مطالعه و بررسی شتابدهی پروتون‌ها در اندرکنش لیزرهای پرتوان با هدف‌های فومی

رضا گودرزی^{۱*}، الناز یزدانی^۲

۱. پژوهشکده‌ی فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

۲. گروه فیزیک، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی: ۱۴۱۱۵-۱۱۱، تهران - ایران

*Email: rego.physics@gmail.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۳/۲۸

چکیده

شتابدهی ذرات باردار پر انرژی از مهم‌ترین کاربردهای اندرکنش لیزرهای پرتوان با پلاسما می‌باشد. با استفاده از هدف با چگالی‌های نزدیک به چگالی بحرانی، به دلیل همبستگی بیش‌تر لیزر با پلاسما، انرژی منتقل شده از لیزر به پلاسما افزایش می‌یابد. امروزه به دلیل ساخت هدف‌های با ساختار فومی با چگالی نزدیک به چگالی بحرانی، امکان استفاده از این نوع هدف‌های شتابدهی جهت مطالعه هرچه بیش‌تر فرایند شتابدهی ذرات در چگالی‌های نزدیک به چگالی بحرانی فراهم شده است. در این پژوهش با استفاده از روش شبیه‌سازی ذره در جعبه، شکل واقعی ساختار اهداف فومی به منظور مطالعه دقیق‌تر اندرکنش لیزر با هدف مورد بررسی قرار گرفته است و حالت بهینه برای فوم متخلخل از نظر ابعاد و فواصل بین حفره‌ها بر مبنای بیشینه‌ی انرژی پروتون‌های تولید شده پس از اتمام تپ لیزر، پیشنهاد شده است. بر اساس این مطالعات، برای فوم با چگالی $3/6$ برابر چگالی بحرانی و ضخامت $16 \mu\text{m}$ ، وجود حفره‌هایی به قطر $0.5 \mu\text{m}$ و فواصل بین مراکز حفره‌ای $1.5 \mu\text{m}$ منجر به تولید پروتون‌هایی با بیشینه انرژی 40 MeV می‌شود. در صورتی که حفره‌ها از حالت بهینه خارج شوند، کاهش انرژی بیشینه ۲۰ درصدی برای پروتون‌ها نسبت به فوم بدون تخلخل مشاهده خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: لیزر، پلاسما، چگالی بحرانی، فوم، پروتون

Studying and surveying proton acceleration in high power laser interaction with foam targets

R. Goodarzi^{*1}, E. Yazdani²

1. Photonics and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 1339-14155, Tehran - Iran

2. Department of Physics, Tarbiat Modares University, P.O.Box: 14115-111, Tehran - Iran

Research Article

Received 9.4.2019, Accepted 18.6.2019

Abstract

Acceleration of high energy charged particles is one of the most important applications of high-power lasers interaction with plasma. Using targets with densities close to critical densities, because of better laser-plasma coupling, the transferred energy from the laser to plasma will be increased. Today, due to the construction of foam-structured targets, with a density close to critical density, it is possible to use such targets in order to study more about the acceleration process of particles with densities close to the critical density. In this paper, using particle simulation in a cell, a realistic form of foam structure of laser interaction with targets has been studied in more detail. The optimal state for porous foam in terms of dimensions and distances between holes is proposed based on the maximum energy of the protons produced after the laser pulse is completed and it is found out that for a foam with a density of 3.6 critical density and 16-micrometer length, the existence of holes with 0.5-micrometer radius and 1.5-micrometers for the distance between the centers can produce protons with 40 MeV energy but if the holes are not in proper conditions, protons' maximum energy will be decreased about 20 percent relative to the condition without porous foam.

Keywords: Laser, Plasma, Near-critical density, Foam, Proton

۱. مقدمه

با پیشرفت‌های سریعی که در فن‌آوری ساخت لیزرها بعد از اختراع روش تقویت تپ پهن‌شده اتفاق افتاد، امروزه امکان دسترسی به لیزرهای با توان تراوات تا پتاوات با پهنای زمانی پیکوثانیه تا فمتوثانیه به‌راحتی در آزمایشگاه فراهم شده است. از مهم‌ترین کاربردهای چنین لیزرهایی می‌توان به شتابدهی ذرات باردار اشاره نمود. در مورد شتابدهی الکترون با لیزر، مطالعات تجربی و نظری بسیار زیادی صورت گرفته است و انرژی‌هایی در محدوده ترا الکترون‌ولت نیز گزارش شده است. از طرفی تولید پروتون‌ها و یون‌های پر انرژی به‌علت کاربردهای بالقوه آن‌ها در مطالعاتی نظیر درمان سرطان، افروزش سریع در محصورسازی اینرسی^۱ و مواردی از این دست از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار می‌باشند [۱].

