

نقش هندسه هدف در تقویت میدان مغناطیسی تولیدشده در برهم کنش لیزر-پلازما با استفاده از شبیه سازی PIC دوبعدی

فاطمه شاهی^۱، مهدی شریفیان^{۱*} و سهیل خوشبین فر^۲

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

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

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

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

چکیده:

در این پژوهش، اثر هندسه هدف بر تقویت میدان مغناطیسی در برهم کنش لیزر پرشدت با پلازما با استفاده از شبیه سازی دوبعدی ذره در-سلول (PIC) به کمک دستور EPOCH بررسی شده است. دو پیکربندی هدف پلاسمایی شامل هدف مخروط دوگانه و هدف قوس مانند در نظر گرفته شده اند، درحالی که تمامی پارامترهای لیزر، شرایط محاسباتی و ویژگی های پلازما در هر دو حالت یکسان نگه داشته شده اند. تحول زمانی و توزیع فضایی میدان مغناطیسی تولید شده، انرژی ذرات و مؤلفه های میدان الکتریکی تحلیل شده اند. نتایج نشان می دهد که ورقه قوس مانند نسبت به هدف مخروط دوگانه میدان مغناطیسی قوی تر، متمرکزتر و با پایداری زمانی بیشتر تولید می کند. این تقویت با بهبود محصورسازی الکترون ها، افزایش چگالی جریان محوری و کاهش واگرایی شعاعی الکترون ها همراه است. یافته ها بیانگر آن است که هندسه هدف نقش کلیدی در کنترل پویایی جریان ها و تقویت میدان مغناطیسی در برهم کنش های لیزر-پلازما ایفا می کند.

واژه های کلیدی: شبیه سازی PIC، برهم کنش لیزر-پلازما، شتاب دهی الکترون، جریان های محوری، تولید میدان مغناطیسی

گرفته است [۵ و ۴]. توسعه منابع لیزر با شدت های بالاتر از ۱۰

وات بر سانتی متر مربع این امکان را فراهم کرده است که در مقیاس های زمانی فمتوثانیه و پیکوثانیه، میدان های مغناطیسی بسیار قوی (در حد چند صد تسلا تا چند گیگا گوس) در محیط های پلاسمایی ایجاد شوند [۶-۸]. این میدان ها عمدتاً حاصل حرکت ناهماهنگ الکترون ها، جریان های بازگشتی و ناپایداری های جریان در طول برهم کنش لیزر با پلازما هستند [۹ و ۱۰]. به همین دلیل، شناخت سازوکارهای تولید و تقویت این میدان های مغناطیسی، یکی از چالش های اساسی در تحقیقات جدید پلازما محسوب می شود.

۱. مقدمه

تولید میدان های مغناطیسی قوی در محیط پلازما یکی از موضوعات بنیادی و در عین حال کاربردی در فیزیک پلازما و برهم کنش لیزر-ماده به شمار می رود. این میدان ها نقش بسیار مهمی در درک پدیده های اختربیزیکی، همجوشی هسته ای لختی، شتاب دهی ذرات، و کنترل پایداری پلازما دارند [۱-۳]. در شرایط طبیعی، میدان های مغناطیسی بسیار قوی تنها در محیط های خاصی نظیر مگنتارها و ستاره های نوترونی یافت می شوند، اما در سال های اخیر ایجاد چنین میدان هایی در آزمایشگاه به کمک لیزرهای پرشدت مورد توجه گسترده قرار

مهمی از جمله میانگین میدان مغناطیسی، میانگین انرژی ذرات و مؤلفه‌های میدان الکتریکی در راستاهای x و y در بازه زمانی صفر تا ۱ پیکوثانیه و در گام‌های ۲۵۰ فمتوثانیه تحلیل شده‌اند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر هندسه هدف بر میزان تقویت میدان مغناطیسی و بازدهی انتقال انرژی از لیزر به پلاسما است. نتایج این مطالعه می‌تواند در طراحی بهینه 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، به منظور بررسی نقش هندسه 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 ورقه قوس‌مانند. در هر دو حالت، به منظور بررسی اثر خالص تغییر هندسه، سایر شرایط شبیه‌سازی یکسان در نظر گرفته شده‌اند.

