



نقش یونیزاسیون میدانی در ساز و کار شتابدهی پروتون از طریق برهم‌کنش پالس شدت بالا در پهنای متفاوت

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

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

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

*Email: mhjafari@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۴/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۶/۳۱

چکیده

مکانیزم شتابدهی غلافی پروتون (TNSA) یکی از رایج‌ترین مکانیزم‌های شتابدهی پروتون در چیدمان‌های تجربی می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی‌های دو بعدی ذره در سلول (PIC) به مطالعه اثر یونیزاسیون میدانی در برهم‌کنش پالس لیزر شدت بالا با طول پالس‌های مختلف بر روی عملکرد شتابدهی پروتون پرداخته شده است. برای این منظور دو هدف جامد (تقریباً خنثی) و نیز پلاسمای کاملاً یونیزه از جنس آلومینیم با ضخامت ۰/۵ میکرومتر که با یک لایه نازک هیدروژن با ضخامت ۵۰ نانومتر جفت شده است در نظر گرفته شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با ثابت گرفتن انرژی پالس لیزر و برای شدت‌های متوسط لیزری (در این جا $a_0=10$ برای پالس با پهنای ۲۵ فمتوثانیه) استفاده از ساختار جامد منجر به افزایش انرژی بیشینه پروتون‌ها حدود ۳۶ درصد نسبت به حالت هدف با ساختار پلاسما می‌شود. به علاوه اختلاف ایجاد شده در انرژی قطع در دو حالت هدف جامد و پلاسمای ایده‌آل با افزایش پهنای پالس لیزری کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی ذره‌ای، شتابدهی لیزری پروتون، مکانیزم TNSA، پهنای پالس لیزر، یونیزاسیون میدانی

Field ionization effect on the proton acceleration scheme via high intensity laser interaction with target at different pulse durations

S. Rezaei¹, M.J. Jafari^{*1}, E. yazdani²

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

Research Article

Received 17.7.2021, Accepted 22.9.2021

Abstract

Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) mechanism is one of the most common proton acceleration mechanisms in the experimental setup. In this work, the effect of field ionization on the proton acceleration performance in result of the interaction of high intensity laser pulses with different pulse lengths was studied using two-dimensional particle in cell (PIC) simulations. For this purpose, two solid (neutral) targets as well as fully ionized plasma target, made of aluminum layer with thickness of 0.5 μm , and paired with a thin layer of hydrogen with thickness of 50 nm are considered. Simulation results showed that considering the constant pulse energy and a medium laser intensity (here $a_0=10$ for pulse width of 25 femtoseconds) the use of solid structure leads to an increase in the maximum energy of the protons by about 36%. In addition, the difference in proton cut-off energy between the solid target and the ideal plasma one decreases with increasing the laser pulse width.

Keywords: Particle in cell simulation, Laser proton acceleration, TNSA mechanism, Laser pulse duration, Field ionization



۱. مقدمه

پرتوهای یونی تولید شده از برهم‌کنش لیزر شدت بالا با ماده، کاربردهای بالقوه بسیاری مانند اشتعال سریع در هم‌جوشی لیزری [۱]، تولید نوترون [۲]، و همچنین در صنعت پزشکی از جمله رادیوگرافی پروتون و هادرون درمانی برای درمان تومور سرطانی را در برمی‌گیرند [۳].

بسته به پارامترهای لیزر و شرایط برهم‌کنش، سازوکارهای مختلفی از جمله شتاب‌دهی در اثر تشکیل غلاف از سطح عمود بر پشت هدف^۱ [۴] شتاب فشار تابشی^۲ [۵]، شتاب شوک الکترواستاتیک بدون برخورد [۶] و ترکیب آن‌ها را می‌توان برای شتاب یونی در نظر گرفت. تاکنون بیش‌تر مطالعات تحقیقاتی تجربی بر اساس مدل TNSA انجام شده است که به راحتی با امکانات فعلی لیزر قابل دستیابی است.

در این رهیافت، ابتدا بسیاری از الکترون‌ها به دلیل اینرسی کمتر نسبت به یون‌ها در اثر تابش لیزر با مرتبه شدت حدود 10^{21} وات بر سانتی‌متر مربع، از سمت جلوی هدف از طریق جذب غیربرخوردی انرژی کسب کرده و این الکترون‌های داغ یا سریع از پشت هدف فرار کرده و ابر الکترونی با شعاع طول دی‌بای 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 [۷]. 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 و پالس لیزر بهبود بخشید [۸، ۹]. 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]. 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 به کارگیری لایه فوم با چگالی نزدیک بحرانی در جلوی فویل اصلی، برای افزایش بازدهی در تولید الکترون‌های نسبیتی

در فرایند شتاب‌دهی از پشت غلاف، می‌تواند به طور چشمگیری انرژی پروتون را افزایش دهد [۱۲]. هر چند از نقطه‌نظر تجربی چالش‌های فراوانی در زمینه ساخت هدف با ویژگی‌های مشخص وجود دارد اما کدهای شبیه‌سازی ذره‌ای در دو بعد و سه بعد برای بررسی ابعاد مختلف هدف با پارامترهای متفاوت می‌توانند استفاده شوند.

در یک چیدمان اولیه از مکانیسم TNSA که هدف شامل یک فویل آلومینیومی نسبتاً نازک می‌باشد، با توجه به بالا بودن شدت لیزری و در نتیجه یونیزه شدن هدف در همان لحظات اولیه برهم‌کنش تصور کلی بر این بوده است که وارد کردن عامل یونیزاسیون تأثیری در نتایج نهایی مطالعات شبیه‌سازی ندارد. این در حالی است که، یونیزاسیون به طور مستقیم موجب تغییر پروفایل چگالی و نیز تابع توزیع اولیه ذرات می‌شود و در نتیجه می‌تواند در عملکرد شتاب‌دهی پروتون تأثیرگذار باشد.

از طرفی یکی از دلایل ایجاد پلاسمای اولیه (پیش‌پلاسم) در برهم‌کنش پالس‌های لیزری پرشدت با اهداف، وضوح پایین^۳ پالس‌های پرشدت تولید شده در آزمایشگاه است. در چنین حالتی پیش‌پالس می‌تواند تا پیش از رسیدن پالس اصلی (از مرتبه (نانو ثانیه) موجب ایجاد پلاسمای روی سطح هدف و حتی پخش آن در خلأ جلوی هدف باشد. به عبارتی برای وارد کردن عمل یونیزاسیون در شتاب‌دهی پروتون بایستی از پالس لیزری با وضوح فوق‌العاده بالا استفاده شود اما با این وجود مقایسه دو حالت هدف پلاسمایی و جامد حایز اهمیت می‌باشد.