در شتاب‌دهنده‌های لیزری، یون‌های شتاب داده شده با تابش تپ لیزر فوق‌کوتاه و فوق‌شدید روی هدف فوق‌باریک پلاسمایی تولید می‌شوند. سازوکارهای مختلفی برای توجیه فیزیک فرایند شتابدهی ارایه شده است که معروف‌ترین آن‌ها، شتابدهی غلاف عمود بر هدف^۲ [۲]، شتابدهی فشار تابشی^۳ [۳] و شتابدهی موج شوک^۴ [۴] می‌باشند که به فراخور شرایط فیزیکی، یک یا تعدادی از آن‌ها در فرایند شتابدهی دخیل خواهند بود. با توجه به شدت لیزرهای کنونی، امکان شتابدهی مستقیم یون‌ها وجود ندارد و این الکترون‌های هدف هستند که بخش قابل‌ملاحظه‌ای از انرژی لیزر فرودی را جذب می‌کنند. یون‌ها در اثر میدان‌های شبه‌الکترواستاتیک^۵ حاصل از جدایی بار ایجاد شده، شتاب می‌گیرند. در صورتی که میدان شبه‌الکترواستاتیک در پشت هدف شکل بگیرد و با یونیزاسیون اتم‌های موسوم به آلودگی که در پشت هدف قرار دارند، باعث شتابدهی یون‌ها شود، سازوکار مربوطه را شتابدهی غلاف عمود بر هدف گویند [۵]. طی مطالعات تجربی و نظری بسیاری که در ۱۶ سال اخیر انجام شده است، مشخصه‌های لیزر از قبیل پهنای تپ و چیرپ‌شوندگی^۶ آن در این مدل بررسی شده‌اند [۶]. در کنار مشخصات لیزر، اثر مشخصه‌های

هدف پلاسمایی از قبیل ضخامت، جنس هدف، اشکال مختلف هندسی و چگالی پلازما روی طیف و میزان انرژی پروتون‌ها مطالعه شده است [۱].

یکی از موفق‌ترین طرح‌ها در زمینه‌ی ساخت هدف، تشکیل یک لایه‌ی با چگالی نزدیک چگالی بحرانی روی یک ورقه میکرومتری فلزی است که نتایج رضایت‌بخشی در شبیه‌سازی‌ها از خود نشان داده است [۷]. بر اساس شبیه‌سازی مسئله ذره در جعبه^۷، پلاسمای با چگالی بحرانی موجب افزایش جفت‌شدگی لیزر با هدف می‌شود و در نتیجه انرژی منتقل شده به هدف توسط لیزر افزایش یافته و متعاقباً انرژی یون‌های شتاب‌داده شده نیز افزایش می‌یابد. به‌طور کلی بهره تبدیل انرژی لیزر به انرژی یون‌های شتاب‌داده شده، افزایش می‌یابد [۸]. به‌دلیل آن‌که تپ لیزر می‌تواند در ناحیه نزدیک به چگالی بحرانی منتشر شود، امکان جذب در کل حجم هدف فراهم شده و چندین سازوکار مختلف در افزایش جذب انرژی لیزر در پلازما دخیل می‌شوند. کانال‌زنی تپ و شتابدهی مستقیم الکترون‌ها در دیواره‌های کانال [۹] موجب تمرکز بیش‌تر تپ لیزر و افزایش شدت آن می‌شوند [۱۰]. هم‌چنین تغییر شکل تپ لیزر [۱۱] از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار می‌باشند.

با در نظر گرفتن پلاسمایی کاملاً یونیزه و از جنس کربن و با طول موج لیزری ۸۰۰ nm، چگالی اولیه‌ی هدف بایستی در حدود $5/7 \text{ mg.cm}^{-3}$ باشد که این مقدار، ۴۰۰ برابر کوچک‌تر از چگالی گرافیت است. دست‌یابی به چنین چگالی تنها با استفاده از مواد نانوساختار متخلخل امکان‌پذیر خواهد بود و فوم^۸ یکی از این مواد است [۸]. آزمایش‌های انجام گرفته با استفاده از فوم، نتایج رضایت‌بخشی را از نظر انرژی پروتون‌های شتاب داده شده چه در محدوده لیزرهای با شدت متوسط [۱۲] $10^{18} \text{ W.cm}^{-2}$ و در محدوده کاملاً نسبیتی [۸] $10^{20} \text{ W.cm}^{-2}$ از خود نشان داده است.

