

## مطالعه اثر فشار گاز هلیوم بر میزان کاهش دوره زمانی پالس لیزر CO<sub>2</sub> با استفاده از تکنیک برشگر پلاسما

فاطمه رضائی<sup>۱</sup>، صالحه بهشتی پور<sup>۲</sup>، امیرحسین براتی سده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، شریعتی، تهران-ایران

<sup>۲</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، تبریز-ایران

<sup>۳</sup> پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران-ایران

### چکیده

در این مقاله، شبیه‌سازی‌ای از مدل کندگی لیزری به منظور محاسبه میزان جذب حاصل از پلاسمای هدف آلومینیومی انجام شده است. در اینجا، نمونه در گاز زمینه هلیوم در فشارهای 1000 mbar، 700، 500، 300 و 100 قرار دارد. سپس، لیزر دومی از این پلاسما عبور می‌کند که دچار برش پلاسمایی می‌شود، بدین نحو که طول زمانی پالس دوم لیزر به واسطه جذب پلاسما کاهش می‌یابد. در این تحقیق، مشاهده شده است که با افزایش فشار گاز محیط، میزان طول پالس لیزر بیشتر کاهش می‌یابد.

### مقدمه

با تابش دهی نمونه توسط پرتو لیزر پرتوان، تپ لیزر توسط ماده‌ی هدف جذب می‌گردد و انرژی لیزر به نمونه داده می‌شود. به دنبال کندوسوز لیزری، ذراتی به شکل الکترون، یون، اتم، و مولکول، از ماده‌ی هدف جدا می‌شوند. در ادامه، با جذب نور لیزر توسط این ذرات کنده شده از سطح نمونه، پلاسما تولید می‌شود. به طور کلی، در لیزرهای پالس بلند، کندوسوز لیزری به شکل گرمایی صورت می‌گیرد. تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌ی شبیه‌سازی برهم‌کنش لیزرهای مختلف با اهداف گوناگون به منظور تولید پلاسما صورت گرفته است. با این حال، چگونگی عملکرد برشگرهای پلاسمایی لیزرهای CO<sub>2</sub> توسط شبیه‌سازی مطالعه نشده است. در این پژوهش، کوتاه شدن پالس لیزر CO<sub>2</sub> با محاسبات هیدرودینامیکی تولید پلاسما بررسی شده است.

### محاسبات و شبیه‌سازی

در این شبیه‌سازی، گسترش پلاسما تنها در یک بعد در نظر گرفته شده است و ناحیه‌ی پلاسما به 250 لایه به ضخامت 60 μm تقسیم شده است. طول موج فرودی برابر 10.6 μm، پهنای زمانی برابر 50 نانوثانیه و شدت فرودی برابر 10<sup>17</sup> W/m<sup>2</sup> فرض شده است. از گاز زمینه‌ی هلیوم در فشارهای مختلف 1000 mbar، 700، 500، 300 و 100، به عنوان گاز محیط پلاسمای آلومینیومی استفاده شده است. رفتار مکانی و زمانی دمای نمونه‌ی آلومینیومی در مدل گرمایی کندوسوز لیزری طی فرآیند تبخیر عادی توسط معادله‌ی رسانش گرمایی در یک بعد، به صورت زیر محاسبه می‌گردد [2,1]:

$$c_p \rho [\partial T(t, x) / \partial t - u(t) \partial T(t, x) / \partial x] = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \partial T(t, x) / \partial x + (1 - R_f) \alpha I(t) \exp(-\alpha x), \quad (1)$$

