مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲۶، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۵
DOI: 10.47176/ijpr.26.2.22246

نقش هندسهٔ هدف در تقویت میدان مغناطیسی تولیدشده در برهم‌کنش لیزر–پلاسما با استفاده از شبیه‌سازی PIC دوبعدی

فاطمه شاهی[۱]، مهدی شریفیان[۱*] و سهیل خوشبین‌فر[۲]

۱. بخش اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران، کد پستی: ۸۹۱۹۹۵-۷۴۱

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، کد پستی: ۴۱۳۳۵-۱۹۱۴

پست الکترونیکی: mehdi.sharifian@yazd.ac.ir

(دریافت مقاله:۱۴۰۴/۰۹/۲۹ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹)

چکیده:

در این پژوهش، اثر هندسهٔ هدف بر تقویت میدان مغناطیسی در برهم‌کنش لیزر پرشدت با پلاسما با استفاده از شبیه‌سازی دوبعدی ذره در–سلول (PIC) به‌کمک دستور EPOCH بررسی شده است. دو پیکربندی هدف پلاسمایی شامل هدف مخروط دوگانه و هدف قوس‌مانند در نظر گرفته شده‌اند، درحالی‌که تمامی پارامترهای لیزر، شرایط محاسباتی و ویژگی‌های پلاسما در هر دو حالت یکسان نگه داشته شده‌اند. تحول زمانی و توزیع فضایی میدان مغناطیسی تولید شده، انرژی ذرات و مؤلفه‌های میدان الکتریکی تحلیل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ورقهٔ قوس‌مانند نسبت به هدف مخروط دوگانه میدان مغناطیسی قوی‌تر، متمرکزتر و با پایداری زمانی بیشتر تولید می‌کند. این تقویت با بهبود محصورسازی الکترون‌ها، افزایش چگالی جریان محوری و کاهش واگرایی شعاعی الکترون‌ها همراه است. یافته‌ها بیانگر آن است که هندسهٔ هدف نقش کلیدی در کنترل پویایی جریان‌ها و تقویت میدان مغناطیسی در برهم‌کنش‌های لیزر–پلاسما ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی PIC، برهم‌کنش لیزر–پلاسما، شتاب‌دهی الکترون، جریان‌های محوری، تولید میدان مغناطیسی

۱. مقدمه

تولید میدان‌های مغناطیسی قوی در محیط پلاسما یکی از موضوعات بنیادی و در عین حال کاربردی در فیزیک پلاسما و برهم‌کنش لیزر–ماده به شمار می‌رود. این میدان‌ها نقش بسیار مهمی در درک پدیده‌های اخترفیزیکی، همجوشی هسته‌ای لختی، شتاب‌دهی ذرات، و کنترل پایداری پلاسما دارند [۱–۳]. در شرایط طبیعی، میدان‌های مغناطیسی بسیار قوی تنها در محیط‌های خاصی نظیر مگنتارها و ستاره‌های نوترونی یافت می‌شوند، اما در سال‌های اخیر ایجاد چنین میدان‌هایی در آزمایشگاه به کمک لیزرهای پرشدت مورد توجه گسترده قرار گرفته است [۴و۵]. توسعهٔ منابع لیزر با شدت‌های بالاتر از ۱۰ وات بر سانتی‌متر مربع این امکان را فراهم کرده است که در مقیاس‌های زمانی فمتوثانیه و پیکوثانیه، میدان‌های مغناطیسی بسیار قوی (در حد چند صد تسلا تا چند گیگا گاوس) در محیط‌های پلاسمایی ایجاد شوند [۶–۸]. این میدان‌ها عمدتاً حاصل حرکت ناهماهنگ الکترون‌ها، جریان‌های بازگشتی و ناپایداری‌های جریان در طول برهم‌کنش لیزر با پلاسما هستند [۹ و ۱۰]. به همین دلیل، شناخت سازوکارهای تولید و تقویت این میدان‌های مغناطیسی، یکی از چالش‌های اساسی در تحقیقات جدید پلاسما محسوب می‌شود.

در اغلب پژوهش‌های اولیه، از هندسه‌های ساده مانند صفحات تخت، میله‌های استوانه‌ای و لایه‌های یکنواخت پلاسما به‌عنوان هدف[۱] استفاده شده است [۱۱–۱۳]. با این حال، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که هندسهٔ هدف نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع جریان الکترونی، تمرکز انرژی، و در نتیجه شدت میدان مغناطیسی تولید شده دارد [۱۴–۱۶]. به طور خاص، استفاده از ساختارهای پیچیده‌تر مانند میکرولوله‌ها، ساختارهای مخروطی، تیغه‌ای و چندلایه‌ای می‌تواند منجر به افزایش چشم‌گیر شدت میدان مغناطیسی و بهبود پایداری آن گردد [۱۷–۱۹]. از سوی دیگر، به دلیل دشواری‌ها و هزینه‌های بالای انجام آزمایش‌های لیزر–پلاسما در شدت‌های فوق‌العاده بالا، شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر روش ذره در سلول[۲] به ابزار اصلی در تحلیل این نوع برهم‌کنش‌ها تبدیل شده‌اند [۲۰–۲۲]. این شبیه‌سازی‌ها امکان مطالعهٔ دقیق رفتار ذرات باردار، میدان‌های الکترومغناطیسی و ساختارهای جریان را در ابعاد زمانی و مکانی بسیار کوتاه فراهم می‌کنند. در بین دستورهای PIC، دستور EPOCH به‌عنوان یکی از ابزارهای معتبر و پرکاربرد، در مطالعات لیزر–پلاسما مورد استفادهٔ گسترده قرار گرفته است [۲۳].

