



شبیه‌سازی ذره‌ای رشته‌ای شدن باریکه‌های لیزر در برهم‌کنش دو باریکه نسبیتی با پلاسمای کم چگال

سید ابوالفضل قاسمی^{۱*}، مطهره لواسانی^۲، مسعود پیشدست^۱، فاطمه رضایی^۱، جمال‌الدین یزدان‌پناه^۱

۱. پژوهشکده پلازما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران-ایران
۲. گروه اتمی و مولکولی و نجوم، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق پستی: ۱۶۳۱۵-۱۶۱۸، تهران-ایران

*Email: abo.ghasemi@gmail.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۵/۲۱ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۸/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۸/۲۰

چکیده

با اعمال دو باریکه پرشدت نسبیتی تحت شرایط مختلف بر پلاسمای کم چگال، تأثیر فاصله و زاویه نسبی باریکه‌ها بر رشته‌ای شدن آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد ذره در سلول دو بعدی SMILEI نشان می‌دهند، زمانی که فاصله دو باریکه صفر است و زاویه نسبی بین آن‌ها وجود ندارد، نتایج منطبق با رفتار یک پالس قوی با شدت چهار برابر تک پالس است. هم‌چنین، تأثیر تغییرات پارامتر زاویه بر رشته‌ای شدن باریکه‌ها به مراتب مهم‌تر از تأثیر پارامتر فاصله است. با تغییر و افزایش فاصله دو باریکه در زاویه ثابت، تشکیل کانال‌های مجزایی مشاهده شده است که تفکیک آن‌ها با افزایش فاصله پالس بیشتر می‌شود. در بررسی اثر زاویه بر رشته‌ای شدن به ازای $\theta = 0^\circ$ ، تشکیل دو کانال مجزا و پیش‌روی در پلازما مشاهده شده است. به طوری که با افزایش زاویه به $\theta = 2^\circ$ کانال‌ها با هم ادغام شده و منجر به تشکیل یک تک کانال عریض چگالی می‌شود. بیشترین کانال‌های رشته‌ای مشاهده شده به ازای مقدار مشخصی از فاصله دوپالس، در زاویه نسبی میانی $\theta = 4^\circ, 6^\circ$ رخ می‌دهد. با توجه به اهمیت رشته‌ای شدن و به هم پیوستن کانال‌ها در ارتباط با موضوع پایداری انتشار پالس‌های پرتوان، این بررسی نشان می‌دهد که تغییرات زاویه نسبی بین دو باریکه و اثر آن در رشته‌ای شدن باریکه می‌تواند در زوایایی بر انتشار مؤثر و پایداری پالس پرتوان تأثیرات منفی داشته باشد که در برخی آزمایشات از جمله گداخت محصورسازی لیزری مطلوب نیست.

کلیدواژه‌ها: انرژی جنبشی الکترون، برهم‌کنش لیزر-پلازما، کد ذره در سلول، رشته‌ای شدن باریکه‌ی لیزر، SMILEI

Particle simulation of laser beams filamentation in the interaction of two relativistic beams with under-dense plasma

S.A. Ghasemi^{*1}, M. Lavasani², M. Pishdast¹, F. Rezaei¹, J. Yazdanpanah¹

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O. Box: 14399-51113, Tehran – Iran
2. Atomic and Molecular and Astronomy Group, Physics Faculty, K.N. Toosi University of Technology, P.O.BOX: 16315-1618, Tehran - Iran

Research Article

Received: 12.8.2023, Revised: 25.10.2023, Accepted: 11.11.2023

Abstract

By applying two relativistic high-intensity laser beams under different conditions to low-density plasma, the effects of the beams' corresponding distance and angle on their filamentation were investigated and studied. The results of the simulations using the particle in cell (SMILEI) two-dimensional code show that when the distance and the corresponding angle between the pulses are zero, the results are the same as a powerful pulse with intensity equals four times a single pulse. Meanwhile, it was clear that the impact of relative beam angles on pulse filamentation is more significant and sensible than the effect of distance variation. So, it is shown that by increasing the distance, separate plasma channels are formed, and more filaments are observed. Moreover, the effect of relative beam angle variation reveals that, unexpectedly, two distinct channels formed and traveled through plasma. By increasing the angle to $\theta = 2^\circ$, the channels merged and formed a single wide channel. Further, for a constant beams distance, the maximum filaments are observed at the middle angles $\theta = 4^\circ, 6^\circ$. It should be noted that studying laser beam filamentation in plasma is so critical for stable pulse propagation through the plasma. Our simulations indicate that in some relative angles, we will not have stable and efficient pulse propagation. This could be distractive in some experiments such as inertial confinement fusion.

Keywords: Kinetic energy of electron, Laser-plasma interaction, Particle in cell code, Filamentation of laser beam, SMILEI



۱. مقدمه

به دلیل کاربردهای بسیار زیاد برهم‌کنش لیزرهای پرتوان با پلاسما، به‌خصوص در زمینه‌هایی مهمی چون گداخت اینرسی [۱] و شتابدهی ذرات [۲]، این موضوع در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده است. موفقیت‌های اخیر در دستیابی به افروزش در گداخت محصورسازی اینرسی و همچنین تولید باریکه‌های الکترونی با کیفیت گiga الکترون ولتی در شتاب‌دهنده لیزر-پلاسمایی، اهمیت این موضوع را دو چندان کرده است.

انتشار و برهم‌کنش هم‌زمان دسته پالس‌های متقاطع (دو پالس و بیشتر) و یا تداخل‌کننده، یکی از پدیده‌های متداول در محصورسازی اینرسی است [۳، ۴]. در الگوی تحریک مستقیم، تعداد بسیار زیادی از پالس‌های لیزر به طور هم‌زمان از اطراف هدف به آن تابانده می‌شوند. در الگوی تحریک غیرمستقیم نیز، دسته پالس‌ها بر روی دیواره داخلی هلوام تابانده شده و منجر به تولید پرتوهای پرشدت X جهت تابش سطح هدف و القای هم‌جوشی می‌شوند [۳]. در رابطه با شتابدهی ذرات باردار با لیزرهای کوتاه پالس قوی نیز اخیراً استفاده از الگوهای پالس‌های هم‌زمان متقاطع و متداخل بسیار مورد توجه قرار گرفته است و مزیت‌های آن نسبت به حالت تک پالس، چه در مطالعات تحلیلی و شبیه‌سازی و چه در آزمایشات واقعی به اثبات رسیده است [۵-۱۱].

در این مورد اخیر، به‌خصوص مواردی چون افزایش طول شتابدهی الکترون (اصطلاحاً الگوی "بدون غیر-همفازی") در شتاب‌دهنده موج دنباله لیزر [۵] و همچنین بهبود و ارتقای شتابدهی به یون‌ها در برهم‌کنش با هدف جامد، با استفاده از پالس‌های متقاطع بسیار برجسته و قابل ذکر هستند. در یک مطالعه اخیر Ferri و همکاران [۶] نشان دادند که تابش لیزرهای متقاطع به یک هدف جامد منجر به افزایش ۲ برابری انرژی قطع پروتون‌های شتاب گرفته و افزایش ۵ برابری تعداد آن‌ها خواهد شد، که بسیار قابل توجه است.

