

شبیه سازی محیط فعال پلاسمایی لیزر پرتو ایکس نرم آهن شبه نئون

غزاله غنی مقدم^{۱*}، امیرحسین فرهد^۱

چکیده

در این مقاله به بررسی محیط فعال لیزر پرتو ایکس نرم آهن شبه نئون و به دست آوردن ضریب بهره محیط پرداخته شده است. در این پژوهش با استفاده از کد هیدرودینامیکی MED103 و همچنین تنظیم پارامترهای لیزر ورودی که عبارتند از چند تپی بودن، پهنای تپ، طول موج، شدت و فاصله زمانی میان تپ ها، پارامترهای هیدرودینامیکی و میزان یونش محیط فعال پلاسمایی آهن شبه نئون به دست آورده شده اند. از آنجا که گسیل لیزری در این پلازما در گذارهای یون های شبه نئون و شبه نیکل روی می دهد، با محاسبه میزان یونش می توان پارامترهای بهینه برای دستیابی به بهره های بالاتر را برآورد نمود. سپس با استفاده از پارامترهای هیدرودینامیکی و یونش به حل معادلات نرخ پایا برای محاسبه ضریب بهره محیط فعال پرداخته شده است.

واژه های کلیدی: محیط فعال پلاسمایی، لیزر پرتو ایکس نرم، یون آهن شبه نئون.

۱. مقدمه

در سالیان اخیر پژوهش های نظری و تجربی بسیاری در حوزه پلاسمای تولید شده به کمک لیزرهای توان بالا صورت گرفته است [۱ و ۲]. در این رهیافت باریکه پرتوان کانونی شده لیزر بر سطح هدف، سبب می شود که سطح هدف به سرعت گرم شده و انرژی گرمایی در پلاسمای منبسط شده از طریق الکترون ها، یون ها و تابش به قسمت های سرد هدایت شود. حالت تعادل ترمودینامیکی پلازما در هر نقطه از هدف میان تمام

چشمه های گرمایشی و تبادل انرژی میان الکترون ها، یون ها و میدان های تابشی تعیین می شود. پلاسمای داغ ناشی از تپ متمرکز پرتوان لیزر بر سطح هدف، منبع مناسبی برای تقویت پرتوهای ایکس نرم به شمار می آید. لیزرهای پرتو ایکس نرم کاربردهای بسیاری در زمینه صنعت و پزشکی در حوزه میکروسکوپی، هولوگرافی و لیتوگرافی دارند [۳]. اخیراً پلاسمای تولید شده از طریق لیزرهای پرتوان به عنوان محیط تقویت کننده برای لیزرهای پرتو ایکس نرم مورد استفاده قرار گرفته است [۴-۷]. در چنین تجربه هایی غالباً امکان اندازه گیری تعداد نقاط محدودی وجود دارد. لذا درک بهتر نتایج تجربی و پیش بینی رفتار محیط بهره

۱ پژوهشکده پلازما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران.
* پست الکترونیکی: ghanimoghadam@yahoo.com

$$\frac{\partial \rho E_e}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho E_e u + (P_e)u] = S_e + \nabla \cdot q_e \quad (4)$$

در این معادلات، ρ چگالی، u بردار سرعت، P_e و P_i فشار یون و الکترون، E_e و E_i انرژی یون و الکترون و S_e و S_i هرگونه چشمه یا چاه انرژی یون ها و الکترون ها هستند. q_e و q_i نیز شار حرارتی وابسته به رسانش برای الکترون و یون می باشد که با رابطه ۵ تعریف می شود.

$$\nabla \cdot q = -\nabla \cdot k \nabla T \quad (5)$$

که k رسانش حرارتی است.