در اغلب مطالعات پیشین، تولید میدان مغناطیسی در یک هندسهٔ مشخص مورد بررسی قرار گرفته و مقایسهٔ مستقیم اثر هندسهٔ هدف کمتر گزارش شده است. در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی PIC دوبعدی با دستور EPOCH، تولید و تقویت میدان مغناطیسی در دو ساختار پلاسمایی با هندسه‌های متفاوت شامل ساختار مخروطی و ساختار قوس‌مانند، تحت شرایط کاملاً یکسان لیزر و پلاسما بررسی و به‌صورت مقایسه‌ای تحلیل می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، بررسی نقش هندسهٔ هدف در تمرکز جریان‌های الکترونی، بازدهی انتقال انرژی از لیزر به پلاسما و شدت و پایداری میدان مغناطیسی تولیدشده است. ساختار اول دارای هندسه مخروطی است که مسیرهای متفاوتی برای انتقال جریان ایجاد می‌کند، درحالی‌که ساختار دوم دارای هندسه‌ای قوسی‌مانند در ناحیهٔ ورودی است که منجر به تمرکز جریان الکترونی می‌شود. کمیت‌های فیزیکی مهمی از جمله میانگین میدان مغناطیسی، میانگین انرژی ذرات و مؤلفه‌های میدان الکتریکی در راستاهای x و y در بازهٔ زمانی صفر تا ۱ پیکوثانیه و در گام‌های ۲۵۰ فمتوثانیه تحلیل شده‌اند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر هندسهٔ هدف بر میزان تقویت میدان مغناطیسی و بازدهی انتقال انرژی از لیزر به پلاسما است. نتایج این مطالعه می‌تواند در طراحی بهینهٔ ساختارهای هدف برای تولید میدان‌های مغناطیسی قوی‌تر در مقیاس آزمایشگاهی مؤثر واقع شود و در کاربردهایی نظیر شتاب‌دهی لیزری ذرات و همجوشی لختی استفاده شوند.

۲. روش شبیه‌سازی

در این پژوهش، به‌منظور بررسی نقش هندسهٔ هدف بر تقویت و تمرکز میدان مغناطیسی تولید شده، برهم‌کنش تپ لیزر پرشدت با دو نوع ساختار هدف در محیط پلاسما با استفاده از شبیه‌سازی ذره در سلول (PIC) دوبعدی و به کمک دستور EPOCH [۲۱]، مطالعه شده است. دو پیکربندی مورد بررسی عبارت‌اند از: (الف) پیکربندی مخروط دوگانه و (ب) پیکربندی مخروط یگانه به همراه ورقهٔ قوس‌مانند. در هر دو حالت، به‌منظور بررسی اثر خالص تغییر هندسه، سایر شرایط شبیه‌سازی یکسان در نظر گرفته شده‌اند.

۲–۱– دامنهٔ محاسباتی و شبکهٔ شبیه‌سازی

دامنهٔ محاسباتی در راستای محورهای x و y به‌ترتیب از ۲۰– میکرون تا ۷۰ میکرون و از ۲۳– میکرون تا ۲۳ میکرون در نظر گرفته شده است. این دامنه با شبکه‌ای شامل ۹۰۰×۷۰۰ سلول گسسته شده است. در هر سلول شبکه، به‌طور اسمی، برای هر گونه ذره (الکترون و یون) ۱۰ ذره در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود توزیع چگالی غیریکنواخت، تعداد مؤثر ذرات در برخی سلول‌ها می‌تواند اندکی تغییر کند. از این‌رو، از واژهٔ *متوسط* استفاده شده است. اندازهٔ سلول‌های مکانی برابر با میکرون Δx =۰/۱ و میکرون Δy=۰/۰۶ در نظر گرفته شده است. شرط کورانت در تمامی شبیه‌سازی‌ها رعایت شده و بررسی‌ها نشان می‌دهد که پاشندگی عددی در این شرایط ناچیز

۱. Target
۲. Particle-in-cell simulation (PIC)

بوده و تأثیر معناداری بر نتایج فیزیکی ندارد. زمان کل شبیه‌سازی برابر با ۱ پیکوثانیه و گام زمانی خروجی داده‌ها برابر با ۲۵۰ فمتوثانیه انتخاب شده است. شرط مرزی در سمت چپ دامنه به‌صورت ورودی لیزر[۱]، و در سایر جهات به‌صورت باز[۲] در نظر گرفته شده است تا بازتاب امواج الکترومغناطیسی و ذرات به حداقل برسد.

۲-۲- پارامتر های لیزر

تپ لیزر به‌صورت گاوسی در راستای فضایی و سوپرگاوسی در راستای زمانی در نظر گرفته شده است. پارامترهای اصلی لیزر به شرح زیر است:

طول موج میکرون ۱/۰۶=λ ، شدت بیشینه: وات بر سانتی‌متر مربع ۱۰۱۹×۱/۲=Imax، پهنای پرتو۳ میکرون ۰/۵=FWHM (برای پیکربندی (الف)) و میکرون ۸/۷۰=FWHM (برای پیکربندی (ب))، مدت تپ: ۱ پیکوثانیه، فاصلهٔ کانونی از مرز تابش۴: میکرون ۳۱/۶=focal distance (برای پیکربندی (الف)) و میکرون ۰/۸=focal distance (برای پیکربندی (ب)). نمای زمانی لیزر به‌صورت تابع سوپرگوسی در نظر گرفته شده و پرتو از سمت چپ دامنه وارد محیط شبیه‌سازی می‌شود.

۲-۳- معرفی هندسهٔ دو پیکربندی مورد بررسی

در این پژوهش، دو نوع ساختار هدف برای بررسی اثر هندسه بر رفتار پلاسما و میدان مغناطیسی تولید شده در نظر گرفته شده است. پیکربندی (الف): مخروط دوگانه؛ در این پیکربندی، ساختار هدف شامل دو مخروط هم‌محور است که با زاویهٔ گشودگی ۱۴/۹° مطابق با پیکربندی گزارش‌شده در مطالعات پیشین [۲۴] در نظر گرفته شده‌اند. این ساختار سبب تمرکز نسبی ذرات و انرژی لیزر در ناحیهٔ خروجی مخروط دوگانه می‌شود. این زاویه، بر اساس مطالعات پیشین به‌گونه‌ای انتخاب شده که تعادلی میان تمرکز جریان الکترونی و جلوگیری از افزایش ناپایداری‌های شدید برقرار شود. پیش پلاسمای کربنی به‌منظور جذب بیشتر انرژی لیزر، تولید میدان‌های قوی‌تر، شتاب‌دهی ذرات، شکل‌دهی سازمان یافته و تمرکز تپ لیزر، کنترل و تنظیم دینامیک الکترونی و پویایی کل پیکربندی در داخل مخروط داخلی در نظر گرفته شده است. ضخامت دیواره‌های مخروط برابر با ۵ میکرون و ضخامت گاف خلأ بین دیواره‌ها برابر با ۳ میکرون، مطابق با مرجع [۲۴]، انتخاب شده است تا میدان مغناطیسی بهینه تولید شود.