اخیراً تأثیر فعال کردن عامل یونش در نتایج شبیه‌سازی گرمایش الکترون‌ها مطالعه و بررسی شده است [۱۳]. به علاوه در کار [۱۴] دینامیک یونیزاسیون میدانی و برخوردی در برهم‌کنش لیزر شدت بالا با دو هدف گازی و جامد مطالعه و بررسی شده است.

در کار حاضر با استفاده از ابزار شبیه‌سازی ذره در سلول و با فعال کردن یونیزاسیون بر پایه یونش میدانی در معادلات، نتایج حاصل از ایجاد کانال پلاسمایی، میزان جذب انرژی الکترونی و یونی و انرژی پروتون‌ها در برهم‌کنش پالس لیزر (با پهنای زمانی متفاوت) با هدف جامد آلومینیومی در مقایسه با هدف پلاسمایی و یونیزه شده آلومینیم، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در این کار، بعد از بیان مقدمه در بخش اول، تئوری یونیزاسیون میدانی در بخش دوم آورده شده است. بعد از آن، در بخش سوم، مشخصه‌ها و نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده و در نهایت، نتیجه‌گیری نهایی مقاله در بخش آخر آورده شده است.

1. Target Normal Sheath Acceleration (TNSA)
2. RPA



۲. یونیزاسیون میدانی

یونیزاسیون میدانی فرایندی است که در برهم‌کنش لیزر و پلاسما در رژیم با شدت بسیار بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. و این امر می‌تواند بر تولید الکترون‌های پر انرژی و نیز شتاب یونی ناشی از تابش هدف جامد توسط لیزر شدت بالا تأثیر بگذارد.

الکترون‌های مقید اتمی با دریافت مقدار مشخصی از انرژی (از طریق فوتون‌ها) در روش چندفوتونی آزاد شده و فرایند یونش اتفاق می‌افتد. شدت معادل پالس برای اولین مدار بور در مورد اتم هیدروژن تقریباً برابر است با E_a قدرت میدان اتمی است):

$$I_{\text{atomic}} = cE_a^2 / 8\pi \approx 3/4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$$

این شدت به عنوان آستانه شدت یونیزاسیون تعریف می‌شود. در واقع، هر شدت بالاتر از این شدت، اتم را به سرعت یونیزه می‌کند. پارامتر اصلی که مکانیزم یونیزاسیون را تعیین می‌کند پارامتر کلدیش^۱ است، $\gamma = \omega_L \sqrt{2I_p} / E$ [۱۵]. که E و I_p به ترتیب فرکانس، دامنه میدان لیزر و پتانسیل یونیزاسیون اتمی هستند. برای مقادیر $\gamma \gg 1$ ، مکانیسم یونیزاسیون، چند فوتونی است و برای مقادیر $\gamma \ll 1$ ، این مکانیزم به عنوان یونیزاسیون میدانی شناخته می‌شود که می‌تواند به صورت تونل‌زنی اتفاق بیفتد. الکترون‌های اتم در قید پتانسیل اتمی قرار دارند. اگر فرکانس گذار اتمی بسیار کم‌تر از فرکانس لیزر باشد، می‌توان میدان الکتریکی لیزر را تقریباً ثابت در نظر گرفت. در این حالت ارتفاع و طول سد پتانسیل اتمی که الکترون‌ها باید از آن عبور کنند به شدت کاهش می‌یابد و الکترون‌ها می‌توانند به راحتی از پتانسیل اتم فرار کنند. در غیراین‌صورت، بر اساس مکانیک کوانتوم، هنوز هم امکان آزاد شدن الکترون وجود دارد که این فرایند را یونیزاسیون تونل‌زنی می‌نامند. در میان بسیاری از آثار مورد مطالعه برای محاسبه نرخ یونیزاسیون [۱۶، ۱۷]، یکی از معتبرترین نظریه‌ها تئوری ADK (برای آموسوف، دلونه و کراینوف) است [۱۷]. بر اساس این نظریه میزان یونیزاسیون برای میدان الکتریکی با قطبش خطی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W(|\hat{E}|) = I_p \omega_A f_{lm} C_{n^*l} \left(\frac{\gamma |\hat{E}|}{\pi(\gamma I_p)^{1/2}} \right)^{\gamma n^*} \left[\frac{\gamma}{|\hat{E}|} (\gamma I_p)^{1/2} \right]^{2n^* - |m| - 1} \exp \left(-\frac{\gamma}{|\hat{E}|} (\gamma I_p)^{1/2} \right),$$

که در آن $\omega_A = 4/13 \times 10^{16} \text{ sec}^{-1}$ و نیز

$$f_{lm} = \frac{(1 + \gamma l)}{\gamma^{|m|}} \frac{(l + |m|)!}{(l - |m|)! (|m|)!}$$

$$C_{n^*l} = (\gamma n^* \pi)^{-1/2} \left(\frac{n^*}{\gamma e} \right)^{-n^*},$$

که در این جا؛ e و n^* اعداد کوانتوم مدار، مغناطیسی، اوپلر و مؤثر هستند.

یک روش عددی رایج برای بررسی پدیده‌های یونیزاسیون سریع در اثر برهم‌کنش لیزر با ماده بر اساس توصیف شبیه‌سازی ذره‌ای است. این فرایند در کد اسمایل^۲ [۱۸] به صورت یک ماژول مونت کارلو تعبیه شده است.