در این پژوهش با ارایه شیوه جدیدی از طراحی هدف در شبیه‌سازی، تلاش شده است تا شبیه‌سازی انجام شده به واقعیت نزدیک‌تر شده تا بتوان درک بهتری نسبت به فرایند شتابدهی به دست آورد. در ابتدا شرایط بهینه یک هدف سه

1. Inertial Confinement Fusion
2. Target Normal Sheath Acceleration
3. Radiation Pressure Acceleration
4. Shock Wave Acceleration
5. Quasi-Electrostatic Fields
6. Chirping

7. Particle in Cell Simulation
8. Foam

با ۹ شبه‌ذره در هر سلول، ورقه فلزی از جنس آلومینیم ۹ بار یونیزه به ضخامت $0.5 \mu\text{m}$ و چگالی ۴۵ برابر چگالی بحرانی با ۸۱ شبه‌ذره در هر سلول و یک لایه پروتونی به ضخامت $0.05 \mu\text{m}$ و چگالی ۹ برابر چگالی بحرانی که با ۹ ذره در هر سلول شبیه‌سازی شده، تشکیل شده است. شکل ۱ طرح‌واره پلاسمای سه لایه را نشان می‌دهد.

مشخصات لیزر مورد استفاده در شبیه‌سازی عبارت است از لیزر فیبر فیلر قفل‌شده مدی^۱ آلاییده با یتربیم^۲ (Yb) با طول‌موج $1 \mu\text{m}$ و شدت $I = 2 \times 10^2 \text{ W cm}^{-2}$ که روی سطح جلویی هدف متمرکز شده است. مدت زمان تپ‌ها ۸۰ fs در نظر گرفته شده و با قطبش خطی در راستای y به‌طور عمود بر سطح پلازما تابیده می‌شوند. شکل ۲ موقعیت لیزر را در چهار زمان مختلف نشان می‌دهد.

شکل ۱. پلاسمای سه لایه به ترتیب از چپ به راست، فوم، ورقه آلومینیمی و پروتون.

شکل ۲. انتشار لیزر به ترتیب از بالا چپ: قبل از ورود لیزر به درون فوم، بالا راست: پس از برخورد به فوم، پایین چپ: انتشار درون فوم و پایین راست: پس از برخورد به ورقه را نشان می‌دهند.

لایه متشکل از یک لایه فوم که روی یک ورقه فلزی قرار گرفته و در انتها یک لایه نازک روی آن قرار گرفته است، با شبیه‌سازی ذره در جعبه مشخص می‌شود و سپس با تغییر فوم، چنان‌که به فوم موجود در آزمایشگاه شبیه باشد، می‌توان به نتایج درستی دست یافت و علاوه بر آن، مشخصات اولیه‌ی فوم که منجر به بهینه‌سازی شتاب‌دهی می‌شود نیز تعیین می‌گردد. این پژوهش می‌تواند کار را برای محققان آزمایشگاهی جهت ساخت هدف بهینه، دقیق‌تر و هموارتر کند.

۲. روش تحقیق

چگالی بحرانی پلازما در واقع چگالی است که لیزر نمی‌تواند در آن نفوذ کند و با تغییر طول موج لیزر فرودی، تغییر می‌کند. رابطه آن با فرکانس تپ لیزر فرودی به صورت

$$n_c = \frac{\epsilon_0 m_e \omega^2}{e^2}$$

و میزان نفوذپذیری آن تغییر می‌کند. در رژیم‌های غیرنسبیتی، لیزر نمی‌تواند درون پلاسمایی با چگالی برابر یا بزرگ‌تر از چگالی بحرانی نفوذ کرده و بازتاب می‌یابد. اما مادامی که شدت لیزر افزایش یابد، اثرات نسبیتی نیز مهم می‌شوند و در چنین حالتی بایستی از جرم نسبیتی الکترون، که عبارت است از $m'_e = \gamma m_e = (1 + a_0^2)^{1/2} m_e$ در رابطه‌ی چگالی بحرانی استفاده شود. در این رابطه، a_0 دامنه‌ی بدون بعد لیزر است و رابطه آن با شدت لیزر به‌صورت $I \lambda^2 = 1.37 \times 10^{18} a_0^2 (\text{W cm}^{-2} \mu\text{m}^2)$ می‌باشد [۱].

شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد ذره در جعبه MANDOR

[۱۳]، در دو بعد x-y انجام شده است. کل فضای شبیه‌سازی به ابعاد $130 \mu\text{m}$ در جهت x و $40 \mu\text{m}$ در جهت y در نظر گرفته شده و در هر دو راستا، هر میکرومتر به ۱۰ قسمت فضایی تقسیم شده است. طول گام‌های زمانی، $\tau = 0.66 \text{ fs}$ می‌باشند که با توجه به ثبت نتایج در هر ۵۰ گام، زمان یک دوره، $T = 3/3 \text{ fs}$ خواهد بود. مرزهای مربوط به میدان و ذرات، جاذب بوده و پلازما در راستای x از $30 \mu\text{m}$ شروع شده و تا $38.6 \mu\text{m}$ امتداد می‌یابد. در راستای y، مرکز پلازما روی $y = 20 \mu\text{m}$ قرار گرفته است و عرض آن $21 \mu\text{m}$ می‌باشد. پلازما از سه لایه‌ی به ترتیب از سمت ورود لیزر، فوم

1. Mode-Locked Fiber Laser
2. Ytterbium-Doped

۳. بحث و نتایج

برای تعیین مشخصه‌های بهینه فوم، ابتدا چگالی فوم را ثابت و به مقدار ۰/۹ چگالی بحرانی در نظر گرفته و سپس با تغییر ضخامت فوم به ترتیب ۰ (معادل با عدم وجود فوم)، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱/۰، ۱/۲، ۱/۴، ۱/۶، ۱/۸، ۲/۰، ۲/۲، ۲/۴، ۲/۶ و ۳/۰ μm در نظر گرفته شده و با ثابت ماندن دیگر پارامترها (مشخصات لیزر)، اثر ضخامت فوم روی بیشینه انرژی پروتون‌ها بررسی شد. شکل ۳ انتشار لیزر در ضخامت‌های ۰، ۰/۴، ۰/۶، ۱/۰، ۱/۶، ۲/۰، ۲/۴ و ۲/۸ میکرومتری را در زمان $t = 12T$ نشان می‌دهد.

یکی از پدیده‌های غیرخطی مهم در اندرکنش تپ لیزر پر توان با پلاسما، اثر خود کانونی شدن تپ لیزر است که در نتیجه انتشار آن درون پلاسما اتفاق می‌افتد [۱۴]. دو عامل اصلی در این پدیده دخیل می‌باشند: (۱) با توجه به شکل تپ لیزر در مد طبیعی خود، مرکز تپ دارای شدت بیش‌تری نسبت به کناره‌های آن است و به دلیل نوع توزیع تپ (گوسی، سوپرگوسی و ...) با فاصله گرفتن از مرکز باریکه لیزر، شدت افت می‌کند. این گرادین شدت عرضی، با انتشار تپ لیزر درون پلاسما، باعث به وجود آمدن نیروی پاندرماتیوی^۱ می‌شود که سعی دارد الکترون‌ها را از مرکز لیزر به لبه‌ها منتقل کند که در نتیجه آن، چگالی پلاسما در جهت عرضی و با فاصله گرفتن از مرکز، کاهش می‌یابد [۱۵]. (۲) از سوی دیگر همان‌طور که گفته شد، در شدت‌های نسبیتی $a_0 \gg 1$ بایستی اثرات نسبیتی شدن حرکت الکترون‌ها در نظر گرفته شود. با توجه به این‌که شدت لیزر در جهت عرضی، کاهش می‌یابد، فاکتور نسبیتی الکترون‌ها نیز وابستگی عرضی پیدا می‌کند. در نتیجه، ضریب شکست پلاسما به صورت رابطه ۱ خواهد بود.

$$\eta(r) = \sqrt{1 - \frac{n_e(r)e^2}{(1 + a_0^2(r))^{1/2} m_e \epsilon_0 \omega_0^2}} \quad (1)$$

در این رابطه m_e جرم الکترون، e بار الکترون، ω_0 فرکانس لیزر، ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ، n_e چگالی الکترونی و a_0 دامنه‌ی بدون بعد لیزر می‌باشند. با توجه به این‌که چگالی در مرکز کم‌ترین مقدار را داشته و شدت در مرکز به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد، لذا ضریب شکست در مرکز بیش‌ترین مقدار را دارد و با فاصله گرفتن از مرکز کاهش می‌یابد؛ در نتیجه پلاسما همانند یک عدسی مثبت عمل می‌کند و با انتشار تپ لیزر درون آن، تپ لیزر کانونی می‌شود. از آن جهت که عامل اصلی این پدیده خود تپ لیزر است، به آن خودکانونی شدن تپ لیزر گفته می‌شود [۱۶]. همان‌طور که

از شکل ۳ مشخص است، پدیده خودکانونی شدن تپ لیزر درون پلاسما، در حضور فوم با ضخامت $16 \mu\text{m}$ ، نسبت به سایر موارد بهتر انجام شده و در نتیجه، تپ لیزر با شدت بیش‌تری به ورقه تابیده شده که موجب افزایش انرژی پروتون‌های شتاب داده شده می‌شود.