پیکربندی (ب): مخروط یگانه با ورقهٔ قوس‌مانند؛ در این حالت، مخروط مرکزی یگانه به‌همراه ورقهٔ قوس‌مانند در داخل آن قرار داده شده است. در این پیکربندی پیش پلاسما در قسمت پشتی ورقهٔ قوس‌مانند در مقابل تابش لیزر در نظر گرفته شده است. این پوسته دارای شعاع داخلی ۲۱ میکرون و شعاع خارجی ۲۴ میکرون و ضخامت یکنواخت ۳ میکرون است که منجر به تغییر مسیر جریان الکترونی و در نتیجه افزایش پیچیدگی و شدت جریان‌های حلقوی می‌شود. این ساختار از نظر ضخامت با ابعاد تیغه‌ها در پیکربندی مخروط دوگانه قابل مقایسه است. در هر دو پیکربندی، چگالی اولیه پلاسما برابر با $n=۴۰n_{cr}$ در نظر گرفته شده است که در آن $n_{cr}=۱۰^{۲۱}\times۱/۱$ بر سانتی‌متر مکعب چگالی بحرانی است. برای اعمال شرایط پیش‌پلاسما، فرض شد که سطح داخلی مخروط داخلی با پلاسمای کربن–هیدروژن پوشیده شده است و چگالی این پیش‌پلاسما از مقدار بیشینهٔ معادل ۱۰۰ برابر چگالی بحرانی ($۱۰۰\ n_c$) به‌صورت تدریجی تا مقدار ۰/۱ برابر چگالی بحرانی ($۰/۱\ n_c$) کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل‌های ۱. (الف) و ۱. (ب) مشاهده می‌شود، تنها تفاوت اصلی دو پیکربندی در ساختار هندسی داخلی هدف است.

ساختار مخروطی به‌عنوان یک هندسهٔ مرجع انتخاب شده است، زیرا در مطالعات پیشین نشان داده شده که این ساختار می‌تواند موجب هدایت و تمرکز الکترون‌های داغ به ناحیهٔ محوری شود. در مقابل، ساختار قوس‌مانند به‌منظور بررسی اثر تمرکز تدریجی‌تر جریان‌های الکترونی و کاهش گرادیان‌های شدید جریان انتخاب

۱. Simple laser
۲. Open
۳. Full width at half-maximum (FWHM)
۴.Focal distance

شده است. انتظار می‌رود این هندسه با کاهش ناپایداری‌های موضعی، به پایداری بیشتر میدان مغناطیسی منجر شود.

۲-۴- گونه‌های پلاسمایی

در شبیه‌سازی حاضر، گونه‌های زیر برای الگوسازی مادهٔ هدف در نظر گرفته شده‌اند: الکترون‌ها، و یون‌های طلا با بار $Au^{+۴۰}$. این گونه‌ها در هر دو پیکربندی، در ساختارهای مخروطی و استوانه‌ای در نظر گرفته شده‌اند. استفاده از یون‌های سنگین طلا منجر به پایداری ساختار هدف پلاسمایی، جلوگیری از انفجار زود هنگام، تولید الکترون‌های بیشتر در پلاسما، افزایش نرخ یونش، کاهش گسترش و حفظ گرادیان‌ها، جذب انرژی بیشتر و تولید میدان‌های قوی‌تر می‌شود. وجود لایه‌های سبک (H و $C^{+۴۰}$) سبب افزایش تولید الکترون‌های پرانرژی و تشدید جریان‌های سطحی در ساختار هدف می‌شود که نقش مهمی در تولید میدان مغناطیسی ایفا می‌کنند. جرم یون‌های طلا و کربن به‌ترتیب برابر با m_p ۱۹۷ و m_p ۱۲ است که در آن m_p جرم حالت سکون پروتون است. توزیع چگالی این گونه‌ها بر اساس موقعیت مکانی و هندسهٔ هر پیکربندی تعریف شده است، به‌گونه‌ای که در نواحی داخل مخروط و مجاورت پیش پلاسما (داخل مخروط دوگانه در پیکربندی (الف) و در قسمت پشت ورقهٔ قوسی‌شکل در پیکربندی (ب))، چگالی به‌صورت غیریکنواخت و تابعی از مختصات شعاعی و محوری است که این امر بر پویایی پلاسما تأثیر قابل‌توجهی دارد.

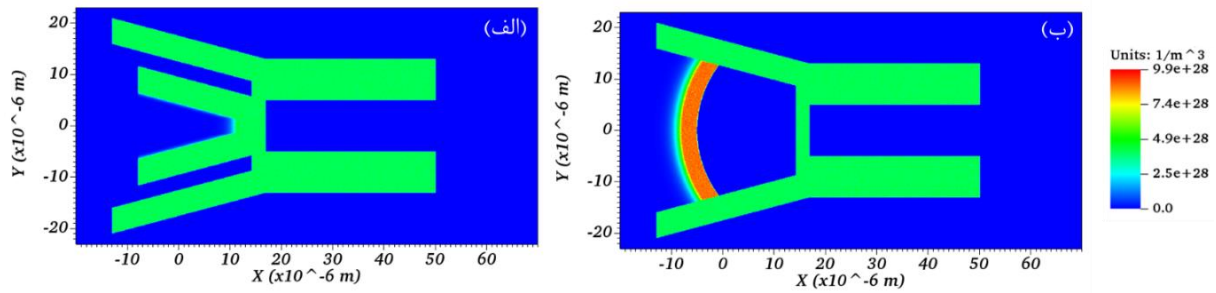
۳. نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از برهم‌کنش تپ لیزر پرشدت با دو پیکربندی هدف بررسی و مقایسه می‌شود. تمرکز اصلی تحلیل، بررسی سازوکار تولید میدان مغناطیسی، شدت آن و نحوهٔ توزیع فضایی آن در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی است. تحلیل‌ها در چهار زمان شاخص t=۲۵۰ فمتوثانیه، ۵۰۰ فمتوثانیه، ۷۵۰ فمتوثانیه و t=۱ پیکوثانیه انجام شده‌اند که نشان‌دهندهٔ مراحل مختلف نفوذ لیزر، شتاب‌گیری الکترون‌ها و شکل‌گیری جریان‌های حلقوی در پلاسما هستند.