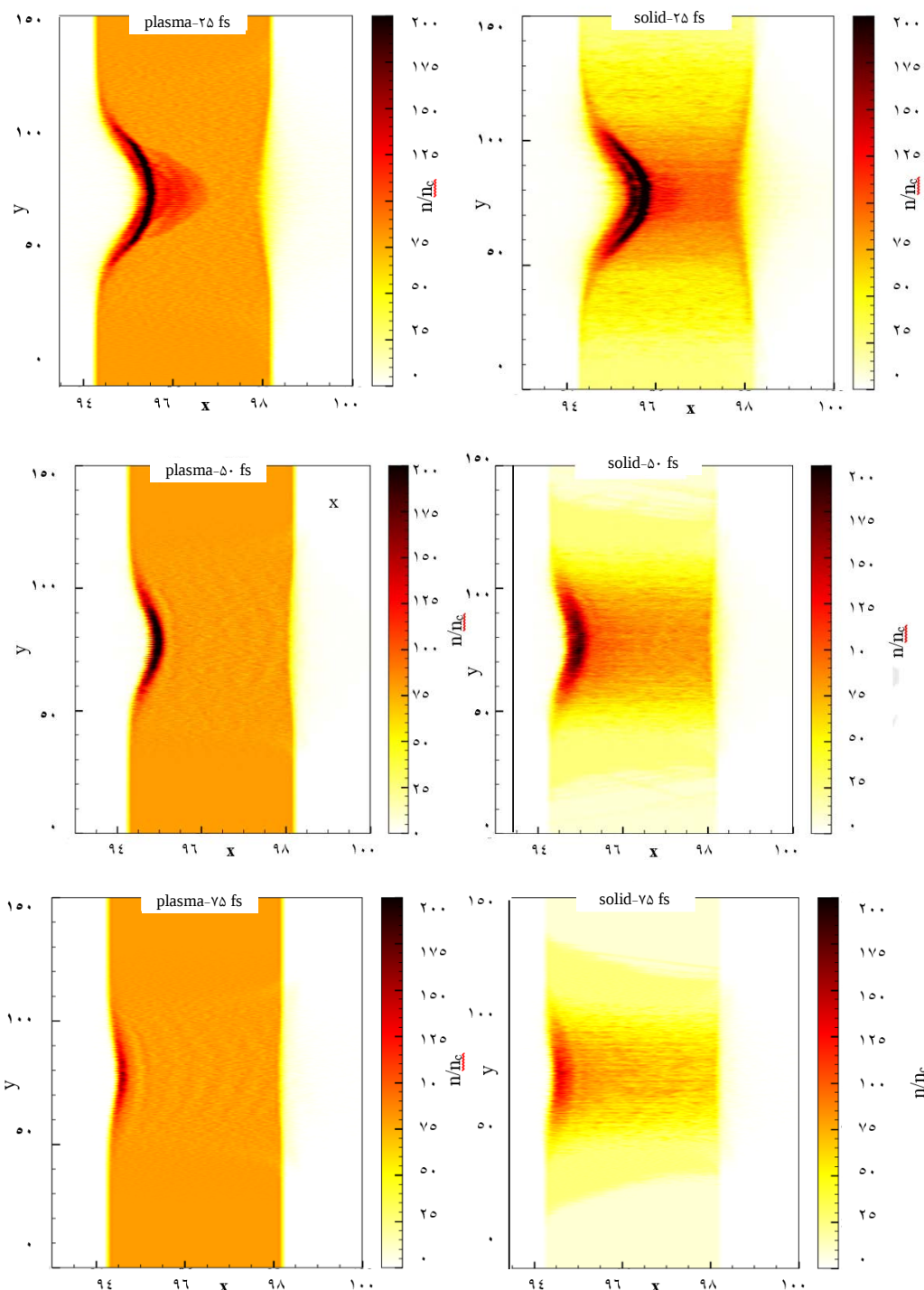
۳. مشخصه‌های شبیه‌سازی

به منظور بررسی اثر یونیزاسیون در عملکرد شتاب‌دهی پروتون، شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نسخه دو بعدی کد اسمایل انجام شده است. پالس لیزر با قطبش P و با تابش عمود بر سطح هدف بر دو هدف پلاسما و هدف جامد به طور جداگانه تابیده می‌شود. هدف، از دو لایه فویل آلومینیم (با ضخامت ۰/۵ میکرومتر) و یک لایه نازک هیدروژن (با ضخامت ۵۰ نانومتر) تشکیل شده است. در حالت هدف جامد، عامل یونیزاسیون میدانی در کد فعال شده و در حالت هدف پلاسمایی، لایه آلومینیمی به صورت Al^{+9} و هیدروژن به صورت کاملاً یونیزه در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به وضوح پایین پالس لیزر در واقعیت در مورد هدف جامد، لایه آلومینیمی به صورت یک بار مثبت در نظر گرفته شده است. پالس لیزر با طول موج ۸۰۰ نانومتر و با پروفایل مکانی گوسی با پهنای باریکه ۳ میکرومتر و پروفایل زمانی $\sin^2$ با $\text{FWHM} = 25-75 \text{ fs}$ در راستای محور x منتشر می‌شود. پارامتر بدون بعد شدت لیزر برابر $a_0 = 5-10$ می‌باشد. جعبه شبیه‌سازی با اندازه ۱۰۰ در ۲۰ میکرومتر و طول هر سلول ۰/۰۰۷ میکرومتر در نظر گرفته شده است. چگالی الکترون‌ها در حالت هدف پلاسمایی n_c ۸۰، چگالی اتم‌های خنثی در هدف جامد n_c ۸/۸ (طوری که پس از یونیزاسیون ۹ بار مثبت چگالی الکترونی به n_c ۸۰ می‌رسد) و چگالی الکترونی و یونی هیدروژن در هر دو حالت n_c ۹ در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی اثر تغییر پهنای پالس بر عملکرد شتاب‌دهی پروتون تغییرات شدت و پهنای پالس به گونه‌ای انجام می‌گیرد که انرژی لیزر در هر سه حالت ثابت در نظر گرفته شود. در تمام این کار، مقادیر، موقعیت (x) ، اندازه