در نظریه‌های برهم‌کنش لیزر کوتاه پرتوان با اهداف تخت جامد، این موضوع هم‌اکنون کاملاً پذیرفته شده است (برای مثال مرجع [۱۲] و مراجع آن را ببینید) که قسمت پیش-پالس، قبل از رسیدن پالس اصلی منجر به پف‌کردگی جلوی پالس می‌شود، به گونه‌ای که هدفی که با قسمت اصلی پالس مورد برهم‌کنش قرار می‌گیرد، شامل یک بخش رقیق با نمایه مشخص است که نهایتاً به بخش مافوق بحرانی ختم می‌شود. بخش مهم جذب انرژی پالس/پالس‌ها نیز در همین

پف‌کردگی رخ می‌دهد. از این‌رو، بررسی برهم‌کنش‌ها در حضور نمایه‌های چگالی پلاسما از اهمیت بالایی برخوردار است.

هنگامی که چند پالس لیزر به صورت متقاطع/متداخل با پلاسما برهم‌کنش می‌کنند، در شدت‌های پایین و در نواحی شبه خطی تحولات پالس‌ها با تعمیم نظریات متداول ناپایداری‌های پارامتریک قابل توصیف است [۳، ۴]. این در حالی است که در شدت‌های بالا و یا بسیار بالا (که در شتابدهی مورد استفاده است) این موضوع کاملاً غیرخطی بوده و تاکنون توصیف تحلیلی آن غیرممکن است. پالس‌های کوتاه قوی، با وارد کردن نیروی پاندروموتیو قوی به الکترون‌ها، منجر به القای اختلالات قوی در پلاسما می‌شوند. حتی در حالت تک پالس، فقط اثرات آهسته واکنش پایدار متقابل پلاسما بر روی پالس قابل محاسبه تحلیلی است [۱۳]. در حضور چند پالس، مسئله بسیار بُرنج‌تر می‌شود و اندرکنش‌های متقابل پالس‌ها موضوع را بسیار پیچیده‌تر می‌نماید. در این شرایط، همان‌گونه که در مطالعات پیشین استفاده شده است [۳-۱۲]، شبیه‌سازی‌های تمام سنتیک ذره-در-سلول بسیار کمک‌کننده و آگاهی بخش می‌باشد. روش کلی این است، که با استفاده از این روش شبیه‌سازی، مسئله به صورت پارامتری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا چگونگی وابستگی رفتار و خروجی سیستم نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی روشن گردد.

هنگام برهم‌کنش یک لیزر پرشدت با پلاسمای کم‌چگال، فرایندهای غیرخطی مختلف و پیچیده‌ای به وجود می‌آیند که نتیجه آن شتابدهی الکترون‌ها به انرژی‌های بالا و نسبیتی است. این فرایندهای شتابدهی الکترون به پارامترهای لیزر و پلاسما بسیار وابسته هستند. دو فرایند شتابدهی رایج موجود، شتابدهی الکترون‌ها به واسطه میدان عقبه [۱۴] و شتابدهی مستقیم لیزر [۱۵] می‌باشند که در این راستا، تحقیقاتی در حوزه انتشار چند باریکه لیزر در پلاسمای کم‌چگال صورت گرفته است. بررسی زاویه بین دو باریکه و نتایج حاصل از رژیم ($LWFA$)، نشان می‌دهد که اگر زاویه برخورد بین دو لیزر نسبتاً کوچک باشد ($\theta < 10^\circ$)، دو باریکه می‌توانند به یک باریکه تبدیل شده و به طور پایدار در پلاسمای کم‌چگال برای مسافت طولانی‌تری منتشر شوند. در صورتی که وقتی زاویه برخورد بزرگ باشد، دو باریکه ابتدا به یک باریکه تبدیل شده و بعد از طی یک فاصله انتشار کوتاه، مجدداً به دو باریکه جدا می‌شوند. در نتیجه،

1. Laser Wakefield Acceleration (LWFA)

2. Direct Laser Acceleration (DLA)



میدان الکتریکی لیزر در این مورد ضعیف‌تر از مورد زاویه‌های کوچک است [۱۶-۱۸].

با توجه به این‌که مطالعه برهم‌کنش لیزر-پلازما به دلیل کاربردهای بالقوه مهم مدل‌های مختلف افروزش سوخت برای گداخت محصورسازی اینرسی^۱ مورد توجه قرار گرفته، مطالعه ناپایداری رشته‌های لیزری برای این مهم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۹]. بنابراین با توجه به نیاز به یک محرک بسیار یکنواخت برای انفجارهای راه‌انداز مستقیم و پتانسیل رشد افزایش یافته ناپایداری‌های پارامتریک در تاج کم‌چگال، ناپایداری رشته‌ای (رشته‌ای شدن لیزر) برای پلاسمای ICF می‌تواند یک مسئله نگران‌کننده باشد [۲۰-۲۳]. زیرا در تخریب جفت شدگی لیزر با اهداف محصورسازی اینرسی نقش بسیار مهمی دارد.

ناپایداری‌های رشته‌ای که ناشی از نوسانات و غیریکنواختی‌های فضایی شدت لیزر فرودی است [۱۹، ۲۴، ۲۵]. پیامدهای زبان‌بازی [۲۶] برای پلاسمای ICF دارد به طوری که می‌تواند منجر به ایجاد تغییراتی در ضریب شکست پلازما و همچنین تقویت و تشدید نوسانات و ناپایداری‌های مضر لیزر-پلازما شود [۲۷] و بر رشد ناپایداری‌های پارامتریک، پراکندگی بریلئون القایی و پراکندگی رامان القایی تأثیر بگذارد [۲۸-۳۰]. رشته‌ای شدن نقاط داغ در باریکه لیزری می‌تواند توسط نیروی پاندروموتیو یا گرمایش موضعی (رشته‌ای شدن حرارتی) ایجاد شود [۳۱، ۳۲].

در مرجع [۳۳] یک آستانه عملی برای مشخص کردن هزاران رشته لکه که در صفحه کانونی پرتوهای لیزر پرقدرت یافت می‌شوند تعریف می‌شود. این مرجع با مطالعه شبیه‌سازی هیدرودینامیک غیرخطی سه بعدی آستانه شروع رشته‌های پوندروموتیو را مورد توجه قرار داده و طول‌ها و مقیاس‌های زمانی لازم برای رسیدن به یک حالت پایدار آماری را تعیین می‌کند. همچنین، نیروی پاندروموتیو رشته‌ای را برای دو نوع باریکه مختلف با فاز تصادفی دایره‌ای با قطبش و بدون قطبش مورد بررسی قرار می‌دهد و با نادیده گرفتن جذب تابش ترمزی معکوس به منظور جدا نمودن اثرات آن بر رشته‌ای شدن حرارتی، ضرورت هم‌گرایی زمانی به بازتاب شرایط مرزی در جهت محوری برای معادلات سیال برای جلوگیری از فرار پلازما از دامنه مشخص شد. مرجع [۳۴] خود-متمرکزی یا رشته‌ای شدن یک باریکه لیزری قطبیده دایروی که در امتداد جهت میدان مغناطیسی استاتیک در پلازما منتشر می‌شود، در تقریب