در این معادله،  $R_f$  ضریب بازتاب سطح فلز و  $I(t)$  شدت لیزر در مکان  $x=0$  مرز میان سطح آلومینیوم و گاز محیطی می‌باشند.  $T$  دمای هدف آلومینیومی و  $x$  فاصله از سطح مرزی به سمت ناحیهی درون نمونهی آلومینیومی می‌باشد.  $\rho$ ،  $\lambda$  و  $c_p$  به ترتیب چگالی جرمی، ضریب جذب، رسانندگی گرمایی و ظرفیت گرمایی آلومینیوم می‌باشند.  $u(t)$  سرعت پس‌زنی سطح آلومینیوم می‌باشد. سپس، با حل معادلات اوپلر که دربرگیرندهی معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی است و در نظر گرفتن شرایط مرزی، چهار پارامتر چگالی گاز و چگالی آلومینیوم، فشار و انرژی درونی به دست می‌آیند. جزئیات محاسبه مربوط به پارامترهای پلاسما در مقاله قبلی این گروه در مرجع [۳] توضیح داده شده است. میزان جذب پلاسما حاصل از فرایند برماشترالانگ معکوس الکترون-خنثی از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\alpha_{en} = \frac{e^2 n_e}{\pi m_e c v^2} n_0 \sigma_c \sqrt{\frac{8 k_B T}{\pi m_e}} \quad (2)$$

همچنین، میزان جذب پلاسما ناشی فرایند برماشترالانگ الکترون-یون از معادله (۳) محاسبه می‌شود [۴].

$$\alpha_{ei} = \frac{4 e^6 n_e}{3 h c m_e v^3} \left( \frac{2 \pi}{3 m_e k_B T} \right)^{1/2} [1 - \exp(-\frac{h v}{k_B T})] \times (n_{Al^+} + 4 n_{Al^{2+}} + n_{gas^+}) \quad (3)$$

در این رابطه‌ها،  $\sigma_c$  سطح مقطع جذب فوتون،  $n_0$  چگالی عددی موضعی اتم‌های خنثی و  $U$  بسامد پرتو لیزری می‌باشند. چگالی بحرانی پلاسما طبق رابطه زیر از طریق طول موج لیزر  $\lambda$  بدست می‌آید [۵]:

$$N_c [cm^{-3}] \cong \frac{1/1 \times 10^{21}}{\lambda^2 [\mu m]} \quad (4)$$

همچنین، به منظور برش لیزر توسط پلاسما، بایستی رابطه بین شعاع پلاسما و چگالی آن در دو وضعیت ۱ و ۲ توسط معادله (۵) برقرار باشد [۶].

$$R_1^3 n_1 = R_2^3 n_2, \quad (5)$$

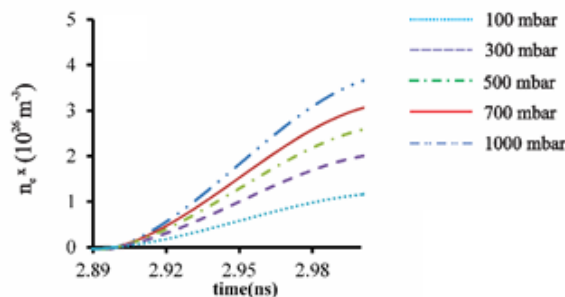
زمان مربوط به طول پالس نور عبوری از پلاسما از معادله (۶) با دانستن شعاع پلاسما زمانی که عبور به  $R_{10}$  و  $R_{90}$  درصد می‌رسد، محاسبه می‌گردد [۲]:

$$t_r = \frac{(R_{90} - R_{10})}{V}, \quad (6)$$

در این معادله  $V$  سرعت گسترش پلاسما است.

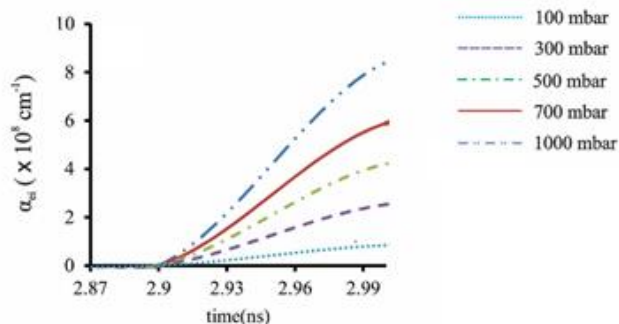
## نتایج و بحث

شکل ۱ تحول زمانی چگالی الکترونی پلاسما را در پنج فشار مختلف نشان می‌دهد.