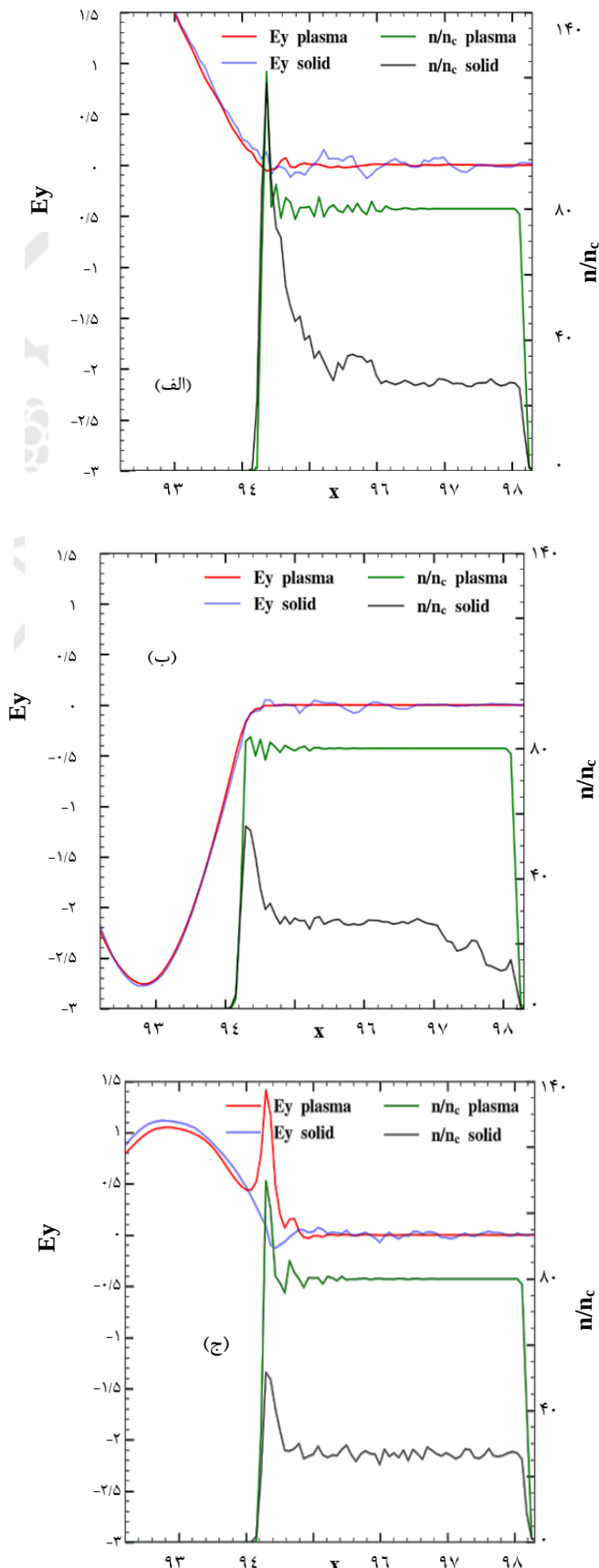
۲۵، ۵۰ و ۷۵ فمتوثانیه در زمان ۱۰۰ فمتوثانیه پس از شروع شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در این زمان، ابتدای پالس لیزری وارد هدف شده و شروع به برهم‌کنش با هدف پلاسمایی و جامد می‌کند.

حرکت‌های طولی (P_x)، میدان الکتریکی طولی (E_x) و پتانسیل برداری عرضی (a_y) به ترتیب به $m_e c$ ، λ و $q_e/m_e c^2$ و $\omega_0 m_e c/q_e$ و q_e به ترتیب، بار الکترونی و فرکانس لیزر می‌باشند). شکل ۱، پروفایل دو بعدی چگالی الکترونی در دو حالت پلاسمای ایده‌آل و هدف جامد برای سه پالس لیزری با پهنای



شکل ۱. پروفایل دو بعدی چگالی الکترونی در برهم‌کنش پالس لیزر با پهنای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ فمتوثانیه با هدف جامد (سمت راست) و هدف پلاسمایی (سمت چپ). همان‌طور که از شکل ۱ مشاهده می‌شود، رفتار کانال پلاسمایی ایجاد شده در دو حالت پلاسمای ایده‌آل و هدف جامد متفاوت می‌باشد. با در نظر گرفتن پالس لیزری با پهنای زمانی ۲۵ فمتوثانیه، در حالت پلاسمای ایده‌آل، ورود پالس لیزر و

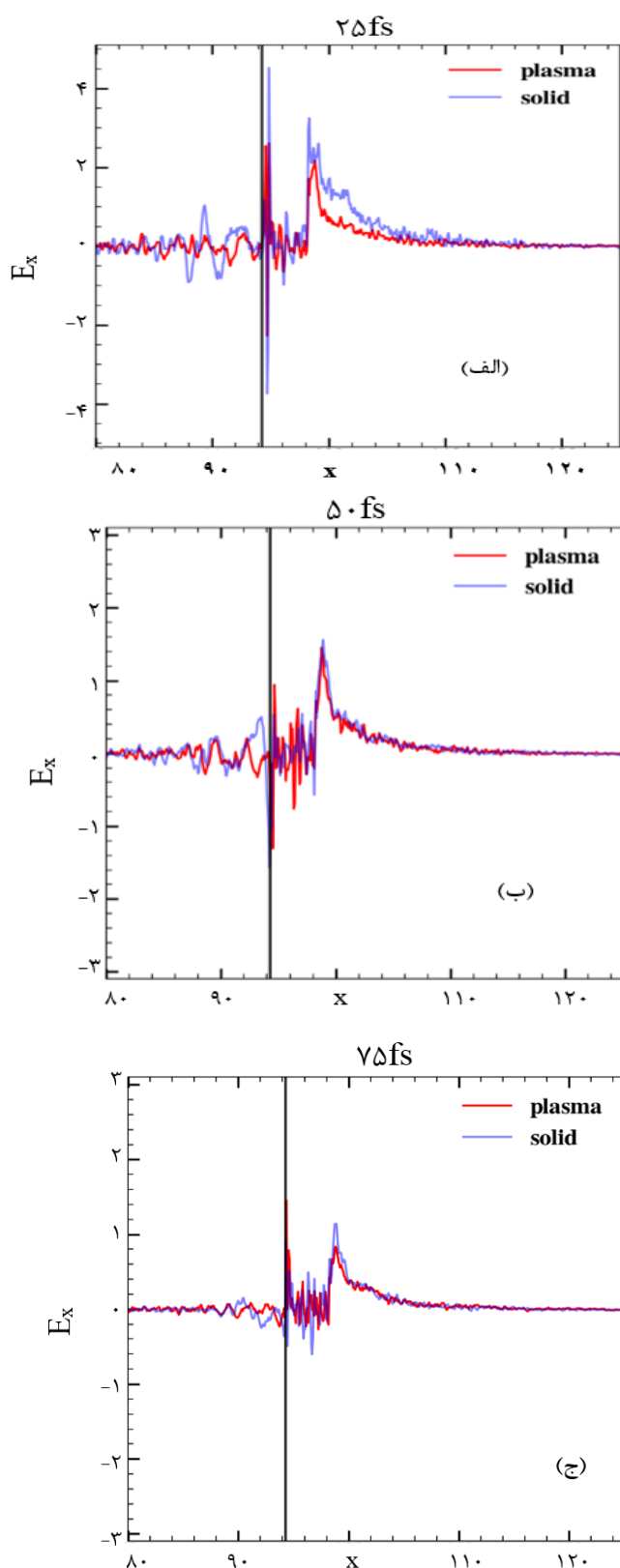




شکل ۲. پروفایل چگالی الکترونی و میدان الکتریکی عرضی (E_y) منتشر شده در دو حالت هدف جامد و پلاسمایی برای (الف) پالس ۲۵ فمتوثانیه، (ب) پالس ۵۰ فمتوثانیه و (ج) پالس ۷۵ فمتوثانیه.