پرتوی پیرامحوری توسعه‌یافته مورد بررسی قرار می‌دهد. هنگامی که توان اولیه باریکه لیزر از توان بحرانی آن بیشتر باشد باریکه لیزر متمرکز می‌شود و در نتیجه باعث می‌شود که با جفت شدن با امواج چگالی، جریان‌های غیرخطی تابش‌های تراهرتزی ایجاد شود که این با تغییر شدت میدان مغناطیسی می‌توان مقدار آن را افزایش یا کاهش داد. این مرجع متمرکز شدن باریکه لیزری را در دو ناحیه مختلف پیرامحوری مورد بررسی قرار می‌دهد و این بررسی نشان‌دهنده اختلاف میزان متمرکز شدن باریکه لیزری در دو ناحیه مورد بررسی و ایجاد تفاوت در توان تابش تراهرتز تولیدی است. مرجع [۳۵] با ارائه مشاهدات تجربی مستقیم از ساختار پرتو الکترون داغ منتشر شده در برهم‌کنش‌های هدف لیزر-جامد، وجود تعداد زیادی از رشته‌های مقیاس کوچک در پرتو الکترونی هنگام انتشار در پلاسمای نسبتاً طولانی^۲ و با چگالی کم نشان می‌دهد در حالی که در صورت عدم وجود پلازما کم‌چگال در سطح عقب هدف باریکه لیزر دوم بسیار یکنواخت بوده و هیچ ساختار رشته‌ای مشاهده نمی‌شود. این نوع ساختارهای باریکه را می‌توان با ناپایداری‌های وایبل مانند که می‌تواند در پلاسمای کم‌چگالی تولید شده در عقب هدف رخ دهد، توضیح داد. این مرجع برای مطالعه خود از شبیه‌سازی‌های دوبعدی ذره در سلول^۳ برای تشکیل کانال‌های مغناطیسی در برهم‌کنش لیزر پلازما با استفاده از طول‌های مختلف مقیاس چگالی پلازما در سطح عقب هدف استفاده کرده و نتایج حاصل از آن حاکی از مطابقت داشتن با مشاهدات تجربی است. این مرجع نشان می‌دهد که مهم‌ترین شرایطی که در آن رشته‌های باریکه الکترونی به دلیل ناپایداری‌های شبه وایبل به یک عامل تبدیل می‌شود، موقعیت‌هایی است که در آن مناطق وسیعی از پلاسمای کم‌چگالی وجود دارد به عبارت دیگر چگالی پلازما قابل مقایسه با چگالی باریکه باشد. همچنین این مرجع بیان می‌کند که انتشار باریکه الکترونی در پلاسمای برخوردی سرد نیز ممکن است این ناپایداری را افزایش دهد. شایان ذکر است در مرجع [۳۶] پژوهشی انجام شده که به لحاظ هندسی شبیه به مقاله حاضر است اما تفاوت‌های عمده‌ای دارد. در مرجع [۳۶] هندسه مسئله شبیه به مقاله حاضر است اما برخلاف مقاله حاضر، چگالی پلازما مقداری ثابت در حوالی پلاسمای رقیق کم‌چگال با مقدار $n_C = 0.2 n_{Cr}$ در نظر گرفته شده در حالی که در این مقاله چگالی با یک نمایه خطی تا سطح بحرانی پیش می‌رود، $n_C = 1 n_{Cr}$. پر واضح است که فیزیک برهم‌کنش در این دو

2. Long-Scale-Length

3. PIC

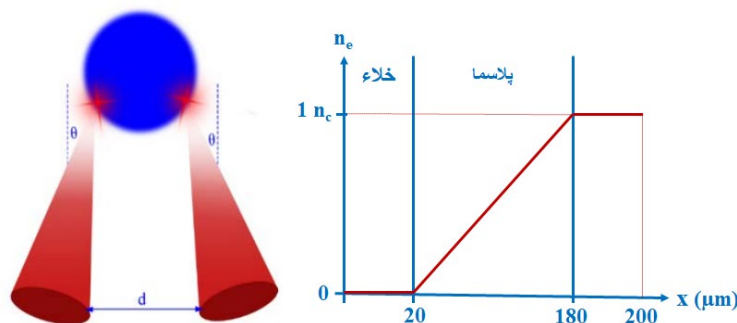


از طی $20\mu m$ در خلأ با رمپ خطی چگالی برخورد کرده و وارد پلاسما می‌شوند را نشان می‌دهد. به طوری که با در نظر گرفتن چگالی‌هایی با مقادیر متفاوت و مشخص در این شبیه‌سازی، شرایط محیطی به گونه‌ای است که باریکه‌های لیزری $20\mu m$ ابتدایی مسیر را در خلأ می‌پیمایند و سپس تا زمان رسیدن چگالی به مقدار $n_C = 1n_{Cr} = 7.86 \times 10^{21} cm^{-3}$ به میزان $160\mu m$ درون پلاسما را طی می‌کنند که پیمایش $20\mu m$ نهایی مسیر نسبت به چگالی یکنواخت خواهد بود. چگالی بحرانی در این شبیه‌سازی به صورت $n_{Cr} = \gamma n_C = 7.86 \times 10^{21} cm^{-3}$ تعریف می‌شود که در آن $\gamma = \sqrt{1 + \frac{a_{1,2}^2}{2}}$ فاکتور متوسط نسبیتی لورنتس می‌باشد. زمان شکل‌ها براساس کمیت $T_r = \frac{1}{\omega_r} = \frac{\lambda}{2\pi c}$ بیان شده است که در آن، ω_r فرکانس مرجع و λ طول موج پرتو و c سرعت نور می‌باشد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. تأثیر تغییرات فاصله باریکه‌ها بر رشته‌ای شدن

شکل ۲، تحول فضا- زمانی توزیع دامنه عرضی میدان لیزر را درون پلاسما به ازای فواصل مختلف d با زاویه $\theta = 0$ در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲(a-c) مشاهده می‌شود، زمانی که فاصله دو باریکه صفر است و زاویه نسبی بین آن‌ها وجود ندارد، به طور بدیهی، نتایج منطبق با رفتار یک پالس قوی با شدت چهار برابر تک پالس است. در ادامه در شکل ۲ (d-l) مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله دو باریکه، همان‌طور که انتظار می‌رود، کانال‌های مجزایی تشکیل می‌شود که تفکیک آن‌ها با افزایش فاصله پالس بیشتر می‌شود. عرض کانال‌ها با گذشت زمان و به واسطه عملکرد پدیده‌های خود کانونی، فرسایش پالس و رشته‌ای شدن تغییر می‌کند.



شکل ۱. شماتیک برهم‌کنش دو باریکه لیزری با زوایا و فواصل مختلف که پس از طی ۲۰ میکرون در خلأ با رمپ چگالی وارد پلاسما می‌شوند.