در توصیف لاگرانژی که شبکه مختصاتی متصل به پلاسما می باشد، رابطه انرژی به صورت رابطه ۶ نوشته می شود [۱۱].

$$C_{V_i,e} \frac{dT_{i,e}}{dt} + B_{T_{i,e}} \frac{d\rho}{dt} + P_{i,e} \frac{dV}{dt} = S_{i,e} \quad (6)$$

در رابطه ۶، $C_V = (\partial U / \partial T)_\rho$ و $B_T = (\partial U / \partial \rho)_T$ است و U انرژی درونی سیستم است. S_i و S_e نسبت چشمه و چاهک انرژی برای یون ها و الکترون ها بر واحد جرم است که با روابط ۷ و ۸ داده می شوند.

$$S_i = H_i - K + Q \quad W / kg \quad (7)$$

$$S_e = H_e + K + J + X \quad W / kg \quad (8)$$

H نماینده شار گرمایی ناشی از رسانش حرارتی، K نرخ تغییرات انرژی بین یون ها و الکترون ها، J نرخ تابش برامشترالانگ، X نرخ جذب نور لیزر و Q گرمایش ضربه می باشد. در توصیف هیدرودینامیکی، لیزر به صورت منبع انرژی خارجی در نظر گرفته می شود. مجموعه این معادلات با معادله حالت کامل می شوند که ارتباط فشار و انرژی درونی را به صورت تابعی از چگالی و دما بیان می کنند.

نیازمند شبیه سازی های عددی است. مهمترین ویژگی این شبیه سازی ها، محاسبه فرآیندهای برانگیختگی و یونش می باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از کد MED103 [۱] ابتدا پارامترهای ماکروسکوپی پلاسما در برهمکنش لیزر با سطح هدف آهن با استفاده از رهیافت سیالی شبیه سازی می شود، سپس برای محاسبه برانگیختگی ها و میانگین حالت یونش از معادلات نرخ وابسته به زمان استفاده می شود. در نهایت با حل عددی معادلات نرخ پایا به محاسبه ضریب بهره محیط فعال می پردازیم.

۲. مدل سیالی و معادلات هیدرودینامیکی

در برهمکنش لیزر پرشدت تپ کوتاه با ماده از سه مدل ذره ای، جنبشی و سیالی استفاده می شود [۹ و ۱۰]. در مدل سیالی همواره فرض بر این است که پلاسما در تعادل موضعی حرارتی بوده و به عبارتی تابع توزیع ذرات آن، تابع ماکسول با دمای مشخص T_i و T_e می باشد. تحت این شرایط، پلاسما با متغیرهای ماکروسکوپی آن مثل چگالی، فشار، سرعت سیال و غیره توصیف می شود. مهمترین کاربرد مدل سیالی بررسی رفتار دینامیکی مقیاس بالا از یک پلاسما تحت میدان های الکتریکی و مغناطیسی خارجی و یا مطالعه گرمایش با لیزر و یا با پرتو ذرات می باشد. در مدل تک سیالی و دو دمایی معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی با روابط ۱ تا ۴ بیان می شود [۹].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla (P_i + P_e) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E_i}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho E_i u + (P_i)u] = S_i + \nabla \cdot q_i \quad (3)$$

ناحیه شبهه‌سازی در کد MED103 در رهیافت لاگرانژی از نقطه $r=0$ تا نقطه متحرک $r=R_0$ ، به N سلول تقسیم می‌شود. مرزهای هر سلول می‌تواند آزادانه حرکت کنند و به این ترتیب حجم سلول را تغییر دهند. جرم هر سلول مقدار ثابت dM_l است و حجم مشخصه آن با رابطه ۱۱ بیان می‌شود.

$$V_l = \frac{1}{g} (R_{j+1}^g - R_j^g) \frac{1}{dM_l} \quad (11)$$

از رابطه ۱۱ چگالی هر سلول ρ_l را می‌توان به دست آورد. با دانستن عدد جرمی M و عدد اتمی Z می‌توان چگالی عددی هر سلول را با رابطه ۱۲ تعیین کرد.

$$n_i = \rho \frac{1}{m_H M}, \quad n_e = Z n_i \quad (12)$$

هر کمیتی که در مرکز هر سلول مشخص شود را می‌توان با میانگین‌گیری ساده در مرزها تعیین کرد. همچنین هر کمیتی که با اندیس n نشانه‌گذاری شده باشد، در زمانی که با رابطه ۱۳ داده شده، تخمین زده می‌شود که در آن مقدار Δt^n i امین گام در مجموعه زمان‌های گسسته شده است.