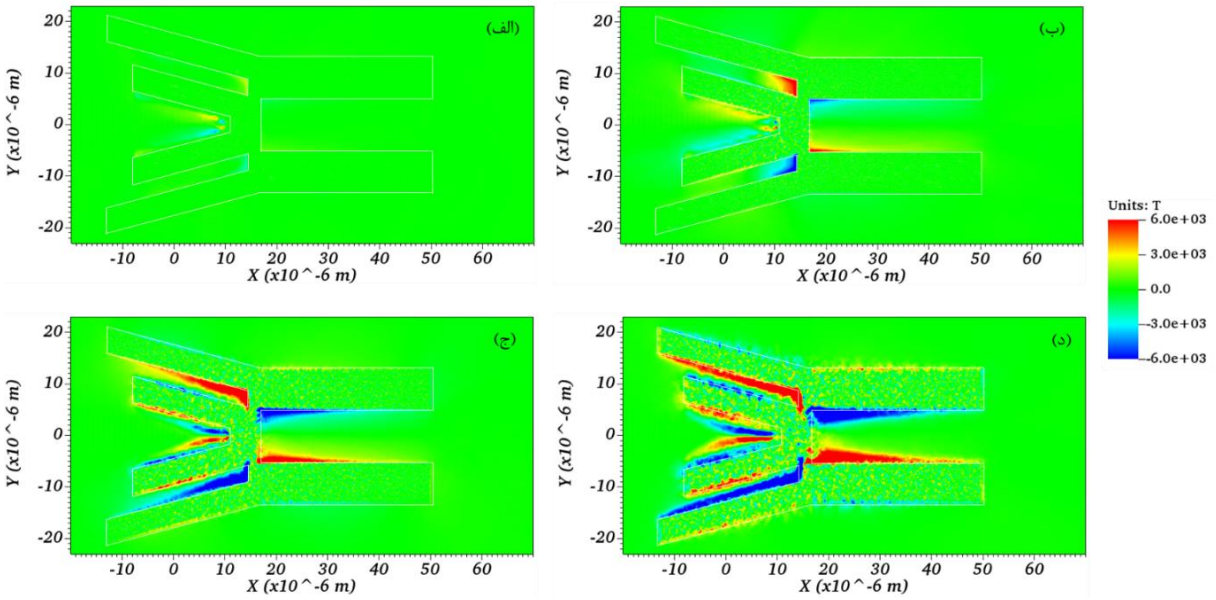
۳-۱- تحول زمانی میدان مغناطیسی تولید شده

پس از آغاز برهم‌کنش پرتو لیزر با پلاسما، توزیع جریان‌های الکترونی ناهمگن و گرادیان‌های شدید چگالی و دما منجر به پیدایش میدان‌های مغناطیسی در محیط می‌شود. این میدان‌ها که منشأ اصلی آن‌ها ناپایداری‌های جریانی و اثر گرادیان فشار الکترونی است، در بازه‌های زمانی اولیه تغیرات سریع زمانی و فضایی از خود نشان می‌دهند و دچار تغییرات سریع می‌شوند. به‌منظور بررسی روند شکل‌گیری و تحول این میدان‌ها، توزیع میدان مغناطیسی در چهار زمان مختلف از شبیه‌سازی برای هر دو پیکربندی(الف) و (ب) استخراج و تحلیل شده است.

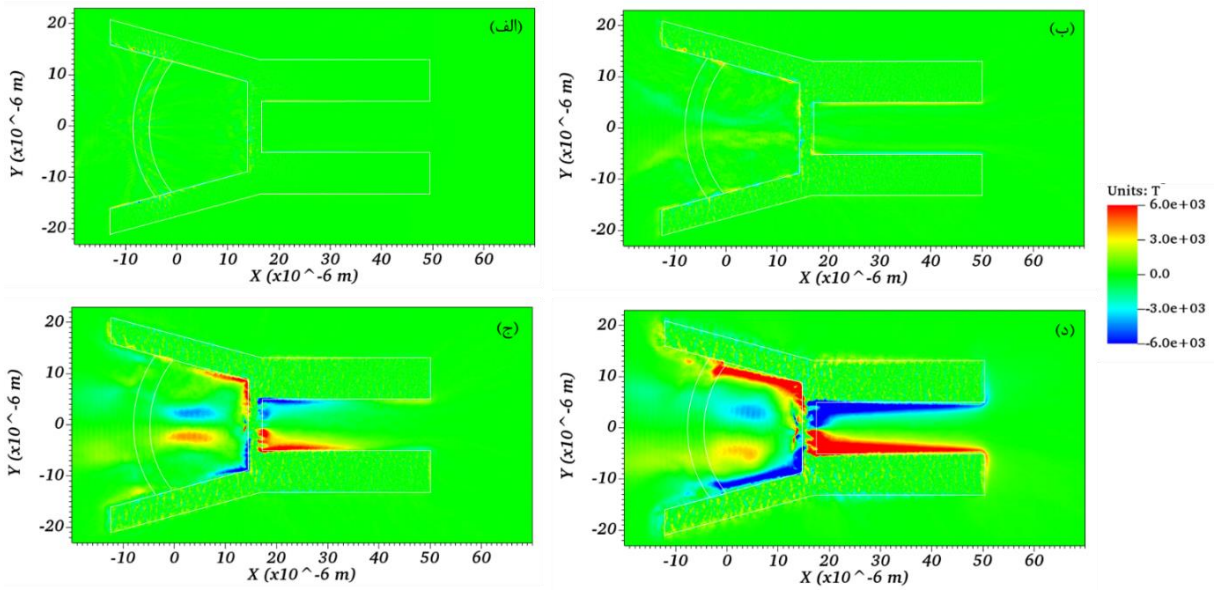
در پیکربندی (الف)، مطابق با شکل ۲، در زمان‌های اولیه پس از برخورد تپ لیزر به هدف، نواحی کوچکی از میدان مغناطیسی در اطراف محور برهم‌کنش مشاهده می‌شود که ناشی از حرکت‌های دسته‌جمعی الکترون‌ها و تشکیل جریان‌های حلقوی است. با گذشت زمان، این نواحی به‌تدریج گسترش یافته و شدت میدان افزایش می‌یابد. در مراحل بعدی، میدان مغناطیسی به ساختاری نسبتاً منظم‌تر با تمرکز بیشتر در ناحیهٔ مرکزی تبدیل می‌شود که نشان‌دهندهٔ تقویت پدیدهٔ همگرایی جریان‌ها و تشدید میدان ناشی از آن است. در مقابل، پیکربندی (ب)، مطابق با شکل ۳، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. وجود هندسهٔ اصلاح‌شده در این حالت، باعث تغییر در توزیع جریان‌های الکترونی و در نتیجه تغییر در الگوی میدان مغناطیسی می‌شود. در این پیکربندی، شدت میدان در بازه‌های زمانی میانی به‌طور محسوسی بیشتر از پیکربندی (الف) بوده و نواحی با میدان قوی‌تر در گسترهٔ بزرگ‌تری از فضا ظاهر می‌شوند. این رفتار نشان می‌دهد که ساختار هدف در کنترل و هدایت جریان‌های القایی نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند. به‌طور کلی، مقایسهٔ دو پیکربندی نشان می‌دهد که تغییر شکل هندسی هدف می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای افزایش شدت و بهبود همگرایی میدان مغناطیسی تولیدشده مورد استفاده قرار گیرد. این نتیجه با مطالعات پیشین در زمینهٔ هدایت و متمرکزسازی جریان الکترونی و تولید میدان مغناطیسی در پلاسماهای تحت تابش لیزرهای پرشدت هم‌خوانی دارد.