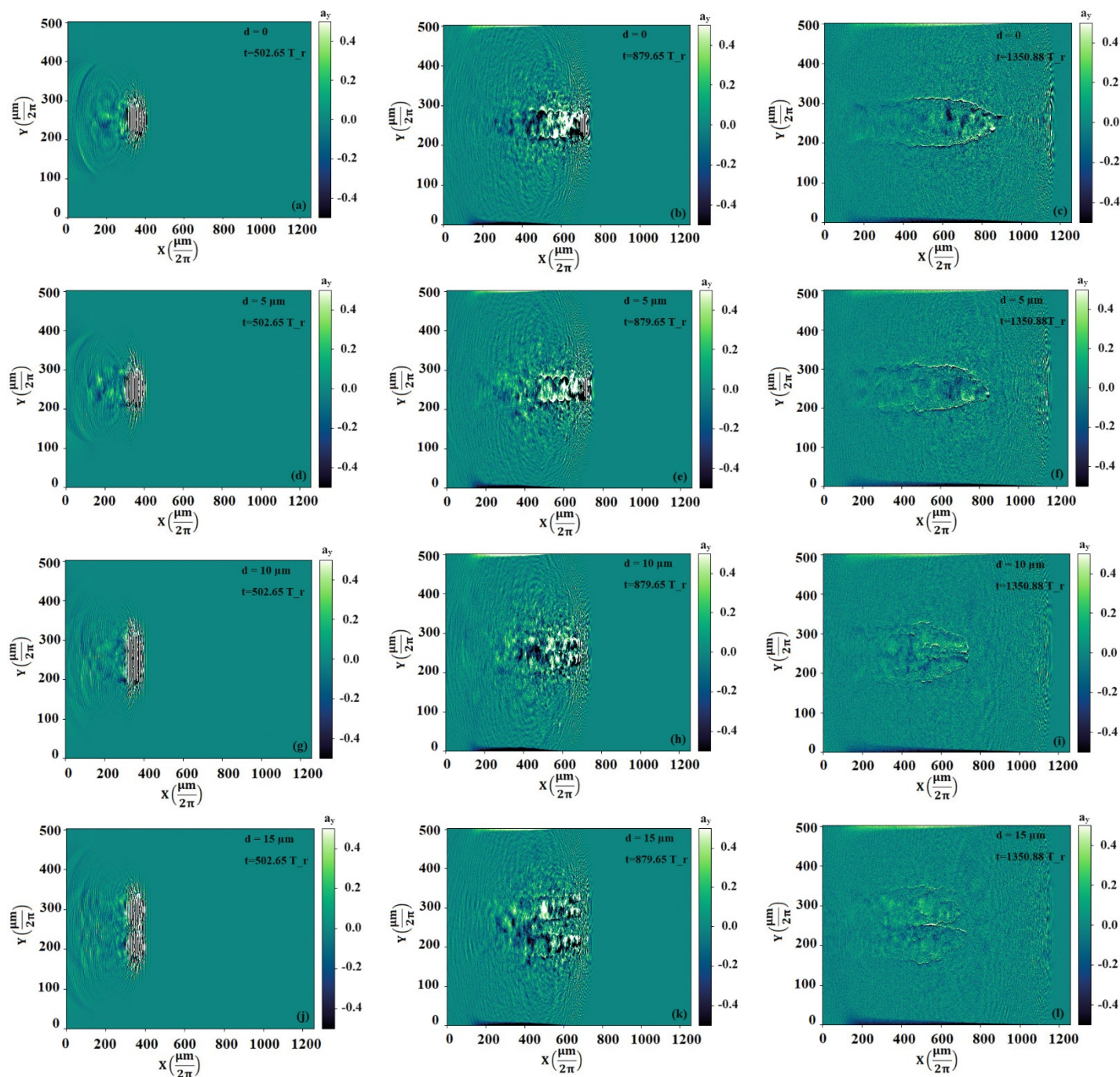
ناحیه بسیار متفاوت است. از طرف دیگر در مقاله مرجع [۳۶] صرفاً تأثیر فاصله و زاویه بر شتاب‌دهی الکترون‌ها بررسی شده حال آن‌که در این مقاله تأثیر این دو پارامتر بر رشته‌ای شدن باریکه لیزر درون پلاسما و پایداری پالس مطالعه شده که موضوعی متفاوت است. از طرفی، با نگاهی به مقاله مرجع [۳۶] به راحتی می‌توان فهمید که عملاً در نمودارهای تحولات فضا- زمانی میدان عرضی لیزر و چگالی پلاسما که بحث اصلی این مقاله است، تغییرات زاویه مطلقاً بررسی نشده حال آن‌که در مقاله کنونی تغییرات پارامتر زاویه در این دو نمودار تأثیر بسیار مهمی بر رشته‌ای شدن و پایداری پالس لیزر دارد. بنابراین عملاً مقاله حاضر دارای موضوعی متفاوت، در رژیم‌های متفاوت و دارای فیزیکی متفاوت است که پایداری انتشار پالس لیزر درون پلاسما را مورد بررسی قرار می‌دهد به نحوی که دو باریکه پرشدت نسبیتی از میان پلاسمای کم‌چگال عبور می‌کند و با تغییر فاصله و زاویه دو باریکه لیزر فرودی بر پلاسمای کم‌چگال تأثیرات آن بر رشته‌ای شدن باریکه لیزر در پلاسما با استفاده از کد شبیه‌سازی ذره در سلول SMILEI مطالعه شده است.

۲. مشخصات شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی فیزیک این مسئله، ابعاد در راستای محور $X-Y$ ، $200 \times 80\mu m$ با تعداد ۴۰۰۰ سلول در راستای محور X و ۱۶۰۰ سلول در راستای محور Y و زمان شبیه‌سازی نیز به طور تقریبی $716 fs$ در نظر گرفته شده است. برای هر سلول، تعداد ۸ ذره الکترون و ۸ ذره یون تعریف شده و دمای اولیه آن‌ها با فرض پلاسمای سرد در شبیه‌سازی صفر لحاظ شده است.

هم‌چنین دو باریکه لیزر با قطبش خطی و پروفایل زمانی گausین $t_0 = l_0 = 2\pi$, $FWHM = 10 \times t_0$ در نظر گرفته می‌شوند. در این شبیه‌سازی، l_0 طول بهنجارش و دامنه بهنجارش عرضی $a_1 = a_2 = 10$ می‌باشند و دو باریکه از سمت چپ وارد پلاسما می‌شوند. شکل ۱ شماتیکی از برهم‌کنش دو باریکه لیزری با زوایا و فواصل مختلف را که پس





شکل ۲. تحول فضایی- زمانی توزیع دامنه میدان عرضی لیزر در زمان‌های مختلف به ازای فاصله‌های متفاوت.