ایجاد نیروی پاندرماتیو، موجب تجمع موضعی الکترون‌ها و در نتیجه افزایش ناگهانی چگالی در این ناحیه (ناحیه هلالی شکل با چگالی بالا) می‌شود. با کارگیری هدف جامد نیز پالس لیزر به محض ورود شروع به یونیزاسیون میدانی کرده که در این حالت تولید الکترون‌ها و تشکیل پلازما به صورت جت می‌باشد. به علاوه تجمع الکترونی در این حالت به صورت دو لایه‌ای با ضخامت بیش‌تر و پهنای عرضی (پاشندگی عرضی) باریک‌تری نسبت به هدف پلاسمای ایده‌آل مشاهده می‌شود که به لحاظ کیفیت تولید میدان الکتروستاتیکی نکته حایز اهمیتی می‌باشد. هم‌چنین از شکل مشخص می‌شود که انتشار پالس در حالت هدف پلاسمایی کمی عقب‌تر از هدف جامد بوده در نتیجه در این حالت شکنندگی و ناپایداری پشت هدف دیرتر اتفاق می‌افتد. به لحاظ تجربی هر چه پشت هدف دیرتر از حالت طبیعی خود خارج شود مطلوب‌تر است زیرا میدان الکتروستاتیکی برای شتاب پروتون‌ها در این قسمت ایجاد خواهد شد. رفتار باریکه الکترونی تشکیل شده در نتیجه فشار تابشی لیزر در دو حالت ۵۰ و ۷۵ فمتوثانیه نیز به صورت مشابه می‌باشد با این تفاوت که با توجه به کاهش شدت پالس در دو حالت ۵۰ و ۷۵ فمتوثانیه بیشینه مقدار چگالی در این حالت کم‌تر از مقدار آن در حالت پالس ۲۵ فمتوثانیه می‌باشد. به منظور بررسی دقیق‌تر مسأله، نمودار دو بعدی چگالی الکترونی و نیز مؤلفه عرضی میدان الکتریکی لیزر در شکل ۲ برای هر دو حالت هدف با شرایط پلاسمای ایده‌آل و جامد در هر سه پهنای پالس در زمان ۵۰ فمتوثانیه (پس از شروع شبیه‌سازی) آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۲ (الف) مشاهده می‌شود، با ورود پالس لیزر به هدف از آن‌جا که دامنه پالس لیزر از حد بحرانی برای شفافیت نسبیتی کم‌تر است و تنها در ناحیه کوچکی منتشر می‌شود. اما نکته قابل توجه در این جا انتشار و نوسان بیش‌تر میدان E_y در هدف جامد نسبت به هدف پلاسمایی است (منحنی آبی رنگ مربوط به انتشار در هدف جامد و منحنی قرمز مربوط به هدف پلازما در شکل ۲ (الف)). این ممکن است به علت تغییرات با شیب ملایم چگالی الکترونی در ابتدای مرز هدف و خلأ باشد. در واقع برای هدف پلاسمایی چگالی به صورت پله‌ای با مقدار n_c می‌باشد در حالی که با ورود پالس لیزر به محیط جامد و فرایند یونیزاسیون، هدف به تدریج یونیزه شده و چگالی به صورت شیب‌دار افزایش می‌یابد. به علاوه از شکل ۲ مشاهده می‌شود با ورود پالس لیزر به هدف و اعمال نیروی پاندرماتیو تجمعی از الکترون‌ها در جبهه موج ایجاد شده و در نتیجه قله تیزی از چگالی الکترونی مشاهده می‌شود.





شکل ۳. میدان الکتریکی طولی (E_x) تولید شده در دو حالت هدف جامد و پلاسمایی برای (الف) پالس ۲۵ فمتوثانیه، (ب) پالس ۵۰ فمتوثانیه و (ج) پالس ۷۵ فمتوثانیه.

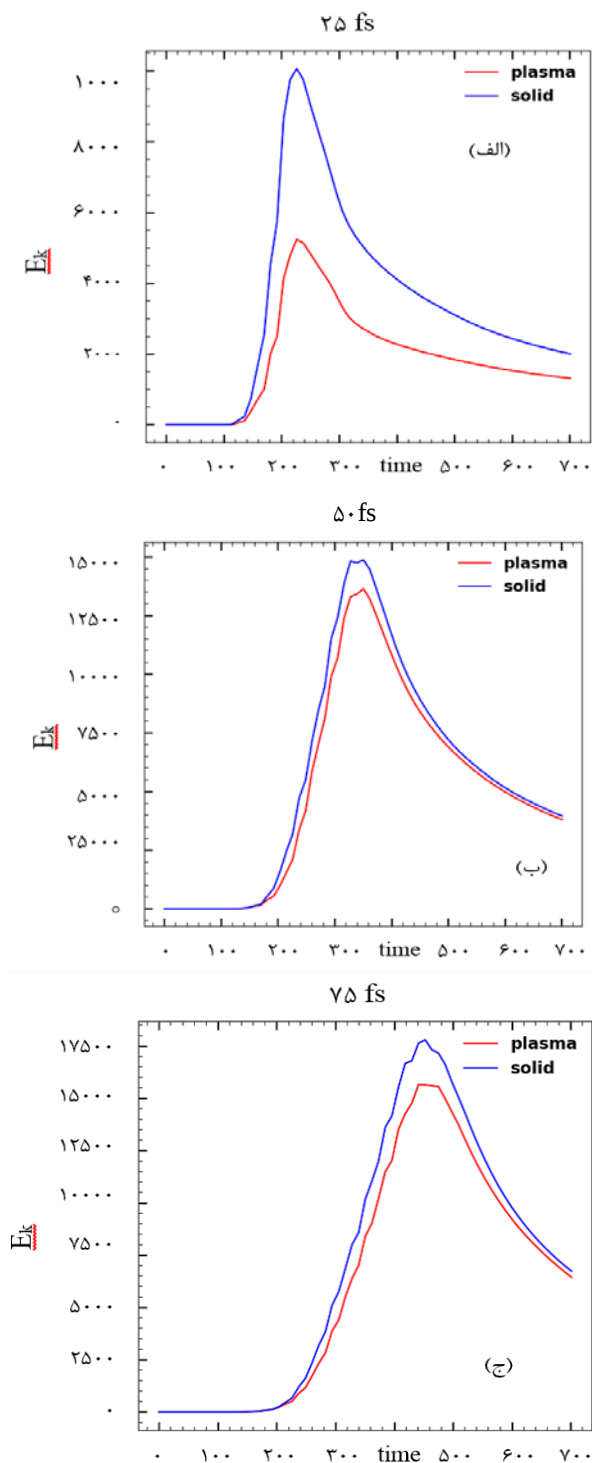
به طور کلی از شکل ۲ (الف) این نکته نتیجه می‌شود که با جایگزینی هدف جامد و اعمال یونیزاسیون پالس لیزر امکان انتشار بیش‌تری نسبت به حالت پلاسمایی دارد و در نتیجه انتظار می‌رود میزان جذب انرژی توسط الکترون‌ها و در نهایت انرژی قطع یون‌ها در این حالت بیش‌تر باشد.