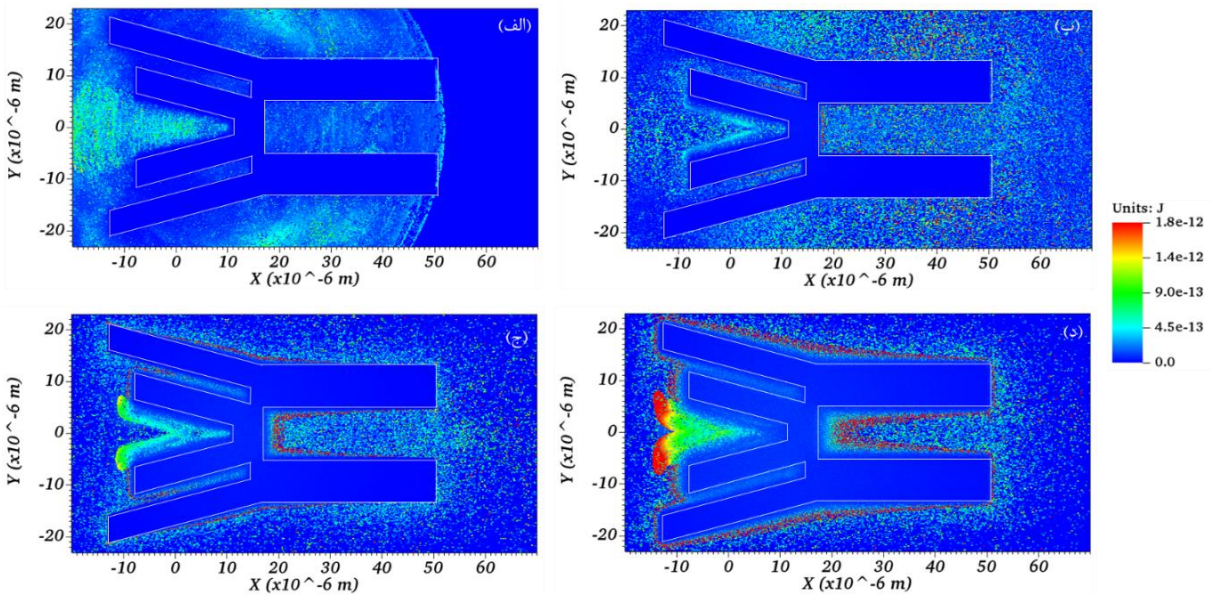
شکل ۱. طرح‌واره‌ای از هندسهٔ دو پیکربندی شبیه‌سازی‌شده، (الف) پیکربندی مخروط دوگانه، و (ب) پیکربندی مخروط یگانه با ورقهٔ قوس‌مانند.



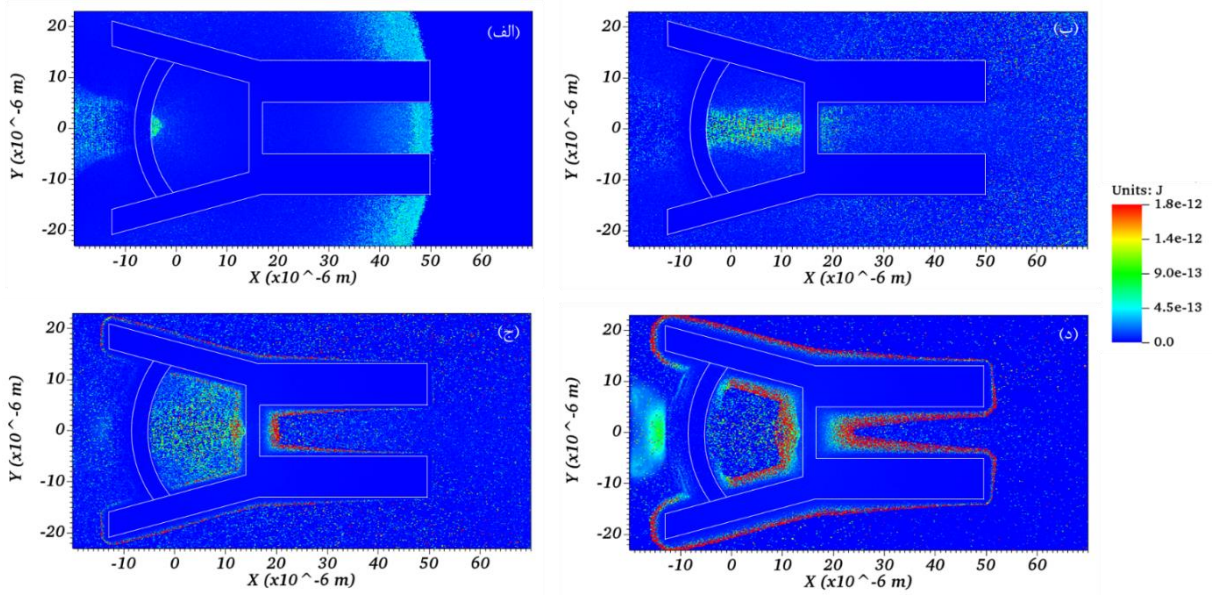
شکل ۲. میدان مغناطیسی تولید شده در پیکربندی (الف) در زمان‌های: (الف) t=۲۵۰ فمتوثانیه، (ب) t=۵۰۰ فمتوثانیه، (ج) t=۷۵۰ فمتوثانیه و (د) t=۱ پیکوثانیه.



شکل ۳. میدان مغناطیسی تولید شده در پیکربندی (ب) در زمان‌های: (الف) t=۲۵۰ فمتوثانیه، (ب) t=۵۰۰ فمتوثانیه، (ج) t=۷۵۰ فمتوثانیه و (د) t=۱ پیکوثانیه.



شکل ۴. میانگین انرژی ذرات در پیکربندی (الف) در زمان‌های: (الف) t=۲۵۰ فمتوثانیه، (ب) t=۵۰۰ فمتوثانیه، (ج) t=۷۵۰ فمتوثانیه و (د) t=۱ پیکوثانیه.