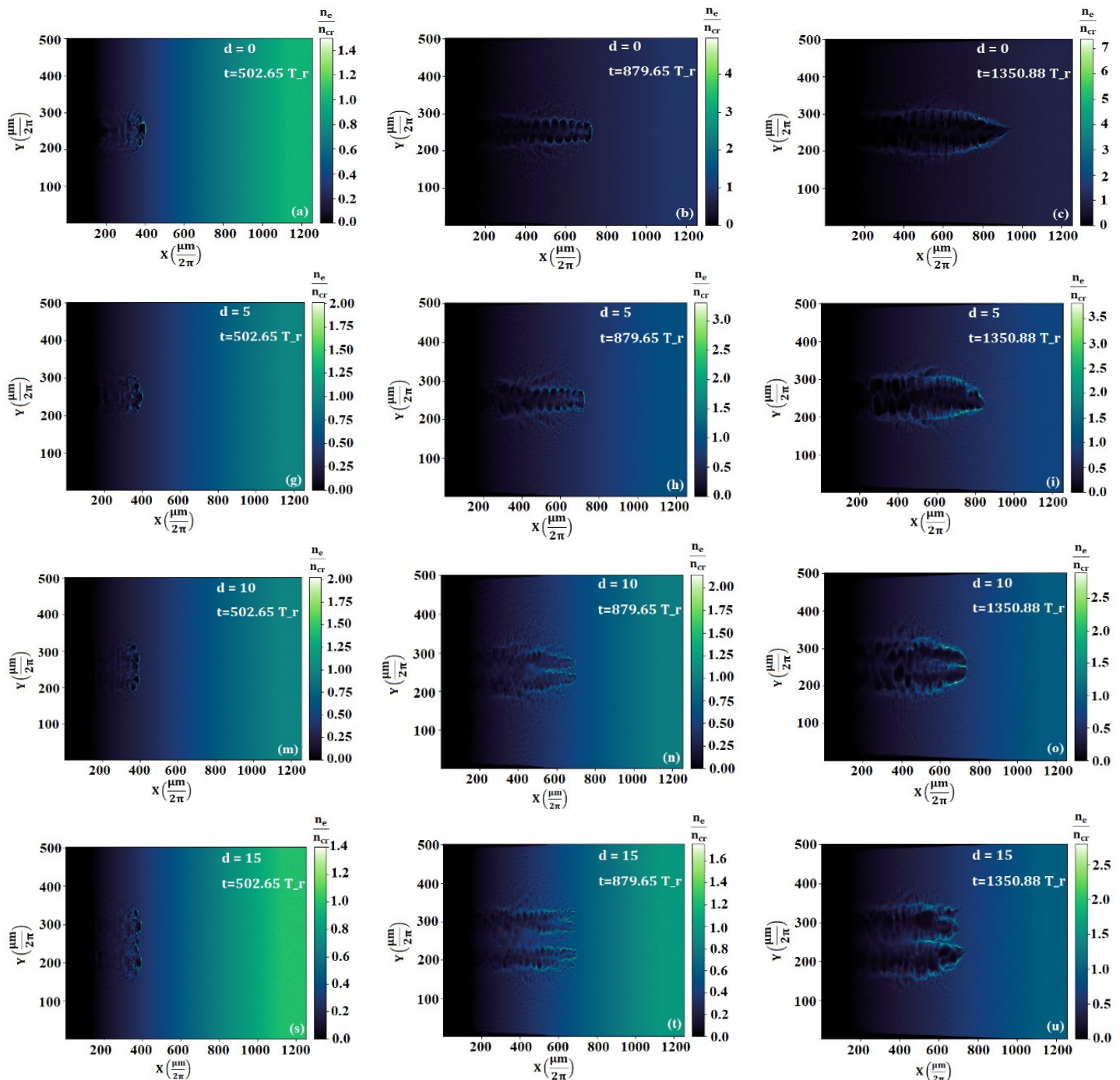
سپس با تغییر ضریب شکست باریکه لیزر به درون این چاه‌های چگالی متمرکز شده و رشته‌ای می‌شوند. هنگامی که باریکه لیزر به دلیل افزایش واگرایی زاویه‌ای پرتو پاشیده می‌شود یک آستانه نیروی پاندرموتیو خود- متمرکز برای لیزر ایجاد می‌شود [۳۳]. بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود در اثر برخورد پالس لیزر به پلاسما، نیروی پاندرموتیو ناشی از لیزر، الکترون‌ها را از ناحیه پر شدت لیزر کنار زده و رو به جلو و کناره‌ها سوق می‌دهد. سپس، با نفوذ پالس لیزر به درون پلاسما و ایجاد کانالی تهی از الکترون‌ها، با گذشت زمان الکترون‌ها از کناره‌ها به

این پدیده‌ها در شکل ۳ که نشان‌دهنده تحولات چگالی الکترون‌های تشکیل شده در کانال‌ها است، در سازگاری با شکل ۲ قابل مشاهده است. با انتشار پرتو لیزر در پلاسما، چگالی پلاسما در کانال به دلیل وجود نیروی پاندرموتیو ناشی از گرادیان شدت باریکه‌ها تغییر خواهد کرد. لذا نیروی پاندرموتیو باعث کاهش چگالی درون کانال شده، بنابراین ضریب شکست افزایش می‌یابد و پرتو لیزر رشته‌ای می‌شود [۳۴]. به عبارت دیگر نیروی پاندرموتیو یک میدان الکترومغناطیسی ناهمگن هنگام عبور لیزر از پلاسما، باعث ایجاد چاه‌های چگالی شده و



طوری که بعد از گذشت زمان $t = 1350.88 \text{ T}_r$ به نظر می‌رسد که دو باریکه کل پلازما را پیموده‌اند، شکل ۳(c). این در حالی است که با افزایش فاصله بین دو باریکه $d = 15 \mu\text{m}$ ، مشاهده می‌شود که دو کانال موازی و مستقل از هم اما باریک‌تر و کوچک‌تر تشکیل می‌شوند. نکته قابل توجهی که در شکل‌های ۳ m-u مشاهده می‌شود این است که با افزایش فاصله رشته‌ای شدن کانال‌ها بیشتر می‌شود که می‌تواند به عنوان یک عامل منفی در انتشار پایدار پالس‌ها تلقی گردد.

ناحیه عقب لیزر درون کانال‌ها تزریق می‌شوند. همچنین جمعیتی از الکترون‌ها در ناحیه هم‌پوشانی لبه‌های عرضی پالس‌ها گیر می‌افتند (شکل‌های ۳o و ۳و). با گذر زمان، کانال در پلازما به جلو رانده شده و الکترون‌ها در آن تزریق می‌شوند که با سازوکار میدان عقبه شتاب می‌گیرند. طبیعتاً با توجه به بزرگتر بودن نیروی پاندروموتیو در برهم‌نهی کاملاً سازنده دو پالس، اندازه کانال پلاسمایی تشکیل شده در حالت $\theta = 0^\circ$ و $d = 0$ نسبت به دیگر حالت‌ها بزرگتر و عریض‌تر است به