به منظور مقایسه نتایج با پالس لیزر با پهنای بزرگ‌تر، این منحنی در زمان $58/3$ فمتوثانیه و $66/6$ فمتوثانیه به ترتیب برای پالس‌های با پهنای ۵۰ و ۷۵ فمتوثانیه در شکل ۲ (ب و ج) آورده شده است. رفتار تغییرات چگالی و نیز انتشار باریکه لیزری در این دو مورد نیز مشابه مورد ۲۵ فمتوثانیه می‌باشد با این تفاوت که با افزایش پهنای پالس لیزری و به عبارتی کاهش شدت پالس (به منظور ثابت ماندن انرژی پالس) دامنه افزایش چگالی الکترونی در حالت هدف جامد کاهش می‌یابد. این به این علت است که میزان یونیزاسیون بیش‌تر تحت تأثیر شدت لیزر است و نه انرژی آن. هر چه شدت پالس ورودی کم‌تر باشد نرخ یونیزاسیون کم‌تر می‌شود. و همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود در حالت پالس با پهنای ۷۵ فمتوثانیه به مقدار $50 n_c$ نسبت در این زمان کاهش می‌یابد. شایان ذکر است با گذشت زمان پیک چگالی در حالت هدف جامد نسبت به هدف پلاسمایی افزایش یافته و این موجب ایجاد میدان طولی قوی‌تری می‌شود که در ادامه به آن پرداخته شده است.

در قسمت بعد میدان الکتروستاتیکی طولی ایجاد شده درون هدف که در واقع مسئول شتابدهی پروتون‌ها می‌باشد، برای موارد شکل ۲ در شکل ۳ آورده شده است.

منحنی مشکی رنگ در شکل ۳ مشخص‌کننده مکان هدف می‌باشد (در این جا الومینیم جامد و یا به صورت پلاسمای ۹ بار یونیزه). به منظور بررسی شدت میدان غلافی ایجاد شده منحنی E_x برای پالس با پهنای ۲۵ فمتوثانیه در زمان ۹۰ فمتوثانیه، پالس با پهنای ۵۰ در زمان ۱۰۰ و برای پالس ۷۵ فمتوثانیه در زمان ۱۱۰ فمتوثانیه پس از شروع شبیه‌سازی رسم شده است. از شکل ۳ مشاهده می‌شود، دامنه میدان غلافی در حالت هدف جامد و پالس ۲۵ فمتوثانیه بیش‌تر از هدف پلاسمایی است. علت میدان قوی‌تر در حالت هدف جامد، در واقع دامنه بزرگ‌تر چگالی الکترونی در این حالت می‌باشد که مسئول ایجاد میدان شتابدهی است. و این اختلاف با بزرگ‌تر شدن پهنای پالس لیزری کم‌تر می‌شود. به گونه‌ای که در حالت پالس ۵۰ فمتوثانیه دامنه میدان غلافی برای هر دو حالت پلاسما و جامد روی هم افتاده است. که این امر می‌تواند به علت طولانی بودن پهنای پالس لیزر باشد که در نتیجه آن اثرات یونیزاسیون به حالت اشباع رسیده و رفتار هدف جامد به هدف پلاسمای ایده‌آل نزدیک می‌شود.



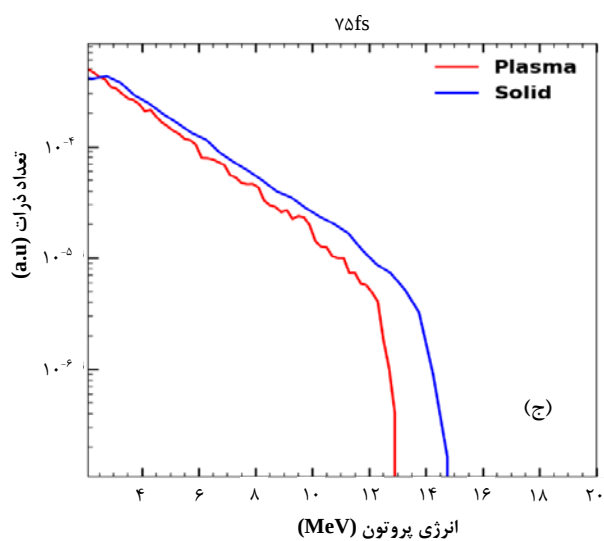
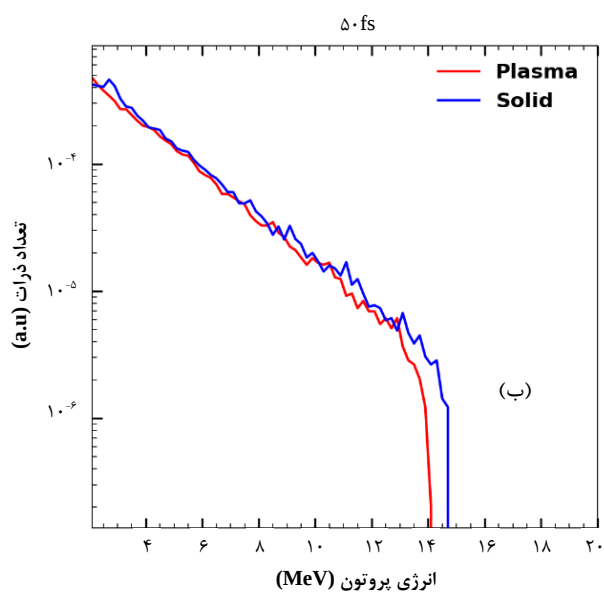
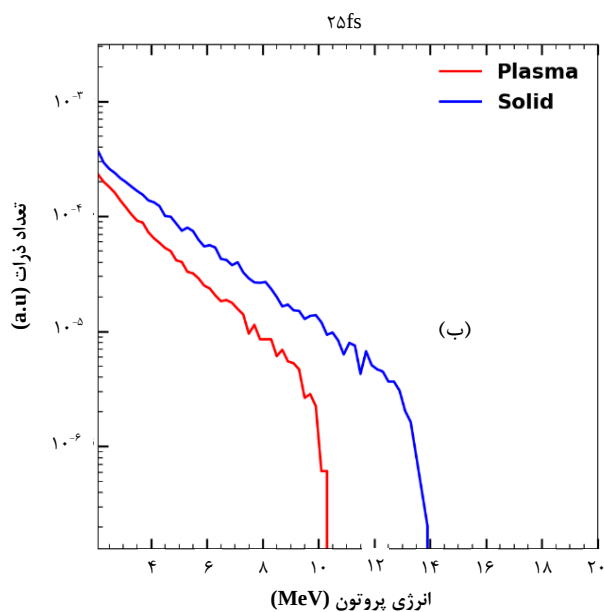