الکترون‌های داغ نقش اصلی را در فرایند شتابدهی غلاف عمود بر هدف ایفا می‌کنند. از این‌رو هر اثری که بتواند انرژی الکترون‌های داغ را افزایش دهد، باعث بهبود فرایند شتابدهی و افزایش انرژی یون‌های شتاب داده شده می‌شود [۱]. با کانونی شدن لیزر درون پلاسما، شدت لیزر افزایش می‌یابد و در نتیجه نیروی پاندرماتیو قوی‌تری به الکترون‌ها وارد شده و از این طریق انرژی الکترون‌های داغ تولید شده، افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان انتظار داشت پدیده خودکانونی شدن تپ لیزر، موجب افزایش بیشینه انرژی پروتون‌های شتاب داده شده شود. در شکل ۴ اثر تغییرات ضخامت فوم روی بیشینه انرژی پروتون‌ها در زمان $t = 24T$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ضخامتی که بهترین کانونی شدن تپ لیزر اتفاق می‌افتد، یعنی فوم ۱۶ میکرومتری، بیشینه انرژی پروتون‌ها نیز در بالاترین مقدار قرار دارد.

در گام بعدی، اثر چگالی فوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. چگالی فوم با مقادیر ۰/۱، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲، ۱/۵، ۱/۸، ۲/۱، ۲/۴، ۳/۶ برابر چگالی بحرانی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که چگالی با مقدار درست زیر چگالی بحرانی، منجر به شتابدهی بهتر پروتون‌ها می‌شود. شکل ۵ بیشینه انرژی پروتون‌ها به ازای چگالی‌های مختلف فوم را در زمان $t = 24T$ نشان می‌دهد و همان‌طور که مشاهده می‌شود، در چگالی ۰/۹ برابر چگالی بحرانی، انرژی پروتون‌ها بیشینه می‌شود. در این مورد نیز عامل بهینه‌شدن شبیه‌سازی در این چگالی، خودکانونی شدن مؤثر تپ لیزر درون پلاسما می‌باشد.

تنها مشخصه‌های پلاسما نیستند که در بهینه‌سازی شتابدهی می‌توانند تأثیرگذار باشند، بلکه پارامترهای لیزر نیز در این امر دخیل هستند که قطبش لیزر فرودی به عنوان یک عامل مهم در تولید الکترون‌های داغ مورد بررسی قرار گرفت. سه نوع قطبش، قطبش‌های خطی s و p و قطبش دایروی c در نظر گرفته شدند و نتیجه‌ی آن به صورت طیف انرژی پروتون‌ها در هر قطبش در زمان $t = 24T$ در شکل ۶ نشان داده شده است. علت آن‌که بیشینه‌ی انرژی پروتون‌ها در قطبش خطی نوع P نسبت به سایر حالت‌ها بیش‌تر است، فرایندهای گرمایشی هستند که با به کارگیری این قطبش، فعال شده و گرمایش $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ مهم‌ترین آن‌ها می‌باشد که J چگالی جریان الکتریکی و B میدان مغناطیسی می‌باشند [۱۷].

1. Ponderomotive Force

شکل ۳. انتشار لیزر درون فوم‌های با ضخامت‌های به ترتیب از بالا چپ به راست: ۰، ۴، ۶، ۱۰ و پایین از چپ به راست: ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۲۸ درست پس از گذشت نیمی از مدت زمان تپ لیزر درون پلاسما.

شکل ۵. اثر چگالی فوم روی بیشینه انرژی پروتون‌ها.

شکل ۴. اثر ضخامت فوم روی بیشینه انرژی پروتون‌ها در زمانی که تپ لیزر به اتمام می‌رسد.

شکل ۶. طیف انرژی پروتون‌ها برای سه قطبش به ترتیب (الف)، (ب) و (ج)، دایروی، خطی نوع s و خطی نوع p.

در ابتدا فوم یکنواخت را با شرایط بهینه در نظر گرفته و حفره‌هایی در ابعاد مختلف و با فواصل مختلف شبیه‌سازی شد که عبارتند از: شعاع حفره $0.5 \mu\text{m}$ و فاصله بین دو مرکز $1.5 \mu\text{m}$ ، شعاع حفره $0.5 \mu\text{m}$ و فاصله بین دو مرکز $2 \mu\text{m}$ ، شعاع حفره $0.25 \mu\text{m}$ و فاصله بین دو مرکز $1 \mu\text{m}$ ، شعاع حفره $1.5 \mu\text{m}$ و فاصله بین دو مرکز $4 \mu\text{m}$ ، شعاع حفره $1 \mu\text{m}$ و فاصله بین دو مرکز $3 \mu\text{m}$ ، حفره‌هایی با شعاع‌ها و فواصل بین دو مرکز متفاوت که یک‌بار از بزرگ به کوچک (S to L) مرتب شده باشند (از این پس واحد عددهای مربوط به شعاع و فواصل، میکرومتر می‌باشد). شکل ۸ هدف‌های انتخاب شده را در مقایسه با فوم یکنواخت نشان می‌دهد.