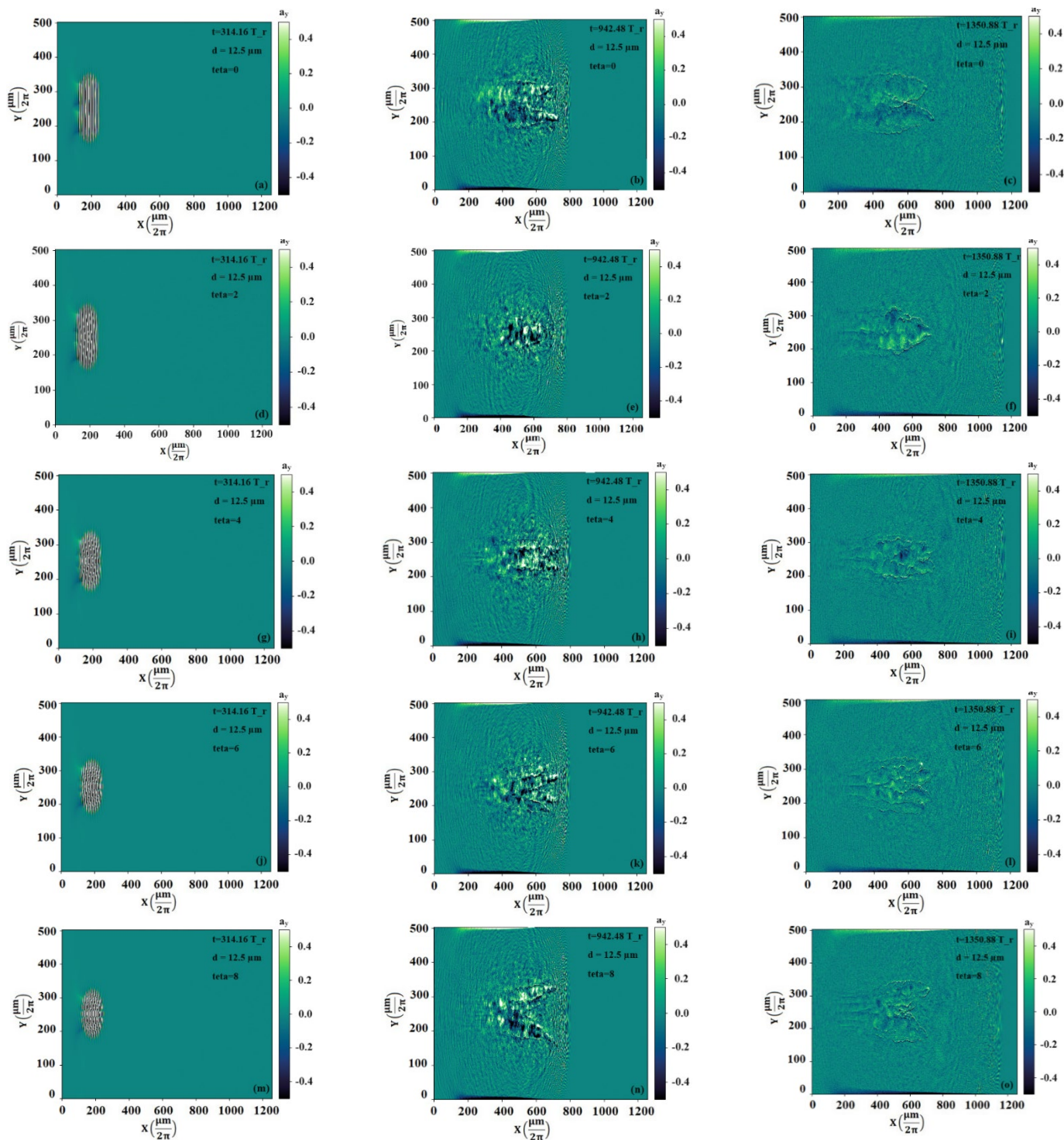
شکل ۳. تحول فضایی- زمانی چگالی پلازما در زمان‌های مختلف به ازای فاصله‌های مختلف دو باریکه لیزر.



زمانی چگالی است. در ابتدا، انتظار می‌رود با افزایش زاویه، دو کانال اصلی به صورت واگراتر شکل بگیرند. این در حالی است که بر خلاف انتظار، همان‌گونه که در شکل ۵(a-c) مشاهده می‌شود در حالی که به ازای $\theta = 0^\circ$ ، دو کانال مجزا ایجاد شده و در پلاسما پیش‌روی می‌کنند، با افزایش زاویه به $\theta = 2^\circ$ ، (شکل ۵(d-f))، کانال‌ها با هم ادغام شده و منجر به تشکیل یک تک کانال عریض چگالی می‌شود.

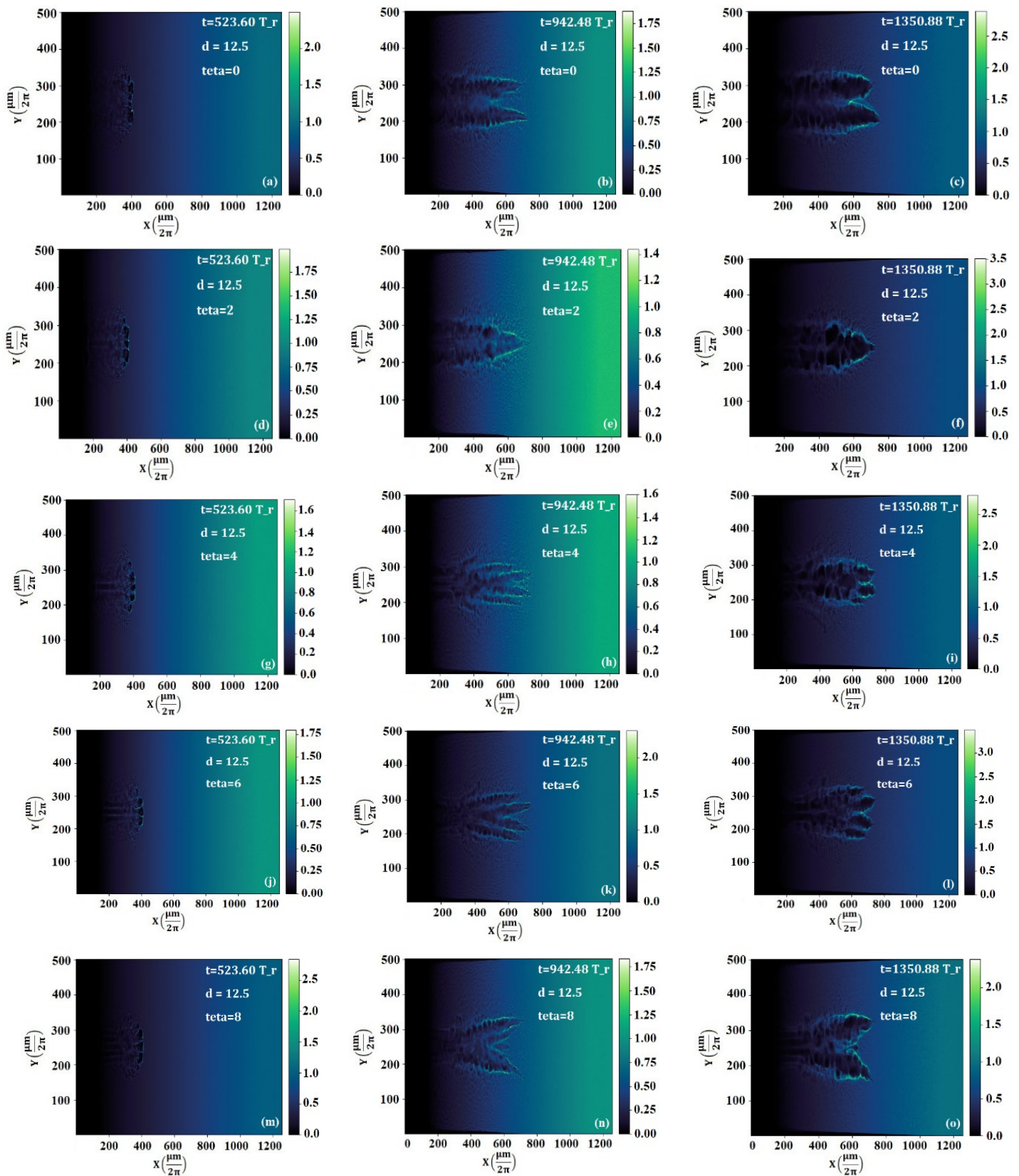
۲.۳ تأثیر تغییرات زاویه بر رشته‌ای شدن پرتوها

شکل ۴، تحول فضا-زمانی توزیع دامنه عرضی میدان لیزر را در درون پلاسما به ازای زوایای مختلف $0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ ، برای یک فاصله $d = 12.5 \mu\text{m}$ در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. در شکل‌های ۴ (a-m) مشاهده می‌شود در زمان اولیه ورود باریکه‌ها به پلاسما، دو کانال مجزای ایجاد شده در شکل ۴-a با افزایش زاویه نسبی بین دو باریکه با هم ادغام می‌شوند که این موضوع در سازگاری با شکل ۵، تحول فضا-



شکل ۴. تحول فضایی-زمانی توزیع دامنه عرضی میدان لیزر در زمان‌های مختلف به ازای زوایای مختلف.





