌ای و هدف با طول مقیاس $0.67 \mu\text{m}$ نشان داده شده است.

کل ضخامت هدف و میدان تشکیل شده در پشت آن در شکل ۷ مشخص است. مطابق با شکل ۷ میدان الکتروستاتیکی پس از گذشت 19 fs از شروع شبیه‌سازی برای هر دو هدف در قسمت پشت هدف تشکیل می‌شود با این تفاوت که در هدف با سطح پشتی پله‌ای، شدت میدان حدود 50% درصد بیش‌تر (شکل ۷ ج) از آن در هدف به هم ریخته است. در نتیجه انتظار می‌رود پروتون‌ها در این میدان شتابدهی قوی‌تر به انرژی بیش‌تری دست یابند. هم‌چنین گستردگی میدان در هدف به هم ریخته بیش‌تر و این امر موجب تضعیف عملکرد شتاب‌دهی خواهد شد.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بهبود انرژی باریکه پروتون شتاب گرفته در سازوکار TNSA در این کار به بررسی تغییرات انرژی این باریکه با تغییر طول مقیاس پشت هدف پرداخته شده است. پشت هدف با برهم‌کنش پیش‌پالس با هدف ممکن است دچار به هم ریختگی شود و این امر موجب تضعیف عملکرد شتابدهی خواهد شد. با اعمال طول مقیاس‌های متفاوت در بازه صفر تا $0.85 \mu\text{m}$ در پشت هدف به صورت شرایط اولیه در کد شبیه‌سازی دوبعدی اسمایل، روند تغییرات میدان الکتریکی طولی و عرضی و نیز توزیع انرژی الکترونی و پروتونی بررسی شد. مطابق با نتایج به دست آمده هر چه گرادیان چگالی در