شکل ۴. تحول زمانی انرژی جنبشی الکترون‌ها در برهم‌کنش پالس (الف) ۲۵ فمتوثانیه، (ب) ۵۰ فمتوثانیه و (ج) ۷۵ فمتوثانیه با دو هدف پلاسمایی و جامد.

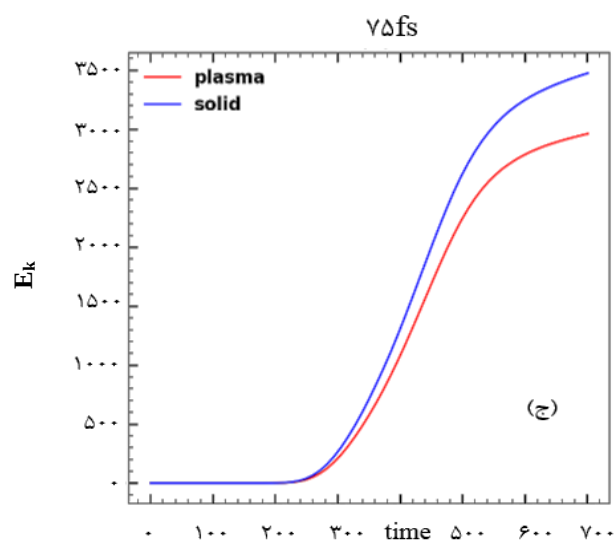
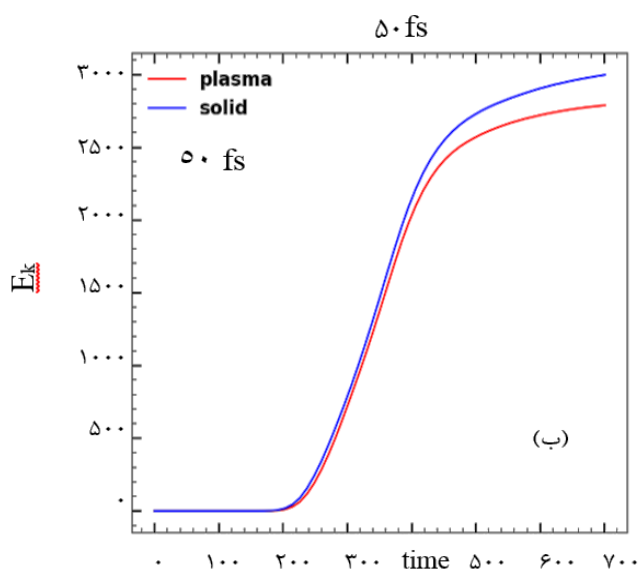
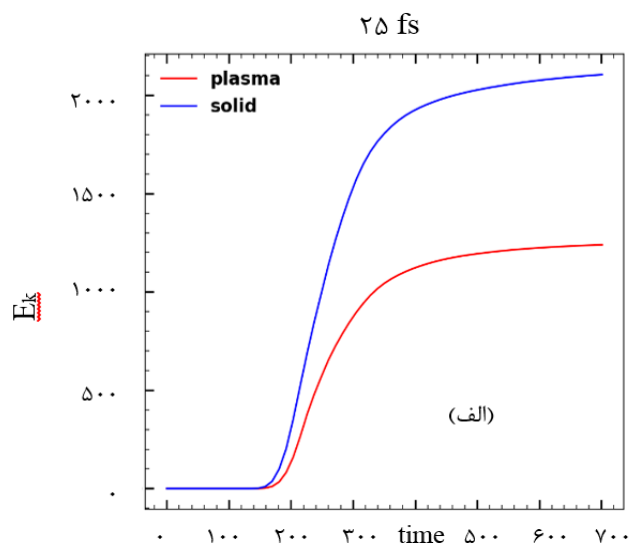
در قسمت بعد میزان جذب انرژی لیزری برای الکترون‌ها و نیز پروتون‌ها در شکل ۴ آورده شده است.

شکل ۴، تحول زمانی انرژی جنبشی الکترون‌ها و شکل ۵ برای پروتون‌ها در هر دو حالت هدف پلاسمایی و جامد برای هر سه پالس با پهنای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ فمتوثانیه را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۴، با گذشت زمان الکترون‌ها انرژی کسب کرده، به حالت اشباع رسیده و سپس انرژی آن‌ها کاهش می‌یابد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت با به کارگیری پالس باریک ۲۵ فمتوثانیه، مقدار انرژی جذب شده توسط الکترون‌ها در حالت هدف جامد بیش‌تر از هدف پلاسمایی بوده و این اختلاف با بزرگ شدن پهنای پالس کاهش می‌یابد. این رفتار در منحنی انرژی جنبشی پروتون‌ها نیز مشاهده می‌شود (شکل ۵). با توجه به نتایج به دست آمده در این قسمت به بررسی طیف انرژی پروتون‌ها می‌پردازیم. شکل ۶ تابع توزیع انرژی پروتونی در هر دو حالت هدف جامد و پلاسمایی با سه پهنای پالسی و در زمان ۳۰۰ فمتوثانیه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، انرژی بیشینه پروتونی در حالتی که هدف به صورت جامد به کار گرفته شده و یونیزاسیون در حین برهم‌کنش پالس اتفاق می‌افتد برای مورد پالس با پهنای ۲۵ فمتوثانیه، به ۱۴ مگاالکترون‌ولت می‌رسد که این مقدار حدود ۲۷ درصد از مقدار متناظر آن در هدف پلاسمایی (۱۱ مگاالکترون‌ولت) بیش‌تر است. از آن‌جا که چگالی الکترونی و تابع توزیع آن‌ها به عنوان نقش میانجی در گرفتن انرژی از لیزر و سپس شتابدهی پروتون‌ها دارند، لذا علت این امر را بایستی در رفتار چگالی الکترونی جستجو کرد. مطابق با نتایج حاصل شده در شکل‌های ۱ تا ۵، پالس لیزری در حالت هدف جامد بیش‌تر نفوذ کرده و به همین ترتیب الکترون‌ها انرژی بیش‌تری در این حالت جذب کرده و در نتیجه شدت میدان غلافی که مسئول شتابدهی پروتون‌هاست. به علاوه با بزرگ شدن پهنای پالس لیزر، اختلاف میان دو طیف انرژی کاهش می‌یابد.





