



## اثر چگالی و ضخامت پیش لایه فومی در عملکرد شتابدهی لیزری پروتون

رضائی، سمیه\* - جعفری، محمدجعفر

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای

### چکیده:

در روش شتابدهی از غلاف تشکیل شده از پشت هدف، به عنوان رایج ترین تکنیک شتابدهی پروتون؛ به منظور بهبود میزان انرژی نهایی پروتون از یک لایه فوم در جلوی هدف آلومینیومی استفاده می‌شود. در این کار با در نظر گرفتن دو ضخامت ۵ و ۲۰ میکرومتری برای لایه فومی، اثر تغییر چگالی الکترونی پلاسما در گرمایش الکترون‌ها و نیز طیف انرژی پروتون مطالعه و شبیه سازی شده است. شبیه سازی‌های انجام شده با کد ذره‌ای دو بعدی نشان می‌دهد با افزایش طول پلاسما و انتشار پالس لیزری، مکانسیم جذب انرژی لیزری از طریق الکترون‌ها و بنابراین شتابدهی پروتون‌ها بهبود پیدا می‌کند. به علاوه محاسبات شبیه سازی اذعان دارد بیشینه انرژی پروتونی در به کارگیری لایه فومی با چگالی نزدیک بحرانی می‌باشد.

کلمات کلیدی: *Near critical density-laser plasma interaction-proton acceleration-TNSA*

### مقدمه:

پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی لیزرهای شدت بالا موجب رشد حوزه‌های مختلف برهم کنش لیزر با ماده شده است. در این راستا تولید و آشکار سازی باریکه ذرات توجه محققین را به خود جلب کرده است. در دهه‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه شتاب باریکه یونی از طریق اندرکنش پالس لیزری نسبتی با هدف جامد انجام شده است [۱, ۲]. و در حال حاضر چالش اصلی در این حوزه دستیابی به شتاب بیشتر و باریکه تک انرژی به منظور استفاده در کاربردهای پزشکی و صنعتی می‌باشد [۳, ۴]. در روش شتابدهی از غلاف تشکیل شده از پشت هدف، از یک هدف جامد (معمولاً آلومینیوم) که با لایه‌ای از هیدروژن در پشت آن جفت شده است استفاده می‌کنند [۱]. طراحی بهینه هدف و مطالعه پارامترهای لیزر و پلاسمایی مؤثر در کیفیت شتابدهی پروتون‌ها یکی از ضروریات این حوزه از مطالعات بشمار می‌آید. اخیراً برای دستیابی به انرژی پروتون بیشتر استفاده از هدف‌های چند لایه پیشنهاد شده است [۵]. استفاده از پیش لایه‌هایی با چگالی نزدیک به چگالی بحرانی جذب انرژی لیزر به الکترون‌ها و در نتیجه بازدهی تبدیل انرژی به



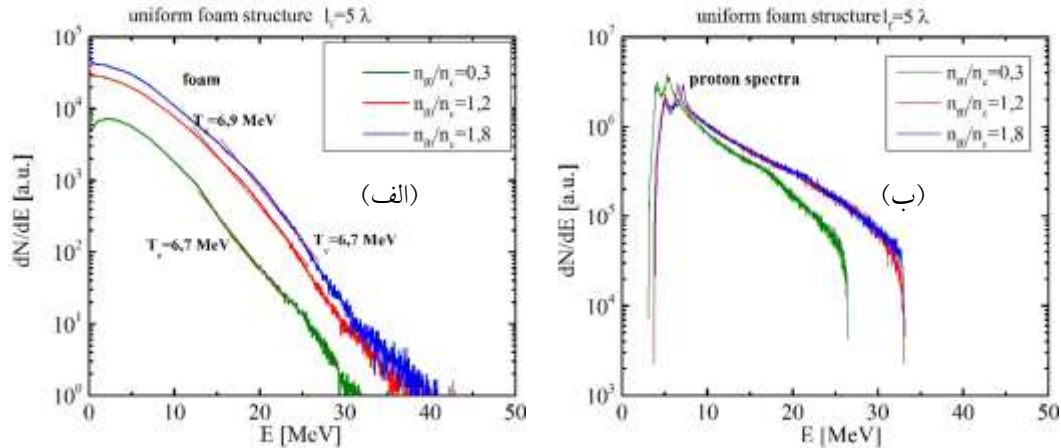
پروتون‌ها را تقویت می‌کند. در این پژوهش با در نظر گرفتن یک لایه یکنواخت فوم در جلوی هدف جامد، نقش چگالی الکترونی این لایه در دو ضخامت نازک ۵ و ضخیم ۲۰ میکرومتری در میزان شتابدهی پروتون مطالعه و شبیه سازی شده است.