شکل ۵. میانگین انرژی ذرات در پیکربندی (ب) در زمان‌های: (الف) t=۲۵۰ فمتوثانیه، (ب) t=۵۰۰ فمتوثانیه، (ج) t=۷۵۰ فمتوثانیه و (د) t=۱ پیکوثانیه.

در این شبیه‌سازی‌ها، وجود پیش‌پلاسما قبل از رسیدن جبهه اصلی تپ لیزر از چند جهت حائز اهمیت است. پیش‌پلاسما با ایجاد گرادیان چگالی ملایم در سطح هدف، جذب انرژی را از طریق سازوکارهایی مانند جذب تشدیدی، گرمایش خلأ[۱] و گرمایش **J×B** افزایش می‌دهد.

شیب مناسب چگالی، امکان تولید الکترون‌های داغ‌تر و با انرژی بالاتر را فراهم می‌کند که برای رشد میدان مغناطیسی ضروری هستند. وجود گرادیان‌های همزمان دما و چگالی در پیش‌پلاسما منجر به رشد سریع‌تر میدان‌های مغناطیسی می‌شود. از آن‌جا که تقریباً در تمامی آزمایش‌های لیزر–پلاسما به دلیل پدیدهٔ گسیل خودبه‌خودی تقویت شده[۲] پیش‌پلاسما وجود دارد، بنابراین

۱. Vacuum heating
۲. Amplified spontaneous emission (ASE)

درنظرگرفتن آن، شبیه‌سازی را واقع‌بینانه‌تر و معتبرتر می‌سازد. شیب چگالی پلاسما در ناحیهٔ ورودی نقش مهمی در جذب انرژی لیزر و شتاب الکترون‌ها ایفا می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که وجود شیب چگالی موجب افزایش میانگین انرژی الکترون‌ها و توزیع یکنواخت‌تر انرژی در ناحیهٔ برهم‌کنش می‌شود. این فرآیند با تقویت جریان‌های الکترونی محوری، به افزایش شدت میدان مغناطیسی تولیدشده منجر می‌شود.

به‌کارگیری یون‌های سنگین مانند طلا در ساختار هدف مزایای متعددی دارد. یون‌های سنگین دیرتر از یون‌های سبک شتاب می‌گیرند، بنابراین شکل هندسی هدف مدت طولانی‌تری حفظ می‌شود. ضریب جذب لیزر در مواد سنگین بزرگ‌تر بوده و تولید الکترون‌های داغ بیشتر، زمینه‌ساز ایجاد جریان‌ها و میدان مغناطیسی قوی‌تر است. انبساط آهسته‌تر باعث می‌شود کانال جریان الکترونی در زمان طولانی‌تری پایدار بماند و میدان مغناطیسی فرصت بیشتری برای رشد داشته باشد.

۳-۲- میانگین انرژی ذرات و ارتباط آن با ساختار میدان

برای بررسی دقیق‌تر تفاوت دینامیک انرژی در دو پیکربندی، میانگین انرژی ذرات شبیه‌سازی‌شده محاسبه و مقایسه شد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مطابق با شکل‌های ۴ و ۵، در پیکربندی (ب) افزایش قابل‌توجه‌تری در میانگین انرژی ذرات نسبت به پیکربندی (الف) مشاهده می‌شود. این موضوع به‌طور مستقیم با شدت بیشتر میدان الکتریکی و مغناطیسی در این پیکربندی مرتبط است. در واقع، میدان‌های قوی‌تر باعث شتاب‌گیری مؤثرتر ذرات و انتقال انرژی بیشتر از میدان لیزر به پلاسما می‌شوند. از سوی دیگر، شیب افزایش انرژی در پیکربندی (ب) در بازهٔ زمانی اولیه تندتر است که نشان می‌دهد فرآیند جذب انرژی در این حالت کارآمدتر است. این ویژگی می‌تواند در کاربردهایی مانند شتاب‌دهی ذرات و تولید منابع تابشی پرتوان بسیار حائز اهمیت باشد. ارتباط میان افزایش انرژی ذرات و تقویت میدان مغناطیسی نیز قابل توجه است؛ زیرا جریان‌های پرانرژی‌تر منجر به ایجاد میدان‌های مغناطیسی قوی‌تر شده و یک چرخهٔ تقویت‌کننده بین این دو کمیت فیزیکی شکل می‌گیرد.

۳-۳- توزیع میدان الکتریکی در راستای x و y

۳-۳-۱- مؤلفهٔ E_x

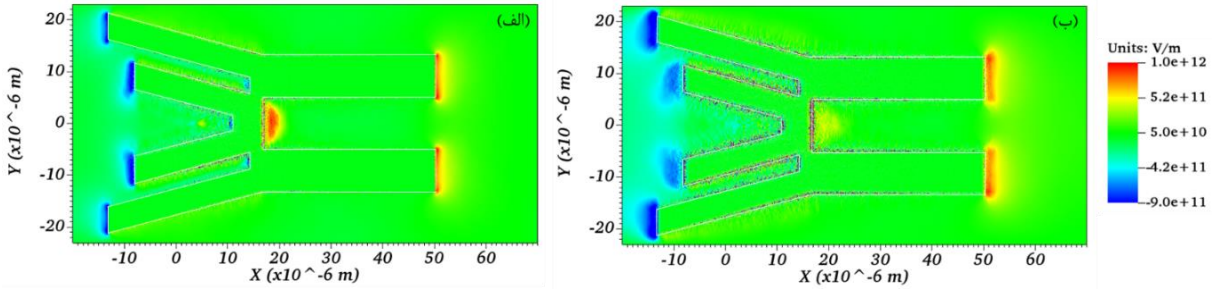
برای تحلیل دقیق‌تر ساختار میدان الکتریکی، مؤلفهٔ افقی میدان الکتریکی (E_x) در دو زمان مشخص برای هر دو پیکربندی بررسی شده است.

در پیکربندی (الف)، میدان E_x عمدتاً در نواحی مجاور محور انتشار لیزر متمرکز است و تقارن نسبی در توزیع آن مشاهده می‌شود که در شکل ۶. (الف) آورده شده است. با گذشت زمان، دامنهٔ میدان کاهش یافته و به سمت نواحی بیرونی‌تر گسترش می‌یابد که ناشی از پخش بارهای الکتریکی در محیط پلاسما است و در شکل ۶. (ب) آورده شده است. اما در پیکربندی (ب) در شکل ۷، دامنهٔ میدان E_x در همان بازه‌های زمانی بزرگ‌تر بوده و ساختار نامتقارن‌تری دارد که بیانگر توزیع پیچیده‌تر بار و وجود گرادیان‌های شدیدتر پتانسیل الکتریکی در این حالت است. این ویژگی نقش مهمی در شکل‌گیری جریان‌های قوی‌تر و در نتیجه افزایش میدان مغناطیسی دارد.