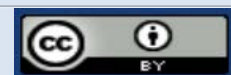


مراجع

1. Snavely R.A, Key M.H, Hatchett S.P, Cowan T.E, Roth M, Phillips T.W, Stoyer M.A, Henry E.A, Sangster T.C, Singh M.S, Wilks S.C, MacKinnon A, Offenberger A, Pennington D.M, Yasuike K, Langdon A.B, Lasinski B.F, Johnson J, Perry M.D, Campbell E.M. Intense high-energy proton beams from petawatt-laser irradiation of solids. *Physical Review Letters*. 2000;85(14):2945.
2. Patel P.K, Mackinnon A.J, Key M.H, Cowan T.E, Foord M.E, Allen M, Price D.F, Ruhl H, Springer P.T, Stephens R. Isochoric heating of solid-density matter with an ultrafast proton beam. *Physical Review Letters*. 2003;91(12):125004.
3. McKenna P, Ledingham K.W.D, Shimizu S, Yang J.M, Robson L, McCanny T, Galy J, Magill J, Clarke R.J, Neely D, Norreys P.A, Singhal R.P, Krushelnick K, Wei M.S. Broad energy spectrum of laser-accelerated protons for spallation-related physics. *Physical Review Letters*. 2005;94(8):084801.
4. Roth M, Cowan T.E, Key M.H, Hatchett S.P, Brown C, Fountain W, Johnson J, Pennington D.M, Snavely R.A, Wilks S.C, Yasuike K, Ruhl H, Pegoraro F, Bulanov S.V, Campbell E.M, Perry M.D, Powell H. Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams. *Physical Review Letters*. 2001;86(3):436.
5. Bulanov S, Khoroshkov V. Feasibility of using laser ion accelerators in proton therapy. *Plasma Physics Reports*. 2002;28(5).
6. Roth M, Schollmeier M. Ion acceleration-target normal sheath acceleration. *ArXiv Preprint ArXiv*. 2017;1705:10569.
7. Mora P. Plasma expansion into a vacuum. *Physical Review Letters*. 2003;90(18):185002.
8. Mora P. Thin-foil expansion into a vacuum. *Physical Review E*. 2005;72(5):056401.
9. Grismayer T, Mora P. Influence of a finite initial ion density gradient on plasma expansion into a vacuum. *Physics of Plasmas*. 2006;13(3):032103.
10. Wilks S.C, Langdon A.B, Cowan T.E, Roth M, Singh M, Hatchett S, Key M.H, Pennington D, MacKinnon A, Snavely R.A. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions. *Physics of Plasmas*. 2001;8(2):542-549.
11. Wilks S.C, Kruer W.L, Tabak M, Langdon A.B. Absorption of ultra-intense laser pulses. *Physical Review Letters*. 1992;69(9):1383.
12. Hatchett S.P, Brown C.G, Cowan T.E, Henry E.A, Johnson J, Key M.H, Koch J.A, Langdon A.B, Lasinski B.F, Lee R.W, Mackinnon A.J, Pennington D.M, Perry M.D, Phillips T.W, Roth M, Sangster T.C, Singh M.S, Snavely R.A, Stoyer M.A, Wilks S.C, Yasuike K. Electron, photon, and ion beams from the relativistic interaction of Petawatt laser pulses with solid targets. *Physics of Plasmas*. 2000;7(5):2076-2082.
13. Passoni M, Lontano M. Theory of light-ion acceleration driven by a strong charge separation. *Physical Review Letters*. 2008;101(11):115001.
14. Albright B.J, Yin L, Hegelich B.M, Bowers K.J, Kwan T.J.T, Fernández J.C. Theory of laser acceleration of light-ion beams from interaction of ultrahigh-intensity lasers with layered targets. *Physical Review Letters*. 2006;97(11):115002.
15. Wang D, Shou Y, Wang P, Liu J, Li C, Gong Z, Hu R, Ma W, Yan X. Enhanced proton acceleration from an ultrathin target irradiated by laser pulses with plateau ASE. *Scientific Reports*. 2018;8(1):1-7.
16. Zimmer M, Scheuren S, Ebert T, Schaumann G, Schmitz B, Hornung J, Bagnoud V, Rödel C, Roth M. Analysis of laser-proton acceleration experiments for development of empirical scaling laws. *Physical Review E*. 2021;104(4):045210.
17. Margarone D, Klimo O, Kim I.J, Prokūpek J, Limpouch J, Jeong T.M, Mocek T, Pšikal J, Kim H.T, Proška J, Nam K.H, Štolcová L, Choi I.W, Lee S.K, Sung J.H, Yu T.J, Korn G. Laser-driven proton acceleration enhancement by nanostructured foils. *Physical Review Letters*. 2012;109(23):234801.
18. Neely D, Foster P, Robinson A, Lindau F, Lundh O, Persson A, Wahlström C.-G, McKenna P. Enhanced proton beams from ultrathin targets driven by high contrast laser pulses. *Applied Physics Letters*. 2006;89(2):021502.
19. Ghasemi S.A, Pishdast M, Yazdanpanah J. Study on the electron acceleration in the interaction of two relativistic laser beams with under-dense plasma. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2022;99(2):136-145 [In Persian].
20. Goodarzi R, Yazdani E. Studying and surveying proton acceleration in high power laser interaction with foam targets. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2020;93(3):63-72 [In Persian].
21. Kaluza M, Schreiber J, Santala M.I.K, Tsakiris G.D, Eidmann K, Meyer-ter-Vehn J, Witte K.J. Influence of the laser prepulse on proton acceleration in thin-foil experiments. *Physical Review Letters*. 2004;93(4):045003.
22. Léc Z, Singh P, Ter-Avetisyan S. Threshold target thickness in high-contrast laser-driven ion acceleration. *Physics of Plasmas*. 2022;29(10):103104.
23. Mackinnon A.J, Borghesi M, Hatchett S, Key M.H, Patel P.K, Campbell H, Schiavi A, Snavely R, Wilks S.C, Willi O. Effect of plasma scale length on multi-MeV proton production by intense laser pulses. *Physical Review Letters*. 2001;86(9):1769.
24. Derouillat J, Beck A, Pérez F, Vinci T, Chiaramello M, Grassi A, Flé M, Bouchard G, Plotnikov I, Aunai N, Dargent J, Riconda C, Grech M. Smilei: A collaborative, open-source, multi-purpose particle-in-cell code for plasma simulation. *Computer Physics Communications*. 2018;222:351-373.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

حسن بیگی، علی، عزیزیان، فاطمه، جعفری محمدجعفر، رضائی، سمیه. (۱۴۰۳)، بررسی اثر نمایه چگالی هدف در شتابدهی لیزری پرتوتون. مجله علوم و فنون هسته‌ای،

دوره ۴۵، شماره ۱، جلد ۱۰۷، بهار ۱۴۰۳، ص ۱۱۳-۱۰۷. DOI: 10.24200/nst.2023.1270.1826 .Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1557.html