شکل ۵. تحول فضایی- زمانی چگالی پلازما در زمان‌های مختلف به ازای زوایای مختلف.

قابل توجهی اتفاق می‌افتد و تعداد بیشتری کانال درون پلازما مشاهده می‌شود که ناشی از تجزیه دو کانال اولیه مجاور لیزر به گستره‌های متعدد الکترونی و یونی است که با افزایش زمان در

با افزایش زاویه به زوایای میانی در این شبیه‌سازی، $\theta = 4^\circ$ و $\theta = 6^\circ$ ، در زمان ابتدایی و در زمان‌های میانی برهم‌کنش (در شکل ۵-h)، رشته‌ای شدن باریک‌ها به صورت ملموس و



مشاهده می‌شود که ناشی از تجزیه دو کانال اولیه مجاور لیزر به گستره‌های متعدد الکترونی و یونی است که با افزایش زمان در نهایت با هم ادغام شده و سپس به دو کانال اولیه در مجاورت لیزر تبدیل می‌شوند، که این موضوع نیز قابل‌توجه است. با افزایش زاویه به $\theta = 8^\circ$ ، تعداد رشته‌های فرعی کاهش می‌یابد.

مراجع

1. Campbell P.T, Walsh C.A, Russell B.K, Chittenden J.P, Crilly A, Fiksel G, Gao L, Igumenschev I.V, Nilson P.M, Thomas A.G.R, Krushelnick K, Willingale L. Measuring magnetic flux suppression in high-power laser-plasma interactions. *Phys. Plasmas*. 2022 January; 29(1): 012701. doi.org/10.1063/5.0062717.
2. Wilson R, King M, Butler N.M.H, Carroll D.C, Frazer T.P, Duff M.J, Higginson A, Dance R.J, Jarrett J, Davidson Z.E, Armstrong C.D, Liu H, Hawkes S.J, Clarke R.J, Neely D, Gray R.J, McKenna P. Influence of spatial-intensity contrast in ultraintense laser-plasma interactions. *Scientific Reports*. 2022 Feb;12(1):1910. DOI: 10.1038/s41598-022-05655-4. PMID: 35115579; PMCID: PMC8814164.
3. Huller S, Raj G, Rozmus W, Pesme D. Crossed beam energy transfer in the presence of laser speckle ponderomotive self-focusing and nonlinear sound waves. *Phys. Plasmas*. 2020;27:022703.
4. Myatt J.F. Multiple-beam laser-plasma interactions in inertial confinement fusion. *Physics of Plasmas*. 2014;21:055501.
5. Debus A, Pausch R, Huebl A, Steiniger K, Wiedera R, Cowan T.E, Schramm U, Bussmann M. Circumventing the Dephasing and Depletion Limits of Laser-Wakefield Acceleration. *Physical Review*. 2019; X 9:031044.
6. Ferri J, Siminos E, Fülöp T. Enhanced target normal sheath acceleration using colliding laser pulses. *Communications Physics*. 2019;2:40.
7. Yang L, Deng Z, Zhou C.T, Yu M.Y, Wang X. High-charge energetic electron bunch generated by intersecting laser pulses. *Phys. Plasmas*. 2013;20:033102.
8. Deng Z.G, Zhang Z.M, Zhang B, He S.K, Teng J, Hong W, Dong K.G, Wu Y.C, Zhu B, Gu Y.Q. Large-charge quasimonoenergetic electron beams produced by off-axis colliding laser pulses in underdense plasma. *Physical Review E*. 2017;95:023206.
9. Zhang P, Saleh N, Chen S, Sheng Z.M, Umstadter D. Laser-Energy Transfer and Enhancement of Plasma Waves and Electron Beams by Interfering High-Intensity Laser Pulses. *Phys. Rev. Lett*. 2003;91:225001.
10. Gizzi L.A, Boella E, Labate L, Baffigi F, Bilbao P.J, Brandi F, Cristoforetti G, Fazzi A, Fulgentini L, Giove D, Koester P, Palla D, Tomassini P. Enhanced laser-driven proton acceleration via improved fast electron heating in a controlled pre-plasma. *Scientific Reports*. 2021;11:13728.

نهایت با هم ادغام شده و سپس به دو کانال اولیه در مجاورت لیزر تبدیل می‌شوند، که این موضوع نیز قابل توجه است. با افزایش زاویه به $\theta = 8^\circ$ ، تعداد رشته‌های فرعی کاهش می‌یابد. موضوع رشته‌ای شدن و هم‌چنین به هم پیوستن کانال‌ها که در این بخش با تغییرات زاویه مشاهده شد، در ارتباط با پایداری انتشار پالس‌های پرتوان بسیار مهم می‌باشد. لذا این بررسی نشان می‌دهد که تغییرات زاویه نسبی بین دو باریکه و اثر آن در رشته‌ای شدن باریکه می‌تواند در زوایایی بر انتشار مؤثر و پایداری پالس پرتوان تأثیرات منفی داشته باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، دو باریکه پرشدت نسبیتی از میان پلاسماهای کم‌چگال عبور داده با تغییر فاصله و زاویه دو باریکه لیزر فرودی بر پلاسماهای کم‌چگال و همچنین تأثیرات آن بر رشته‌ای شدن باریکه لیزر در پلاسما با استفاده از کد شبیه‌سازی ذره در سلول SMILEI مطالعه شده است.

نتایج حاصل از بررسی تأثیرات پارامترهای همچون فاصله و زاویه دو باریکه لیزری بر رشته‌ای شدن باریکه لیزر در پلاسما نشان می‌دهد تغییرات نسبی زاویه دو باریکه تأثیر قابل‌توجه‌تری بر رشته‌ای شدن پلاسما دارد که موضوع تأثیر تغییرات پارامتر زاویه در مقاله قبلی ما، مرجع [۳۶] در نمودارهای تحولات فضا-زمانی میدان عرضی لیزر و چگالی پلاسما مطالعه نشده بود ضمن این‌که در مقاله حاضر نمایه چگالی پلاسما با یک شیب خطی تا سطح بحرانی پیش می‌رود و همین موضوع منجر به فیزیک متفاوت رشته‌ای شدن باریکه‌های در سیر چگالی شده است. نتایج نشان می‌دهند، تغییر فاصله نسبی باریکه‌ها در یک زاویه ثابت معین، تأثیر چندانی بر رشته‌ای شدن باریکه‌ها ندارد. به طوری‌که، به ازای مقدار زاویه ثابت $\theta = 0^\circ$ ، که بیشترین آهنگ فرسایش باریکه‌ها مشاهده می‌شود با افزایش فاصله بین دو باریکه رشته‌ای شدن باریکه‌ها شروع شده و مقدار آن افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، به ازای فاصله معینی از دو پالس، با افزایش زاویه بین دو باریکه‌ها رشته‌ای شدن باریکه‌ها افزایش می‌یابد به طوری‌که در زوایای میانی $\theta = 4^\circ, 6^\circ$ ، بیشترین تعداد کانال‌های رشته‌ای مشاهده می‌شود. مشاهده می‌شود در حالی که به ازای $\theta = 0^\circ$ ، دو کانال مجزا ایجاد شده و در پلاسما پیشروی می‌کنند، با افزایش زاویه به $\theta = 2^\circ$ ، کانال‌ها با هم ادغام شده و منجر به تشکیل یک تک کانال عریض چگالی می‌شود. با افزایش زاویه به زوایانی میانی در این شبیه‌سازی، $\theta = 4^\circ$ و $\theta = 6^\circ$ ، در زمان ابتدایی و در زمان‌های میانی برهم‌کنش رشته‌ای شدن باریکه‌ها به صورت ملموس و قابل‌توجهی اتفاق می‌افتد و تعداد بیشتری کانال درون پلاسما