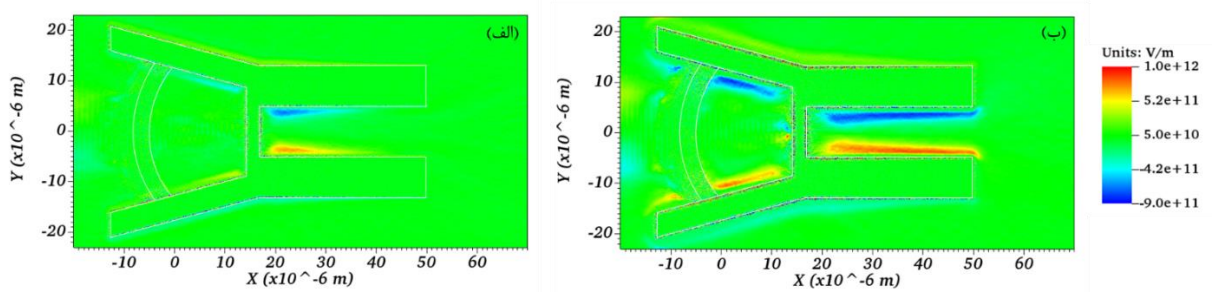
۳-۳-۲- مؤلفهٔ E_y

به‌طور مشابه، مؤلفهٔ عمودی میدان الکتریکی (E_y) نیز برای بررسی اثرات هندسهٔ هدف بر ساختار میدان بررسی شده است. توزیع میانگین میدان الکتریکی در زمان‌های t=۷۵۰ فمتوثانیه و t=۱t پیکوثانیه برای پیکربندی (الف) در شکل ۸ و برای پیکربندی (ب) در شکل ۹ آورده شده است.

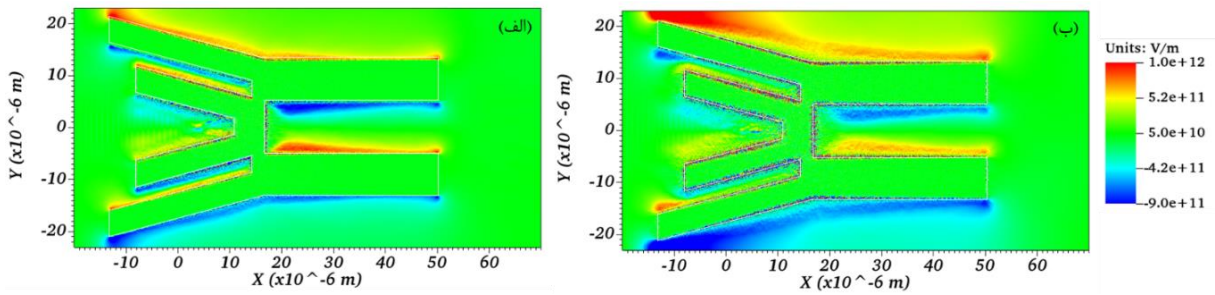
نتایج نشان می‌دهد که در پیکربندی (الف)، میدان E_y نسبت به E_x از شدت کمتری برخوردار است و توزیع آن نسبتاً یکنواخت‌تر است. در مقابل، در پیکربندی (ب) الگوهای پیچیده‌تری از میدان E_y مشاهده می‌شود که ناشی از خمیدگی مسیر حرکت الکترون‌ها و تمرکز موضعی بارهای الکتریکی است. این تفاوت در ساختار میدان E_y نیز تأیید کنندهٔ نقش کلیدی هندسهٔ هدف در کنترل توزیع میدان‌های الکترومغناطیسی است.



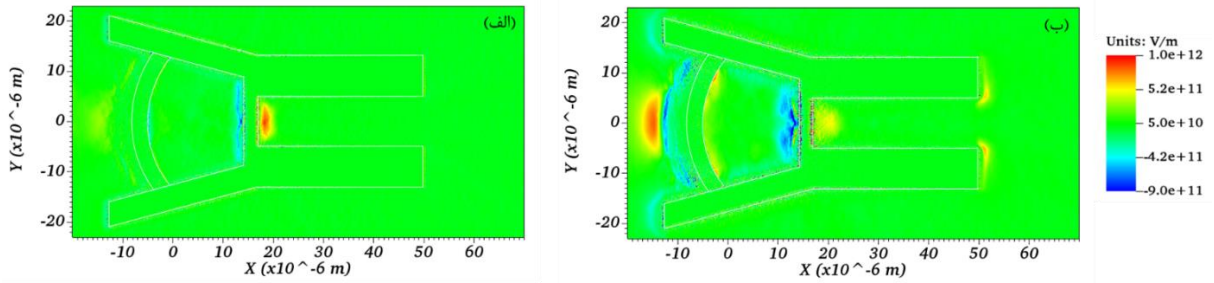
شکل ۶. توزیع میدان الکتریکی E_x پیکربندی (الف) در زمان‌های: (الف)t=۷۵۰ فمتوثانیه، و (ب) t=۱ پیکوثانیه.



شکل ۷. توزیع میدان الکتریکی E_x پیکربندی (ب) در زمان‌های: (الف)t=۷۵۰ فمتوثانیه، و (ب) t=۱ پیکوثانیه.



شکل ۸. توزیع میدان الکتریکی E_y پیکربندی (الف) در زمان‌های: (الف)t=۷۵۰ فمتوثانیه، و (ب) t=۱ پیکوثانیه.



شکل ۹. توزیع میدان الکتریکی E_y پیکربندی (ب) در زمان‌های: (الف)t=۷۵۰ فمتوثانیه، و (ب) t=۱ پیکوثانیه.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی‌های دوبعدی PIC در دستور EPOCH، نقش هندسهٔ هدف در فرایند تولید، تقویت و همگرایی میدان مغناطیسی تولیدشده در برهم‌کنش لیزر–پلاسما بررسی شد. مقایسهٔ دو پیکربندی هدف (پیکربندهای (الف) و (ب))، که تنها تفاوت آن‌ها در وجود یا عدم وجود بخش هدایتی و ساختار اصلاح‌شدهٔ هدف بود، امکان تحلیل مستقیم سازوکارهای فیزیکی مؤثر را فراهم ساخت.