$$t^n = \sum_{i=1}^n \Delta t^i \quad (13)$$

بنابراین کد MED103 معادله انرژی را به صورت ضمنی و معادله حرکت را به صورت صریح حل می‌کند و مختصات و حجم هر سلول یک گام زمانی جلوتر از دما و فشار الکترونی محاسبه می‌شود. این مقدار گام زمانی با میزان تغییرات نسبی دما و حجم محدود می‌شود.

برای حل این معادلات لازم است تا توان و طول موج لیزر فرودی و همچنین ابعاد، جنس و فشار داخل ماده هدف معلوم باشد. بنابراین با استفاده از کد

۳. معرفی کد MED103

کد MED103 یک کد لاگرانژی یک بعدی می‌باشد و به عنوان ابزار اصلی شبهه‌سازی در این پژوهش به کار گرفته شده است [۸ و ۱۱]. این کد با حل خودسازگار معادلات هیدرودینامیکی، برانگیختگی و یونش پلاسمای لیزری و با در نظر گرفتن فرآیندهای اتمی و معادلات انرژی الکترون آزاد به بررسی محیط فعال پلاسمای لیزری می‌پردازد. معادلات استفاده شده، در بخش قبلی آورده شده است. گذار میان حالت‌های برانگیخته و حالت پایه شامل تقریب میانگین اتمی می‌باشد. در پلاسمایی که شامل مراحل مختلف یونش یک عنصر مشخص می‌باشد، اگر گونه‌های یونی متفاوت تنها با یک یون میانگین جایگزین شوند آن‌گاه تحولات فرآیند یونش به نسبت ساده می‌شود. در واقع یون میانگین، یک میانگین آماری بر روی تمام حالت‌های یونی موجود در پلازما است. در این حالت جمعیت میانگین P_n تراز n با میانگین وزنی f_i روی جمعیت $P_{n,i}$ تراز n از گونه i با رابطه ۹ داده می‌شود:

$$P_n = \sum_{i=0}^Z f_i P_{n,i} \quad (9)$$

که Z عدد اتمی عنصر مورد بررسی و f_i کسر گونه یونی i است. تحول زمانی جمعیت P_n از معادله نرخ محاسبه می‌شود که می‌تواند به صورت میانگین معادلات نرخ با فرض سهم‌های وزنی یکسان برای یون‌های متفاوت مورد استفاده قرار گیرد.

با در نظر گرفتن بار مؤثر اتم میانگین و با در دست داشتن جمعیت ترازهای مقید، میانگین حالت یونش با رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$Z^* = Z - \sum_{n=1}^{n_{\max}} P_n \quad (10)$$

f_{lk} قدرت نوسانگر، $\langle G \rangle$ ضریب Gaunt، T_e دمای الکترون، ΔE_{lk} تفاوت انرژی بین دو تراز l و k و g_l تبهگنی تراز l ام است.

خروجی مدل، محاسبه ضریب بهره سیگنال کوچک $g_0(v=v_0)$ در بسامد خط مرکزی لیزر v_0 است که با رابطه ۱۷ به دست می آیند [۵]:

$$g_0(v=v_0) = (N_k - \frac{g_k}{g_l} N_l) \sigma_{stim}(v=v_0) \quad (17)$$

که σ_{stim} سطح مقطع گسیل القایی است و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\sigma_{stim}(v) = \Phi(v) \frac{\lambda^2}{8\pi} A_{kl} \quad (18)$$

که λ طول موج لیزر و $\Phi(v)$ تابع شکل خط طیف است که به پهن شدگی طیفی در محیط بهره وابسته است. اگر فقط شکل خط را داپلری در نظر گیریم و آن را در مرکز بخواهیم، داریم:

$$\Phi_D(0) = \lambda \left(\frac{m}{2\pi k T_i} \right)^{1/2} \quad (19)$$

که m جرم اتمی یون های مولد لیزر و T_i دمای یون ها است.