شکل ۶. طیف انرژی پروتون در برهم‌کنش پالس (الف) ۲۵ فمتوثانیه، (ب) ۵۰ فمتوثانیه و (ج) ۷۵ فمتوثانیه با دو هدف پلاسمایی و جامد.



شکل ۵. تحول زمانی انرژی جنبشی پروتون‌ها در برهم‌کنش پالس (الف) ۲۵ فمتوثانیه، (ب) ۵۰ فمتوثانیه و (ج) ۷۵ فمتوثانیه با دو هدف پلاسمایی و جامد.



۴. نتیجه گیری

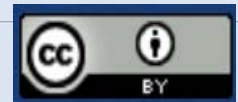
در این پژوهش با در نظر گرفتن سه پالس با پهنای زمانی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ فمتوثانیه، نقش عامل یونیزاسیون میدانی در عملکرد شتابدهی پروتون در رهیافت TNSA مطالعه و شبیه سازی شده است. شبیه سازی های انجام شده با کد نسبیستی و الکترومغناطیسی اسمایل نشان می دهد با فعال کردن عامل یونش، پروفایل چگالی الکترونی در حالت فویل جامد از حالت پله ای به حالت تغییرات با شیب ملایم تغییر کرده و در نتیجه میدان نسبت به حالتی که پروفایل پله ای (در حالت کاملاً یونیزه) بیش تر نفوذ می کند. به همین ترتیب با نفوذ بیش تر میدان لیزری الکترون ها انرژی بیش تری کسب کرده و در نتیجه میدان شتابدهی یونی قوی تر و در نهایت انرژی قطع پروتون ها در این حالت بیش تر از حالتی است که هدف به صورت کاملاً پلاسما در نظر گرفته شود. مطابق با نتایج به دست آمده با افزایش پهنای پالس لیزری، اختلاف ایجاد شده بین انرژی قطع پروتون ها در دو حالت با در نظر گرفتن یونش و یک پلاسمای ایده آل، کاهش یافته طوری که طیف انرژی پروتون برای پالس ۷۵ فمتوثانیه تقریباً روی هم می افتد. بنابراین در نظر گرفتن شرایط پلاسمای ایده آل (بدون عامل یونش) در انجام شبیه سازی هایی با پالس لیزر بلند معقول به نظر میرسد اما در پالس های کوتاه بایستی اثر یونیزاسیون لحاظ گردد.

مراجع

5. T. Esirkepov, et al, *Highly efficient relativistic-ion generation in the laser-piston regime*, *Physical Review Letters*, **92(17)**, 175003 (2004).
6. L.O. Silva, et al., *Proton shock acceleration in laser-plasma interactions*, *Physical Review Letters*, **92(1)**, 015002 (2004).
7. O. Jäckel, et al, *All-optical measurement of the hot electron sheath driving laser ion acceleration from thin foils*, *New Journal of Physics*, **12(10)**, 103027 (2010).
8. D. Neely, et al, *Enhanced proton beams from ultrathin targets driven by high contrast laser pulses*, *Applied Physics Letters*, **89(2)**, 021502 (2006).
9. D. Margarone, et al., *Laser-driven proton acceleration enhancement by nanostructured foils*, *Physical Review Letters*, **109(23)**, 234801 (2012).
10. F. Dollar, et al., *High contrast ion acceleration at intensities exceeding $10^{21} \text{ W cm}^{-2}$* , *Physics of Plasmas*, **20(5)**, 056703 (2013).
11. T. Bartal, et al, *Focusing of short-pulse high-intensity laser-accelerated proton beams*, *Nature Physics*, **8(2)**, 139 (2012).
12. A. Sgattoni, et al, *Laser ion acceleration using a solid target coupled with a low-density layer*, *Physical Review E*, **85(3)**, 036405 (2012).
13. E. Khalilzadeh, et al, *The effect of the laser pulse shape on the wakefield generation in field-ionized plasma*, *Chinese Journal of Physics*, **71**, 212-23 (2021).
14. A.J. Kemp, R.E. Pfund, J. Meyer-ter-Vehn, *Modeling ultrafast laser-driven ionization dynamics with Monte Carlo collisional particle-in-cell simulations*, *Physics of Plasmas*, **11(12)**, 5648-57 (2004).
15. L. Keldysh, *Ionization in the field of a strong electromagnetic wave*, *Sov Phys JETP*, **20(5)**, 1307-14 (1965).
16. H.R. Reiss, *Effect of an intense electromagnetic field on a weakly bound system*, *Physical Review A*, **22(5)**, 1786 (1980).
17. M.V. Ammosov, *Tunnel ionization of complex atoms and of atomic ions in an alternating electromagnetic field*, *Sov Phys JETP*, **64**, 1191 (1987).
18. J. Derouillat, et al, *Smilei: A collaborative, open-source, multi-purpose particle-in-cell code for plasma simulation*, *Computer Physics Communications*, **222**, 351-73 (2018).
1. M. Roth, et al, *Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams*, *Physical Review Letters*, **86(3)**, 436 (2001).
2. D. Higginson, et al., *Production of neutrons up to 18MeV in high-intensity, short-pulse laser matter interactions*, *Physics of Plasmas*, **18(10)**, 100703 (2011).
3. S. Bulanov, et al, *Oncological hadrontherapy with laser ion accelerators*, *Physics Letters A*, **299(2-3)**, 240-7 (2002).
4. S. Wilks, et al., *Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions*, *Physics of Plasmas*, **8(2)**, 542-9 (2001).

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

سمیه رضائی، محمدجعفر جعفری، الناز یزدانی (۱۴۰۱)، نقش یونیزاسیون میدانی در ساز و کار شتابدهی پروتون از طریق برهم کنش پالس شدت بالا در پهنای متفاوت، ۹۹-۹۱، ۱۰۲

DOI: 10.24200/nst.2022.1471

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1500.html