11. Labaune C, Baldis H.A, Cohen B, Rozmus W. Nonlinear modification of laser-plasma interaction processes under crossed laser Beams. *Physics of Plasmas*. (1994-present). 1999;6:2048.
12. Sheng Z.-M, Zhang J, Umstadter D. Plasma density gratings induced by intersecting laser pulses in underdense plasmas. *Applied Physics B*. 2003;77:673-680.
13. Yazdanpanah J. Self-modulation and scattering instability of a relativistic short laser pulse in an underdense plasma. *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2019;61:085021.
14. Albert F, Ccoupric M.E, Debus A, Downer M.C, Faure J, Flacco A, Gizzi L.A, Grismayer T, Huebl A, Joshi C, Labat M, Leemans W.P, Maier A.R, Mangles S.P.D, Mason P, Mmathieu F, Muggli P, Nishiuchi M, Osterhoff J, ... Zeil K. 2020 roadmap on plasma accelerators. *New Journal of Physics*. 2021;23(3).
15. Pukhov A, Sheng Z.M, Meyer-Ter-Vehn J. Particle acceleration in relativistic laser channels. *Phys. Plasmas*. 1999;6:2847.
16. Yang L, Deng Z.G, Zhou C.T, Yu M.Y, Wang X.G. High-charge energetic electron bunch generated by intersecting laser pulses. *Phys. Plasmas*. 2013;20:033102. DOI: 10.1063/1.4794352.
17. Wallin E, Gonoskov A, Marklund M. Radiation emission from braided electrons in interacting wakefields. *Phys. Plasmas*. 2017;24:093101. Doi: 10.1063/1.4997440.
18. Huang T.W, Zhou C.T. Electron acceleration induced by interaction of two relativistic laser pulses in underdense plasmas. *Physical Review E*. 2018;98:053207.
19. Epperlein E.M. Kinetic theory of laser fomentation in plasmas. *Physical Review Letters*. 1990;65.
20. Kaw P.K, Schmidt G, Wilcox T. Filamentation and trapping of electromagnetic radiation in plasmas. *Phys. Fluids*. 1973;16:1522. Doi: 10.1063/1.1694552.
21. Estabrook K, Kruer W.L, Bailey D.S. Two-dimensional ray-trace calculations of thermal whole beam self-focusing. *Phys. Fluids*. 1985;28:19. Doi: 10.1063/1.865180.
22. Cohen B.I, Max C.E. Stimulated scattering of light by ion modes in a homogeneous plasma: Space-time evolution. *Phys. Fluids*. 1979;22:1115. Doi: 10.1063/1.862713.
23. Tripathi V.K, Pitale L.A. Filamentation of a laser beam in a collisional plasma. *J. Appl. Phys*. 1977;48:3288. Doi: 10.1063/1.324209.
24. Berger R.L, Lasinski B.F, Kaiser T.B, Williams E.A, Langdon A.B, Cohen B.I. Theory and three-dimensional simulation of light filamentation in laser-produced plasma. *Physics of Fluids B: Plasma Physics*. (1989-1993). 1993;5:2243. doi: 10.1063/1.860758.
25. Young P.E. Experimental observation of filamentation growth in laser-produced plasmas. *Physics of Plasmas*. 1995;2:2815. doi: 10.1063/1.871179.
26. Labaune C, Baton S, Jalinaud T, Baldis H.A, Pesme D. Filamentation in long scale length plasmas: experimental evidence and effects of laser spatial incoherence. *Physics of Fluids B: Plasma Physics*. (1989-1993). 1992;4:2224. doi:10.1063/1.860027.
27. Kruer W.L. Ponderomotive and thermal filamentation of laser light. *Comments Plasma Phys. Controlled Fusion*. 1985;9:63.
28. Kruer W.L. The physics of laser plasma interactions. *Addisonwesley*. New York. 1988.
29. Giacone R.E, McKinstrie C.J, Betti R. Angular dependence of stimulated Brillouin scattering in homogeneous plasma. *Phys. Plasmas* 1 December. 1995. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.871464>.
30. Andrew J. Schmitt. Three-dimensional filamentation of light in laser plasmas. *Phys. Fluids B* 1 January 1991. Doi: 10.1063/1.859936.
31. Sodha M.S, Ghatak A.K, Tripathi V.K. In progress in optics. Edited by e. Wolf (north holland. Amsterdam, 1976), 13:170. V.K. Tripathi, Pitale L.A. 1. *Appl. Phys*. 1977;48:3288.
32. Kent Estabrook, Kruer W.L, Bailey D.S. Two-dimensional ray-trace calculations of thermal whole beam self-focusing. *Phys. Fluids* 1 January. 1985;28:1. Doi: 10.1063/1.865180.
33. Babati L.J, Farmer W.A, Berger R.L, Belyaev M.A, Chapman T, Hinkel D.E, Kur E, Williams E.A. Simulating the filamentation of smoothed laser beams with three-dimensional nonlinear dynamics. *AIP Advances*. 2022;12:095005. Doi: 10.1063/5.0090057.
34. Singh M, Mahmoud S.T, Sharma R.P. Generation of THz Radiation from Laser Beam Filamentation in a Magnetized Plasma. *Plasma Phys*. 2012;52(4):243-250. DOI: 10.1002/ctpp.201100058.
35. Wei M.S, Beg F.N, Clark E.L, Dangor A.E, Evans R.G, Gopal A, Ledingham K.W.D, McKenna P, Norreys P.A, Tatarakis M, Zepf M, Krushelnick K. Observations of the filamentation of high-intensity laser-produced electron beams. *Physical Review E*. 2004;70:056412. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.056412.
36. Ghasemi S.A, Pishdast M, Yazdanpanah J. Study on the electron acceleration in the interaction of two relativistic laser beams with under-dense plasma. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2022;99(2).

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

قاسمی، سید ابوالفضل، لواسانی، مطهره، پیشدست، مسعود، رضایی، فاطمه، یزدان‌پناه، جمال‌الدین. (۱۴۰۳)، شبیه‌سازی ذره‌ای رشته‌ای شدن باریکه‌های لیزر در برهم‌کنش دو باریکه نسبیتی با پلاسمای کم چگال. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۰۹ (۳)، ۱۶۴-۱۷۳. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1612>

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1612.html