۵. نتایج شبیه سازی

در این مقاله به بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی پلاسما پرداخته شده و تاثیر پرتو لیزر دمش بر روی رفتار این پارامترها برای هدف آهن که دارای خصوصیات اتمی و معادله حالت شناخته شده می باشد، مطالعه شده است. آهن دارای عدد اتمی ۲۶ و یون شبه نئون آن دارای ۱۶ بار یونیده می باشد. شبیه سازی ها را با استفاده از سه تپ لیزری انجام داده ایم (شکل ۱).

هیدرودینامیکی می توانیم پارامترهای هیدرودینامیکی را با تغییر خصوصیات لیزر فرودی و یا ماده هدف برای رسیدن به تقویت مناسب برای لیزر پرتو ایکس نرم به دست آوریم.

۴. معادله نرخ

پس از به دست آوردن پارامترهای هیدرودینامیکی با استفاده از کد MED103، به بررسی رفتار بهره محیط پلاسمایی با حل معادلات نرخ سه تراز می پردازیم. از آنجا که مدل میانگین اتمی تنها جمعیت کل هر تراز کوانتومی اصلی نه جمعیت پیکربندی های متفاوت را محاسبه می کند، یک مدل شبه ایستا برای یون های مورد نظربه طور جداگانه حل می شود. این رفتار شبه حالت پایا در تراز پایه که زمان واهلش برای حالت های برانگیخته شده بسیار کوچک تر از حالت پایه یک یون مشخص است، صدق می کند. اگر تنها گذارهای تابشی و برخوردی بین ترازهای برانگیخته در نظر گرفته شود، معادله تعادلی برای هر تراز l به صورت زیر نوشته می شود:

$$\left[\sum_{k=1}^{k_{max}} N_e C_{lk} + \sum_{k<l} A_{lk} \right] N_l = \sum_{k=1}^{k_{max}} N_e C_{kl} N_k + \sum_{k=1}^{k_{max}} A_{kl} N_k \quad (14)$$

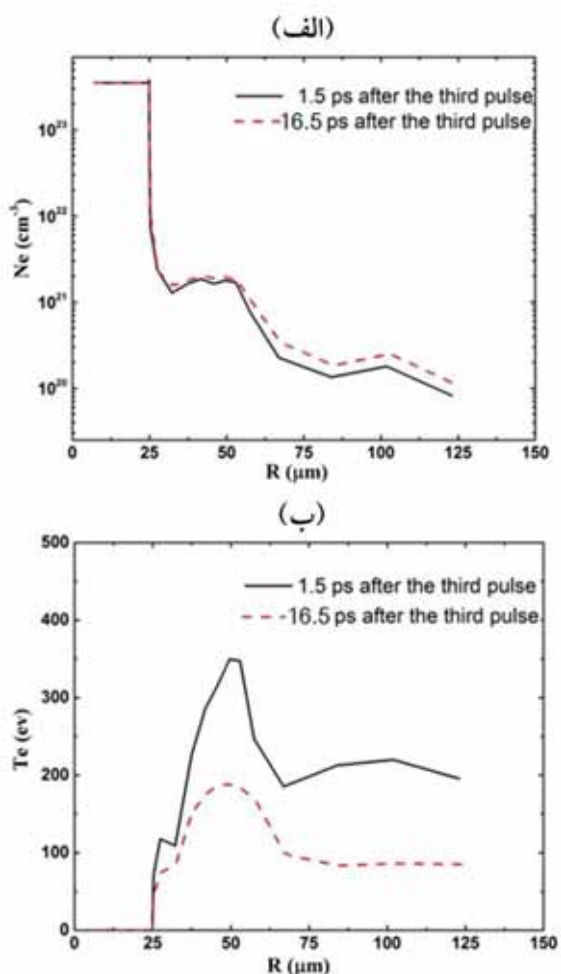
که در آن k_{max} تعداد کل حالت های برانگیخته است A_{kl} نرخ واپاشی تابشی خودبه خود از تراز k به l و C_{kl} نرخ فروافت یا برانگیختگی برخوردی است.