شکل ۷. نمونه‌ی فوم موجود در آزمایشگاه که با دو روش (الف) یک مرحله‌ای و (ب) اسپری تهیه شده‌اند که باعث تغییر شعاع و فواصل خلل و فرج موجود در فوم شده است [۶].

در برخورد یک لیزر با شدت بالا با یک پلاسمای با تغییرات چگالی تیز، نیروی پاندرماتیو نسبتی میدان الکترواستاتیکی نوسانی را می‌راند. نیروی $J \times B$ از نفوذ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به اندازه‌ی یک عمق پوسته در پلاسمای چگال ناشی می‌شود. قسمت مربوط به نیروی مغناطیسی در معادله نیروی لورنتس، مؤلفه‌ای در راستای عمود بر هدف دارد که اگر لیزر، به‌طور عمود به هدف تابیده شود، این مؤلفه بیشینه می‌شود. این نیرو دارای یک بخش نوسانی و یک بخش ثابت است که بخش نوسانی با فرکانسی معادل دو برابر فرکانس لیزر نوسان می‌کند. اگر از قطبش دایروی استفاده شود، بخش نوسانی حذف می‌شود؛ اما اگر از قطبش خطی استفاده شود، بخش نوسانی این نیرو باعث نوسان الکترون‌ها شده و در اثر رفت و برگشت الکترون، پلازما گرم‌تر می‌شود.

تاکنون نتایج حاصله بر مبنای مدل‌های قدیمی فوم یا پلاسمای با چگالی بحرانی بوده و نتایج آن مشابه چیزی است که در کارهای دیگران نیز قابل مشاهده است. اما با توجه به آن که شکل واقعی فوم به‌صورت یک پلاسمای یکنواخت نیست، می‌توان گفت دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده به این روش نیز قابل تردید است. نمونه‌ای از فوم واقعی آماده شده در آزمایشگاه در شکل ۷ نشان داده شده است [۶]. مبنای ادامه کار همین شکل قرار گرفته است و تلاش شده است تا با در نظر گرفتن فوم به‌صورت یک پلاسمای با چگالی بحرانی که دارای حفره‌هایی نیز می‌باشد، نتایج شبیه‌سازی را به واقعیت نزدیک نمود.

شکل ۸. مقایسه فوم یکنواخت با فوم‌های متخلخل، عدد اول نشان‌دهنده شعاع و عدد دوم فاصله‌ی بین دو مرکز است که بر حسب میکرومتر بیان می‌شوند. بالا از چپ به راست: ۱- $0.25 \mu\text{m}$ ، ۲- $0.5 \mu\text{m}$ ، ۳- $1.5 \mu\text{m}$ و ۴- $4 \mu\text{m}$ ، پایین از چپ به راست: S to L، L to S، uniform و پایین از چپ به راست: ۱- $0.25 \mu\text{m}$ ، ۲- $0.5 \mu\text{m}$ ، ۳- $1.5 \mu\text{m}$ و ۴- $4 \mu\text{m}$.

متفاوت، سعی می‌شود تا بهترین فوم متخلخل با چگالی بیش از چگالی بحرانی، مشخص گردد.

در شکل ۱۱ فوم‌های متخلخل با چگالی $3/6$ چگالی بحرانی و حفره‌هایی در ابعاد و فواصل مختلف، در کنار فوم یکنواخت با چگالی $0/9$ چگالی بحرانی نشان داده شده است. فوم‌های متخلخل به ترتیب عبارتند از $0/5-1/5$ ، $0/5-2$ ، $0/5-1/5$ ، $0/25-1/5$ ، $1/5-4$ ، $1-3$ ، بزرگ به کوچک و کوچک به بزرگ، که در آن عدد اول نشان‌دهنده شعاع حفره‌ها و عدد دوم نشان‌دهنده فاصله بین دو مرکز حفره است.

در شکل ۱۲ انتشار تپ لیزر درون هر یک از اهداف گفته شده، نشان داده شده است و همان‌طور که ملاحظه می‌شود، حفره‌های متخلخل $0/5-1/5$ ، $0/5-2$ ، بهترین کانونی‌کنندگی را انجام داده‌اند.