نتایج تحول زمانی میدان مغناطیسی نشان داد که در هر دو پیکربندی، میدان اولیهٔ ناشی از جریان‌های داغ الکترونی، اثر

گرادیان فشار و ناهمگنی میدان‌های الکتریکی القایی است. با این حال، شدت، پایداری و همگرایی میدان در پیکربندی (ب) به‌طور محسوس‌تری بزرگ‌تر است. در پیکربندی (الف)، میدان پس از رشد اولیه به‌دلیل اتساع پلاسما و کاهش جریان‌های بازگشتی تضعیف می‌شود. ولی در پیکربندی (ب) میدان نه تنها افت نمی‌کند بلکه در زمان‌های دیرتر نیز تقویت شده و ساختار حلقوی پایدارتر و متمرکزتری تشکیل می‌دهد. مقایسهٔ میانگین انرژی الکترونی نیز این رفتار را تأیید می‌کند. در پیکربندی (ب) مقدار انرژی الکترونی در تمام زمان‌ها بیشتر است و شیب توزیع انرژی ملایم‌تر باقی می‌ماند، که نشان‌دهندهٔ بهبود فرآیند شتاب‌دهی و کاهش اتلاف عرضی انرژی است. این امر منجر به ایجاد جریان‌های بازگشتی قوی‌تر و در نتیجه میدان مغناطیسی شبه‌ایستای پایدارتر می‌شود. تحلیل میدان‌های الکتریکی E_x و E_y نیز نشان‌دهندهٔ نظم بیشتر، جهت‌مندی واضح‌تر و کاهش تلاطم میدان در پیکربندی (ب) است؛ عاملی که جریان‌های چرخشی را تقویت و سازوکار ایجاد میدان مغناطیسی را کارآمدتر می‌کند. افزون بر این، وجود پیش‌پلاسما در هر دو پیکربندی نقش مهمی در شکل‌دهی اولیهٔ جریان‌ها و جلوگیری از شوک ناگهانی انرژی لیزر ایفا کرده است. پیش‌پلاسما به‌عنوان محیطی با گرادیان چگالی ملایم‌تر، موجب بهبود جذب لیزر، افزایش حجم ناحیهٔ برهم‌کنش و فراهم‌شدن شرایط مناسب برای رشد ناپایداری‌های جریان–بازگشتی می‌شود. این اثرات در پیکربندی (ب) که هندسهٔ هدایت‌کننده نیز دارد، به‌صورت هم‌افزایی منجر به تقویت بیشتر میدان مغناطیسی شده است. همچنین به‌کارگیری یون‌های طلا به‌عنوان مادهٔ هدف، نقش قابل‌توجهی در پایداری ساختار و حفظ میدان داشته است. جرم بالای یون‌های طلا موجب کاهش اتساع هیدرودینامیکی و حفظ شکل هدف در بازه‌های زمانی طولانی‌تر می‌شود. از سوی دیگر، نسبت جرم به بار بالا موجب کاهش شتاب ناخواستهٔ یونی و در نتیجه تثبیت محیطی است که جریان‌های الکترونی در آن شکل می‌گیرند؛ موضوعی که به‌صورت غیرمستقیم به حفظ ساختار میدان مغناطیسی کمک می‌کند.

نکته نوآورانه این نتایج در آن است که با ثابت نگه‌داشتن تمامی پارامترهای لیزر و پلاسما، نشان داده می‌شود که صرفاً تغییر هندسهٔ هدف می‌تواند به تقویت قابل‌توجه میدان مغناطیسی و افزایش پایداری آن منجر شود. مقایسهٔ مستقیم دو ساختار مخروطی و قوس‌مانند نشان می‌دهد که هندسهٔ قوس‌مانند، بدون نیاز به افزایش شدت لیزر، میدان قوی‌تر و یکنواخت‌تری تولید می‌کند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی مهندسی‌شده هدف، شامل ساختار هدایتی، استفاده از مواد با جرم بالا و حضور پیش‌پلاسما، می‌تواند به‌صورت هم‌زمان موجب افزایش شدت، تمرکز و پایداری زمانی میدان مغناطیسی شود. این یافته‌ها چشم‌انداز روشنی برای طراحی اهداف پیشرفته جهت تولید میدان‌های مغناطیسی قوی (در حد گیگا گاوس) و کاربردهایی مانند هدایت الکترونی، محصورسازی پلاسما و بهبود بازدهی منابع تابشی پرانرژی فراهم می‌کند.

مراجع

1. T Tajima and J M Dawson, *Phys. Rev. Lett.* **43** (1979) 267.
2. P K Shukla and B Eliasson, *Rev. Mod. Phys.* **83** (2011) 885.
3. A R Bell and R J Kingham, *Phys Rev Lett* **91** (2003) 035003.
4. H Daido, M Nishiuchi and A S Pirozhkov, *Rep. Prog. Phys.* **75** (2012) 056401.
5. A Macchi, "A Superintense Laser-Plasma Interaction Theory Primer", Springer (2013).
6. S Li et al., *Nat. Phys.* **17** (2021) 1108.
7. F Fiuza et al., *Phys. Plasmas.* **27** (2020) 012702.
8. T G Blackburn et al., *Rev. Mod. Phys.* **92** (2020) 015002.
9. M Tatarakis et al., *Nature* **415** (2002) 280.
10. P M Nilson et al., *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 255001.
11. Y Sentoku and A J Kemp, *J. Comput. Phys.* **227** (2008) 6846.
12. K Quinn et al., *Plasma. Phys. Control. Fusion.* **54** (2012) 095007.
13. A Pukhov, *Rep. Prog. Phys.* **66** (2003) 47.
14. S Zhang et al., *High Power Laser Sci Eng* **10** (2022) e52.

15. D Wu et al., *Phys. Plasmas* **28** (2021) 033105.
16. R Singh et al., *Laser Part Beams* **38** (2020) 107.
17. X Wang et al., *Sci. Rep.* **13** (2023) 1452.
18. Q Zhao et al., *Matter Radiat Extremes* **7** (2022) 054401.
19. L Tian et al., *Plasma Phys. Rep.* **47** (2021) 326.
20. C K Birdsall and A B Langdon, "*Plasma Physics via Computer Simulation, McGraw–Hill"* (1985).
21. T D Arber et al., *Plasma Phys. Control Fusion* **57** (2015) 113001.
22. R A Fonseca et al., Lect. *Notes Comput Sci.* **2331** (2013) 342.
23. EPOCH Code Documentation, Version 4–5, University of Warwick and UK EPSRC (online technical documentation)
24. H B Cai, K Mima, W M Zhou, T Jozaki, H Nagatomo, A Sunahara and R J Mason, *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 245001.