آهنگ های برخورد الکترونی با توزیع سرعت ماکسولی برای الکترون ها به صورت زیر محاسبه می شوند.

$$C_{kl} \approx 1.6 \times 10^{-5} \frac{f_{lk} \langle G \rangle}{\Delta E_{lk} \sqrt{k T_e}} e^{-\Delta E_{lk}/k T_e} \quad (15)$$

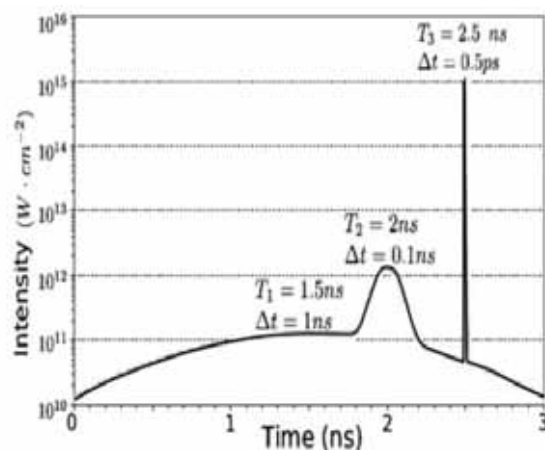
$$C_{kl} \approx \frac{g_l}{g_k} C_{lk} e^{\Delta E_{lk}/k T_e} \quad (16)$$

محاسباتی ضخامت هدف $25 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است. شکل ۲ پارامترهای هیدرودینامیکی (چگالی و دمای الکترونی) را نشان می دهد. افزایش چگالی در محدوده $25 \mu\text{m}$ در شکل ۲(الف) نشان دهنده موج ضربه می باشد.



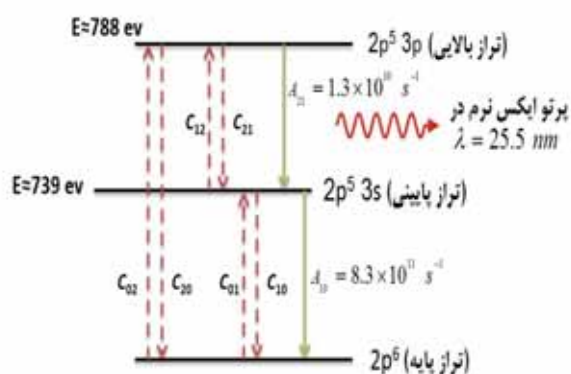
شکل ۲. نتایج شبیه سازی چگالی الکترون (الف) و دما (ب) برای پلاسمای هدف تابش دهی شده با سه تپ لیزری در دو زمان $16/5 \text{ ps}$ و $1/5 \text{ ps}$ پس از اعمال تپ سوم.

شکل ۳ میزان یونش پلازما را نشان می دهد. همانگونه که از شکل ۳ مشخص است، در زمان $16/5 \text{ ps}$ پس از اعمال تپ سوم، بیشترین مقدار یون آهن شبه نئون



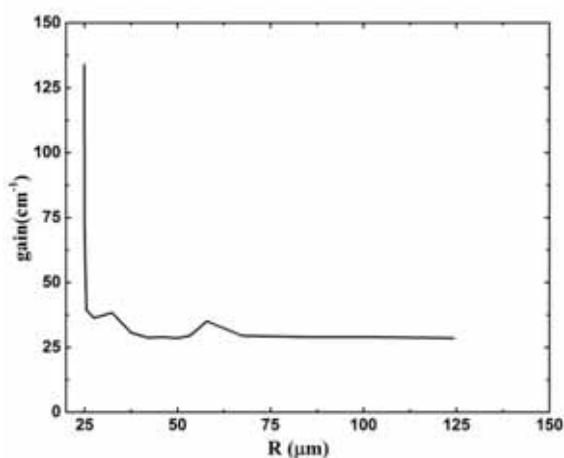
شکل ۱. نمایه ای از سه تپ لیزری استفاده شده در شبیه سازی ها.