برتری فوم متخلخل $0/5-1/5$ نسبت به فوم متخلخل $0/5-2$ ، انتشار سریع‌تر تپ لیزر درون هدف است. دلیل این امر کم‌تر بودن چگالی کل فوم متخلخل $0/5-1/5$ نسبت به فوم متخلخل $0/5-2$ است؛ زیرا فواصل بین حفره‌ها کم‌تر بوده و تعداد حفره‌ی بیش‌تری را درون خود جای داده است. با کاهش چگالی، ضریب شکست نیز کاهش یافته و در نتیجه سرعت فاز موج افزایش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود در این حالت انرژی بیشینه‌ی پروتون‌ها نیز در مقایسه با سایر فوم‌های متخلخل، بیش‌تر باشد. نتایج شکل ۱۳، که در آن طیف انرژی هدف‌های ذکر شده در زمان $t=24\text{ T}$ رسم شده است، مؤید این موضوع می‌باشند.

با توجه به آن‌که چگونگی انتشار میدان در هر کدام از این فوم‌های متخلخل، نقش اساسی در فرایند شتاب‌دهی ایفا می‌کند، از این‌رو در ابتدا انتشار میدان در هدف‌های مذکور در مقایسه با فوم یکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۹ چگونگی انتشار لیزر در هر یک از هدف‌ها در زمان $t=12\text{ T}$ نشان داده شده است.

در میان فوم‌های متخلخل، حالت $0/25-1$ ، که عدد اول از چپ شعاع حفره و عدد دوم فاصله بین دو مرکز می‌باشد، بهترین کانونی‌کنندگی تپ لیزر را در میان دیگر فوم‌های متخلخل از خود نشان داده است. از این‌رو انتظار می‌رود که انرژی بیشینه‌ی پروتون‌ها نیز در این مورد، بیش از سایر موارد باشد. شکل ۱۰ نمودار ستونی انرژی را برای فوم‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که جواب با فرضیه هم‌خوانی دارد و کانونی شدن بهتر منجر به افزایش بیشینه انرژی شده است.

بنابراین وجود تخلخل در فوم می‌تواند حتی به‌عنوان یک عامل مثبت نیز در نظر گرفته شود چرا که کانونی شدن به‌طور مؤثری اتفاق افتاده است. از سوی دیگر، ساخت فومی یکنواخت با چگالی $0/9$ چگالی بحرانی، بسیار پیچیده بوده و شاید بتوان گفت با فناوری امروزی غیر ممکن باشد لذا برای آن‌که امکان ساخت هدف‌های موردنیاز در آزمایشگاه عملی شود، لازم است در چگالی‌های بیش از چگالی بحرانی نیز، شرایط به گونه‌ای مهیا شود که نتایج مطلوبی حاصل شود [۱۸]. از این‌رو به‌جای چگالی برابر با $0/9$ چگالی بحرانی، فومی با چگالی $3/6$ چگالی بحرانی در نظر گرفته و با ایجاد حفره‌هایی در ابعاد و فواصل

شکل ۹. انتشار لیزر در فوم‌های متخلخل در زمان نصف پهنای تپ لیزر درست برای اهداف شکل ۸.

شکل ۱۰. مقایسه‌ی پیشینه‌ی انرژی پروتون‌ها با استفاده از فوم یکنواخت و فوم‌های متخلخل.

شکل ۱۱. مقایسه‌ی فوم‌های متخلخل با چگالی $3/6$ چگالی بحرانی در برابر فوم یکنواخت با چگالی $0/9$ چگالی بحرانی، عدد اول نشان‌دهنده شعاع و عدد دوم فاصله‌ی بین دو مرکز است که بر حسب میکرومتر بیان می‌شوند. بالا از چپ به راست: $0/25-1/5$ ، $0/5-2$ ، $0/5-1/5$ ، $0/5$ و $0/5$ و پایین از چپ به راست: L to S، S to L، ۱-۳، ۱-۴.

شکل ۱۲. مقایسه انتشار لیزر برای هدف‌های شکل ۱۱.

شکل ۱۳. طیف انرژی برای هدف‌های شکل ۱۱ در زمان اتمام تپ لیزر. در تصویر عدد دوم به جای فاصله‌ی بین دو مرکز، کم‌ترین فاصله را نشان می‌دهد.