### روش کار :

برای انجام شبیه سازی‌ها از کد ذره‌ای نسبیتی الکترومغناطیسی دو بعدی پیکانته استفاده شده است [۶]. هدف به کار رفته در این شبیه سازی‌ها شامل لایه کربنی با ضخامت‌های ۵ و ۲۰ میکرومتری به عنوان پیش لایه در جلوی یک فویل فلزی آلومینیومی با ضخامت ۰/۵ میکرومتر که به لایه نازک پروتونی با ضخامت ۰/۰۶ میکرومتر (لایه هیدروژنی) از پشت جفت شده است می‌باشد. لایه فوم با چگالی میانگین ۰/۳، ۱/۲ و ۱/۸ چگالی بحرانی در نظر گرفته شد است. در تمامی شبیه سازی‌ها دو لایه فلزی و هیدروژنی ثابت در نظر گرفته شده و اثر تغییر چگالی و ضخامت ساختار پیش لایه بررسی شده است. پالس لیزری با قطبش  $p$  و پروفایل زمانی  $\cos^2$ ، طول موج  $FWHM = 15 \lambda / c, 0.8 \mu m$ ، کمر باریکه  $5 \mu m$  و شدت  $a_0 = 10$  (معادل  $I = 2.1 \times 10^{20} W / cm^2$ ) از سمت چپ به هدف برخورد می‌کند.

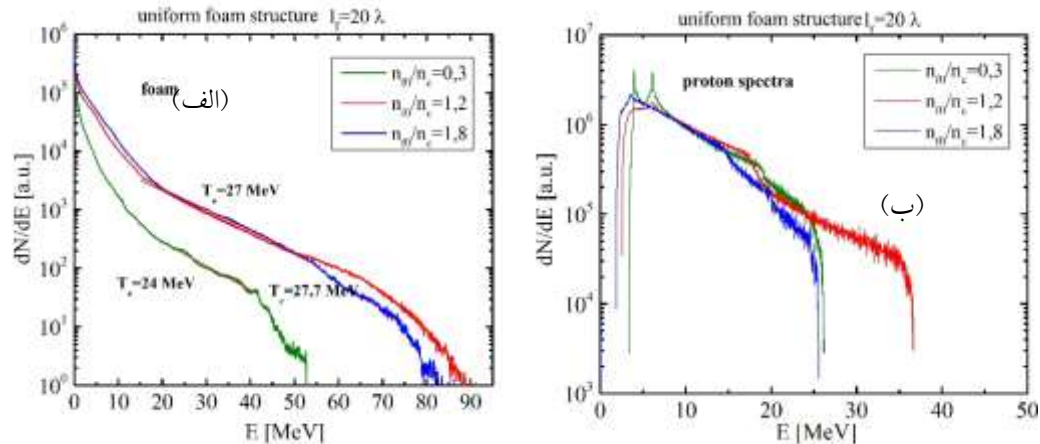
### نتایج :

در این قسمت نتایج به دست آمده حاصل از تغییرات پارامترهای چگالی و ضخامت لایه فومی و تاثیر آنها بر روی گرم شدن الکترون‌ها و نیز بیشینه انرژی پروتون مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج تعدادی از شبیه سازی‌ها با در نظر گرفتن شدت لیزری ثابت و لایه فوم با ساختار یکنواخت در دو ضخامت  $l_f = 5 \mu m$  و  $l_f = 20 \mu m$  و در چگالی‌های ۰/۳، ۱/۲ و ۱/۸ برابر چگالی بحرانی، در شکل ۱ و ۲ رسم شده است. طیف انرژی الکترونی برای لایه فوم با ضخامت کوچک ۵ میکرومتری در شکل ۱ (الف) و طیف انرژی پروتونی در شکل ۱ (ب) رسم شده است. همان طور که شکل ۱ (الف) مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی از ۰/۳  $n_c$  به ۱/۸  $n_c$ ، الکترون‌های لایه فوم انرژی بیشتری کسب می‌کنند. در حالی که میانگین دمایی الکترون‌های حرارتی در هر سه حالت تقریباً نزدیک به هم می‌باشد. هر چند با نزدیک شدن چگالی لایه به چگالی بحرانی، فرآیند جذب انرژی بهتر انجام می‌شود و الکترون‌های سریع انرژی بیشتری کسب می‌کنند اما به دلیل حجم کم جمعیت الکترونی در این ضخامت کوچک دمای الکترون‌های حرارتی تغییری نمی‌کند. در شکل ۱ (ب) مشاهده می‌شود با نزدیک شدن به چگالی بحرانی ( $n = 1.2n_c$ ) انرژی بیشینه پروتون افزایش یافته و از مقدار حدود ۲۶ به ۳۳ مگا الکترون ولت می‌رسد. سپس با افزایش بیشتر چگالی تغییری در انرژی بیشینه پروتون حاصل نمی‌شود. با بهبود فرآیند جذب انرژی الکترونی در لایه فوم با چگالی نزدیک به چگالی بحرانی، میدان حاصل از جدایی بار نیز افزایش یافته و بنابراین شتابدهی پروتون نیز تقویت می‌یابد.