تپ اول پلاسمای یونیده ضعیف تولید می کند که جذب قوی انرژی تپ دوم را ممکن می سازد. تپ دوم (تپ اصلی)، پلازما را کاملاً یونیده می کند و تپ سوم دمای الکترون ها را به سرعت افزایش می دهد. در حقیقت فرآیند دمش شامل سه تپ لیزری است که بیشینه آنها در فواصل $1/5$ ، 2 و $2/5 \text{ ns}$ از نقطه شروع شبیه سازی رخ می دهد و به ترتیب دارای نیم پهنا در ارتفاع بیشینه (FWHM)، 1000 ، 100 ، و $0/5 \text{ ps}$ و شدتهای $1/2 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ ، $1/2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ و $1/1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ هستند و طول موج لیزر نیز برابر $\lambda = 800 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده است. پس از اعمال تپ سوم به سطح هدف، نمودارهای مربوط به پارامترهای هیدرودینامیکی و یونش بر حسب فاصله از سطح هدف و در دو زمان متفاوت ترسیم و در شکل ۲ و ۳ آورده شده است. زمان اول $1/5 \text{ ps}$ پس از اعمال تپ سوم و زمان دوم در حالتی که بیشینه بهره برای یون آهن شبه نئون موجود است، یعنی $16/5 \text{ ps}$ پس از اعمال تپ سوم در نظر گرفته شده است. در این تجربه



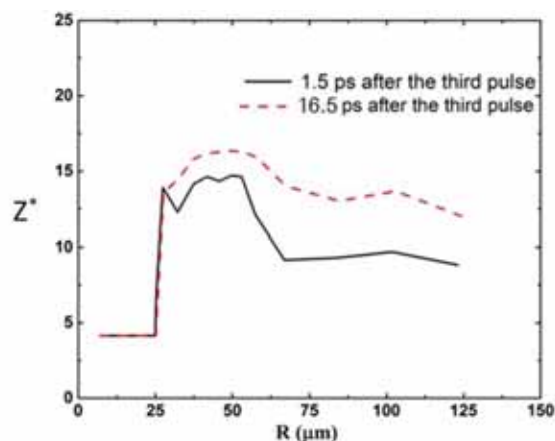
شکل ۴. ترازهای یون شبه نئون آهن Fe^{12+} برای مدل سه تراز و لیزر پرتو ایکس (→ گذار تابشی و --> گذار برخوردی) ۵ و ۱۳.

مقادیر ساختار اتمی ترازهای آهن شامل انرژی ترازها، فروافت های تابشی، قدرت تشدیدگر را نیز از مراجع [۵ و ۱۳] به دست آورده و در محاسبات وارد می کنیم. شکل ۴ ترازهای یون شبه نئون را در مدل سه تراز نشان می دهد. شکل ۵ نمودار ضریب بهره نسبت به فاصله از سطح هدف را برای یون شبه نئون با دمش سه تپ لیزری نشان می دهد. این نمودار نیز در توافق با نتایج شبیه سازی کدهای دیگر برای پلاسماهای لیزری می باشد [۱۲].



شکل ۵. ضریب بهره نسبت به فاصله از سطح هدف برای یون آهن شبه نئون.

(۱۶ بار یونیده) مشاهده می شود، بنابراین در این زمان بیشترین بهره لیزر پرتو ایکس نرم در طول موج ۲۵/۵ nm موجود است. این نتایج قابل مقایسه با نتایج کد هیدرودینامیکی EHYBRID برای لیزرهای پرتو ایکس نرم می باشد [۴ و ۱۲]. بنابراین با استفاده از کد MED103 می توان با تنظیم پارامترهای لیزر دمش، پارامترهای بهینه پلاسما را برای دستیابی به بهره های بالا در طول موج های لیزر پرتو ایکس نرم به دست آورد.