آن نیز بهترین شرایط اولیه‌ی حفره‌ها از نظر ابعاد و فواصل بین مراکز به ترتیب $0.5 \mu\text{m}$ و $1.5 \mu\text{m}$ تعیین شد. در نتیجه با استفاده از نتایج حاصل، می‌توان در آزمایشگاه با کنترل حفره‌های ایجاد شده حتی در چگالی‌های بیش از چگالی بحرانی نیز هدف‌های مطلوبی جهت شتابدهی فراهم آورد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله در ابتدا شرایط بهینه برای شتابدهی پروتون‌ها با استفاده از هدف سه لایه شامل یک لایه‌ی با چگالی بحرانی (فوم) در فرایند شتابدهی غلاف عمود بر سطح مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای بهینه لیزر و پلاسما شامل چگالی و ضخامت فوم و قطبش تپ لیزر حاصل شد. طبق نتایج شبیه‌سازی‌ها، فوم با ضخامت $16 \mu\text{m}$ و چگالی 0.9 چگالی بحرانی به همراه قطبش خطی نوع P منجر به دستیابی به بهترین نتیجه خواهد شد. در ادامه جهت واقعی‌تر شدن نتایج شبیه‌سازی‌ها، تخلخل ذاتی موجود در فوم‌ها در نظر گرفته شد و نشان داده شد که در صورتی که خلل و فرج موجود در فوم مدیریت شوند، امکان افزایش بیشینه‌ی انرژی پروتون‌ها نیز وجود دارد. اما در صورتی که حفره‌ها در شرایط نامساعدی قرار داشته باشند، حتی کاهش انرژی تا حدود ۲۰ درصد نیز دور از انتظار نیست. از آن جهت که ساخت فومی با چگالی دقیقاً کم‌تر از چگالی بحرانی در عمل بسیار سخت می‌باشد، لذا فوم متخلخل با چگالی $3/6$ چگالی بحرانی در نظر گرفته شد و برای

مراجع

1. A. Macchi, M. Borghesi, M. Passoni, *Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction*, *Reviews of Modern Physics*, **85**(2), 751 (2013).
2. S.C. Wilks, et al, *Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions*, *Physics of Plasmas (1994-present)*, **8**(2), 542-549 (2001).
3. A. Macchi, et al, *Radiation pressure acceleration of ultrathin foils*, *New Journal of Physics*, **12**(4), 045013 (2010).
4. L.O. Silva, et al, *Proton shock acceleration in laser-plasma interactions*, *Physical Review Letters*, **92**(1), 015002 (2004).
5. B.M. Hegelich, et al, *Spectral properties of laser-accelerated mid-ZMeV/ u ion beams*, *Physics of Plasmas (1994-present)*, **12**(5), 056314 (2005).
6. I. Prencipe, et al, *Development of foam-based layered targets for laser-driven ion beam production*, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **58**(3), 034019 (2016).
7. I.J. Kim, et al, *Transition of proton energy scaling using an ultrathin target irradiated by linearly polarized femtosecond laser pulses*, *Physical Review Letters*, **111**(16), 165003 (2013).
8. S. Buffechoux, et al, *Hot electrons transverse refluxing in ultraintense laser-solid interactions*, *Physical Review Letters*, **105**(1), 015005 (2010).
9. D. Margarone, et al, *Laser-driven high-energy proton beam with homogeneous spatial profile from a nanosphere target*, *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, **18**(7), 071304 (2015).
10. T. Ceccotti, et al, *Proton acceleration with high-intensity ultrahigh-contrast laser pulses*, *Physical Review Letters*, **99**(18), 185002 (2007).
11. J.H. Bin, et al, *Ion acceleration using relativistic pulse shaping in near-critical-density plasmas (2015)*, *Physical Review Letters*, **115**(6), 064801 (2015).
12. T. Nakamura, et al, *Interaction of high contrast laser pulse with foam-attached target*, *Physics of Plasmas (1994-present)*, **17**(11), 113107 (2010).
13. A. Sgattoni, et al, *Laser ion acceleration using a solid target coupled with a low-density layer*, *Physical Review E*, **85**(3), 036405 (2012).
14. M. Borghesi, et al, *Relativistic channeling of a picosecond laser pulse in a near-critical preformed plasma*, *Physical Review Letters*, **78**(5), 879 (1997).
15. M. Passoni, et al, *Energetic ions at moderate laser intensities using foam-based multi-layered targets*, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **56**(4), 045001 (2014).
16. D.V. Romanov, et al, *Self-Organization of a Plasma due to 3D Evolution of the Weibel Instability*, *Physical Review Letters*, **93**(21), 215004 (2004).
17. A. Pukhov, J. Meyer-ter-Vehn, *Relativistic magnetic self-channeling of light in near-critical plasma: three-dimensional particle-in-cell simulation*, *Physical Review Letters*, **76**(21), 3975 (1996).
18. P. Mulser, D. Bauer, *High power laser-matter interaction*. Springer Science & Business Media, Vol. **238**. (2010).

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

رضا گودرزی، الناز یزدانی (۱۳۹۹)، مطالعه و بررسی شتابدهی پروتون‌ها در اندرکنش لیزرهای پرتوان با هدف‌های فومی، ۶۳-۷۲

DOI: 10.24200/nst.2020.1142

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1142.html