شکل شماره (۱): طیف انرژی در هدف با لایه فومی ۵ میکرومتری برای (الف) باریکه الکترونی (ب) باریکه پروتونی

با افزایش ضخامت لایه فومی به مقدار ۲۰ میکرومتر نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در شکل ۲ (الف) برای طیف الکترونی و در شکل ۲ (ب) برای طیف پروتونی آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۲ (الف) مشخص است، رنج دمایی الکترون‌ها در مقایسه با شکل ۱ برای لایه فوم نازک‌تر، افزایش یافته و این به دلیل گرمایش بهتر الکترون‌ها در فرصت بیشتر انتشار پالس لیزری در پلاسمای ضخیم‌تر می‌باشد. به علاوه از شکل ۲ (الف) مشاهده می‌شود الکترون‌ها در لایه فومی با چگالی  $1/2 n_c$  بیشترین انرژی را کسب کرده و در نتیجه آن، طیف پروتونی نیز در این مورد به بیشترین مقدار خود (در این‌جا حدود ۳۷) می‌رسد. در حالی که تغییر طول لایه فومی برای چگالی  $0/3 n_c$  تأثیری نگذاشته اما موجب کاهش بیشینه انرژی پروتون در چگالی  $1/8 n_c$  شده است. این می‌تواند به این علت باشد که در چگالی‌های بسیار کم مانند  $0/3 n_c$ ، مستقل از طول انتشار پالس لیزری، به علت انبوهی جمعیت کم الکترون‌ها میدان بار فضای ضعیف‌تری در مقایسه با حالت چگالی  $1/2 n_c$  تشکیل می‌شود. به علاوه با افزایش چگالی به مقادیر بالاتر  $1/8 n_c$  پالس لیزری در فواصل کوتاهی از انتشار منعکس شده و جذب مؤثر انرژی لیزری کاهش و در نتیجه شتابدهی پروتون تضعیف می‌شود.



شکل شماره (۲): طیف انرژی در هدف با لایه فومی ۲۰ میکرومتری برای (الف) باریکه الکترونی (ب) باریکه پروتونی به عبارت دیگر نتایج بالا بیان می‌کند در حالی که لایه فوم ضخیم تری با چگالی نزدیک به چگالی بحرانی به کار رود طیف انرژی مطلوب تری برای الکترون‌ها و نیز پروتون‌ها حاصل می‌شود. و از آنجا که ساخت لایه با ضخامت بیشتر از نقطه نظر تجربی آسان‌تر است، هدف‌های فومی با ضخامت چند ده میکرومتر برای شتابدهی پروتون مناسب می‌باشند.

### بحث و نتیجه گیری :

در این پژوهش نقش پارامترهای پیش لایه پلاسما با ساختار یکنواخت در عملکرد شتابدهی پروتون در رهیافت TNSA مطالعه و شبیه سازی شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده با کد نسبیتی و الکترومغناطیسی پیکانته نشان می‌دهد در رنج شدت‌های کم،  $a_0 = 10$ ؛ با به کارگیری هدف با لایه فومی یکنواخت در ضخامت کوچک ۵ میکرومتری، تغییرات چگالی این لایه تأثیر چشمگیری در نتایج انرژی بیشینه پروتون ندارد. در حالی که لایه فومی ضخیم‌تر ۲۰ میکرومتری موجب گرمایش بهتر الکترون‌ها و در نتیجه شتابدهی مؤثرتر پروتون‌ها می‌شود. مطابق با نتایج به دست آمده شرایط بهینه برای دستیابی به بیشینه انرژی پروتون در به کارگیری لایه‌هایی با چگالی نزدیک بحرانی و ضخیم می‌باشد.

### مراجع :

1. Hatchett, S.P., et al., *Electron, photon, and ion beams from the relativistic interaction of Petawatt laser pulses with solid targets*. Physics of Plasmas, 2000. **7**(5): p. 2076-2082.
2. Henig, A., et al., *Laser-driven shock acceleration of ion beams from spherical mass-limited targets*. Physical review letters, 2009. **102**(9): p. 095002.
3. Roth, M., et al., *Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams*. Physical Review Letters, 2001. **86**(3): p. 436.



بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸ و ۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



4. Malka, V., et al., *Practicability of protontherapy using compact laser systems*. Medical physics, 2004. **31**(6): p. 1587-1592.
5. Sgattoni, A., et al., *Laser ion acceleration using a solid target coupled with a low-density layer*. Physical Review E, 2012. **85**(3): p. 036405.
6. Sgattoni, A., et al., *Optimising piccante-an open source particle-in-cell code for advanced simulations on tier-0 systems*. arXiv preprint arXiv:1503.02464, 2015.