شکل ۳. شبیه سازی میانگین حالت یونش (بار میانگین محیط) برای پلاسماهای هدف آهن تابش دهی شده با سه تپ لیزری در دو زمان ۱/۵ ps و ۱۶/۵ ps پس از اعمال تپ سوم.

سپس با استفاده از پارامترهای به دست آمده از کد و همچنین استفاده از مدل سه تراز، به حل عددی معادلات نرخ پایا به منظور محاسبه ضریب بهره یون آهن شبه نئون، می پردازیم.

۶. نتيجه گيرى

مراجع

- پلاسمای تولید شده از برهمکنش لیزرهای اپتیکی پرتوان با سطح هدف یکی از منابع تولید لیزر پرتو ايكس نرم به شمار می آید. ناحیه طول موجی ليزر پرتو ايكس نرم با استفاده گذار در یون های مشخص شبه نئون و شبه نیکل روی می دهد. برای دستیابی به بهره بالای این نوع ليزرها، پارامترهای هیدروپلاسمایی پلاسمای تولید شده و در واقع خصوصیات ليزر دمش بسیار اهمیت دارد. با استفاده از شبيهه سازى محيط فعال پلاسمايى و با تنظيم ویژگی های ليزر دمش می توان به محيط فعال ليزرهای پرتو ايكس نرم با بهره بالا دسترسی پیدا کرد. در این پژوهش محيط فعال ليزر پرتو ايكس نرم آهن شبه نئون در طول موج ۲۵/۵ nm با استفاده از کد هیدروپلاسمایی MED103 مورد بررسی قرار گرفته که نتایج قابل مقایسه با نتایج کد هیدروپلاسمایی EHYBRID برای ليزر پرتو ايكس نرم است.
- [1] R. S. Craxton, K. S. Anderson et al., "Direct-drive inertial confinement fusion: A review", *Physics of Plasma*, Vol. 22, 2015, pp. 110501.
- [2] E. Esarey et al., "Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators", *REVIEWS OF MODERN PHYSICS*, Vol. 81, 2009, pp. 1229.
- [3] H. Daido, "Review of soft x-ray laser researches and developments", *Rep. Prog. Phys.*, Vol. 65, 2002, pp. 1513-1576.
- [4] G. J. Tallents, "The physics of soft x-ray lasers pumped by electron collisions in laser plasmas", *J. Phys D: Appl. Phys.*, Vol. 36, 2003, pp. R259.
- [5] E. Oliva et al., "Hydrodynamic study of plasma amplifiers for soft-x-ray lasers: A transition in hydrodynamic behavior for plasma columns with widths ranging from 20 μm to 2 mm", *Phys. Rev. E*, Vol. 82, 2010.
- [6] G. Ghani-Moghadam, A.H. Farahbod, "Investigation of self-filtering unstable resonator for soft X-ray lasers", *Opt Commun.*, Vol. 371, 2016, pp. 154.
- [7] G. Ghani Moghadam and A. H. Farahbod, "General formula for calculation of amplified spontaneous emission intensity", *Opt. Quant. Electron.*, Vol. 48, 2016, pp. 227.
- [8] A. Djaoui, "A user guide for the laser-plasma simulation code: MED103", *PAL-TR-96-099*, 1996.
- [9] S. Eliezer, *The Interaction of High-Power Lasers with Plasmas*, IOP Publishing Ltd, 2002.

- [10] P. Gibbon, *short pulse laser interactions with matter An introduction*, Imperial College Press, 2005.
- [11] A. Djaoui and S.J. Rose, "*Calculation of the time-dependent excitation and ionization in a laser-produced plasma*", J. Phys B: At. Mol. Opt. Phys., Vol. 25, 1992, pp. 2745-2762.
- [12] G. J. Pert, "*The hybrid model and its application for studying free expansion*", J. Fluid Mech., Vol. 131, 1983, pp. 401.
- [13] Toshizo Shirai et al., "*Spectral Data and Grotrian Diagrams for Highly Ionized Iron, Fe VIIIXXVI*", J. Phys. Chem. Ref. Data., Vol. 19, 1990, pp. 127-275.