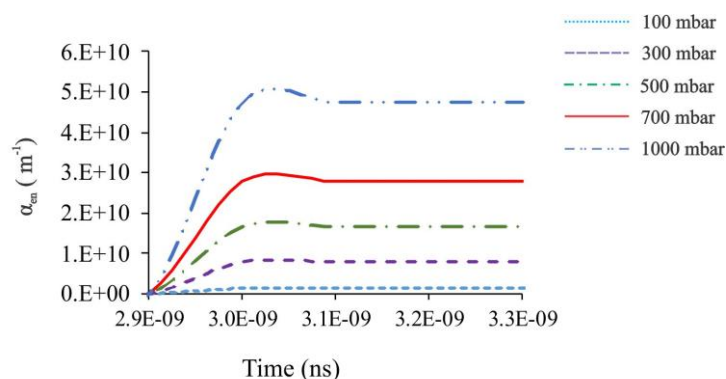
شکل ۱: تحولات زمانی چگالی الکترونی هدف آلومینیومی در فشارهای ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰ mbar از گاز هلیوم.

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با گذشت زمان میزان چگالی الکترونی افزایش یافته و فشارهای بالاتر، چگالی الکترونی بزرگتری را ایجاد می‌کند. به منظور برآورد میزان برش لیزر توسط پلاسما، ضرایب جذب برامشترالانگ معکوس الکترون-یون و الکترون-خنثی در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.



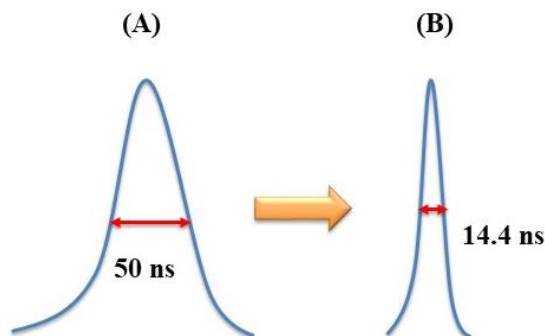
شکل ۲: تغییرات زمانی ضریب جذب الکترون-یون محیط پلاسمای القایده لیزری در فشارهای مختلفی از گاز هلیوم.

شکل ۳ میزان جذب پلاسما را بدلیل اثر برامشترالانگ معکوس الکترون-یون بر حسب تابعی از زمان و فشار گاز محیط نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش فشار میزان جذب پلاسما افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که افزایش فشار منجر به افزایش چگالی الکترونی می‌شود که این امر طبق معادلات (۲) و (۳) سبب ازدیاد ضرایب جذب می‌شود.



شکل ۳: تحولات زمانی ضریب جذب الکترون-خنثی پلاسمای هدف آلومینیومی واقع در محیط گازی هلیوم در فشارهای مختلف.

شکل ۴ میزان کاهش طول زمانی پالس لیزر را از ۵۰ ns به ۱۴.۴ ns در فشار ۱۰۰ mbar از گاز زمینه هلیوم نشان می‌دهد.



شکل ۴: شماتیکی از میزان کاهش دوره زمانی پالس لیزر CO<sub>2</sub> از زمان (A) ۵۰ نانوثانیه به (B) ۱۴.۴ نانوثانیه، در فشار ۱۰۰ mbar از گاز هلیوم.

همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود طول پالس به میزان ۱۴.۴ ns کاهش یافته است.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، کوتاهی پالس لیزر در فشارهای مختلفی از گاز هلیوم بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان داده است که افزایش فشار گاز زمینه، سبب افزایش برش پلاسمایی و کوتاهی بیشتر طول پالس لیزر شده است.

## مرجع‌ها

1. M. Aden, E. Beyer, G. Herziger, and H. Kunze, J. Phys. D: Appl. Phys. **25**, 57 (1992).
2. G. Colonna, A. Casavola, and M. Capitelli, Spectrochim. Acta, Part B **56**, 567 (2001).
3. F.Rezaei, and S. H. Tavassoli, Phys. Plasmas **20**, 013301 (2013).
4. L. J. Radziemski and D. A. Cremers, Laser-Induced Plasmas and Applications (CRC, 1989), Vol. 21.
5. S. Eliezer, The Interaction of High-Power Lasers with Plasmas, 2002.
6. L. Dhareshwar, P. Naik, & D. Bhawalkar, Rev. Sci. Instrum. **62**, 369 (1991).