۲-۱- دامنه محاسباتی و شبکه شبیه‌سازی

دامنه محاسباتی در راستای محورهای x و y به ترتیب از ۲۰- میکرون تا ۷۰ میکرون و از ۲۳- میکرون تا ۲۳ میکرون در نظر گرفته شده است. این دامنه با شبکه‌ای شامل 700×900 سلول گسسته شده است. در هر سلول شبکه، به طور 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 این رو، از واژه متوسط استفاده شده است. اندازه سلول‌های مکانی برابر با میکرون $\Delta x = 0.1$ و میکرون $\Delta y = 0.06$ در نظر گرفته شده است. شرط کورانت در تمامی شبیه‌سازی‌ها رعایت شده و بررسی‌ها نشان می‌دهد که پاشندگی عددی در این شرایط ناچیز

در اغلب پژوهش‌های اولیه، از هندسه‌های ساده مانند صفحات تخت، میله‌های استوانه‌ای و لایه‌های یکنواخت پلاسما به عنوان هدف^۱ استفاده شده است [۱۱-۱۳]. با این حال، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که هندسه 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 مطالعه 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 به عنوان یکی از ابزارهای معتبر و پرکاربرد، در مطالعات لیزر-پلاسما مورد استفاده گسترده قرار گرفته است [۲۳].

در اغلب مطالعات پیشین، تولید میدان مغناطیسی در یک هندسه مشخص مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه مستقیم اثر هندسه 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 به صورت مقایسه‌ای تحلیل می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، بررسی نقش هندسه 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 ناحیه ورودی است که منجر به تمرکز جریان الکترونی می‌شود. کمیت‌های فیزیکی

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 به صورت ورودی لیزر^۱، و در سایر جهات به صورت باز^۲ در نظر گرفته شده است تا بازتاب امواج الکترومغناطیسی و ذرات به حداقل برسد.

۲-۲- پارامترهای لیزر

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

طول موج میکرون $\lambda = 1.06$ ، شدت بیشینه: وات بر سانتی‌متر مربع $I_{max} = 1.2 \times 10^{19}$ ، پهنای پرتو^۳ میکرون $FWHM = 0.5$ (برای پیکربندی (الف)) و میکرون $FWHM = 8.70$ (برای پیکربندی (ب))، مدت تپ: ۱ پیکوثانیه، فاصله کانونی از مرز تابش^۴: میکرون $focal\ distance = 31.6$ (برای پیکربندی (الف)) و میکرون $focal\ distance = 0.8$ (برای پیکربندی (ب)). نمای زمانی لیزر به صورت تابع سوپرگاوسی در نظر گرفته شده و پرتو از سمت چپ دامنه وارد محیط شبیه‌سازی می‌شود.

۲-۳- معرفی هندسه دو پیکربندی مورد بررسی

در این پژوهش، دو نوع ساختار هدف برای بررسی اثر هندسه بر رفتار پلازما 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 زاویه گشودگی $14/9^\circ$ مطابق با پیکربندی گزارش شده در مطالعات پیشین [۲۴] در نظر گرفته شده‌اند. این ساختار سبب تمرکز نسبی ذرات و انرژی لیزر در ناحیه خروجی مخروط دوگانه می‌شود. این زاویه، بر اساس مطالعات پیشین به گونه‌ای انتخاب شده که تعادلی میان تمرکز جریان الکترونی و جلوگیری از افزایش ناپایداری‌های شدید برقرار شود. پیش پلاسمای کربنی به منظور 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 ورقه قوس‌مانند؛ در این حالت، مخروط مرکزی یگانه به همراه ورقه قوس‌مانند در داخل آن قرار داده شده است. در این پیکربندی پیش پلازما در قسمت پشتی ورقه 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 پلازما برابر با $n_{cr} = 10^{21} \times 1/1$ در آن $n = 40 n_{cr}$ در نظر گرفته شده است که برای اعمال شرایط پیش‌پلازما، فرض شد که سطح داخلی مخروط داخلی با پلاسمای کربن-هیدروژن پوشیده شده است و چگالی این پیش‌پلازما از مقدار بیشینه معادل $100 n_c$ برابر چگالی بحرانی $(100 n_c)$ به صورت تدریجی تا مقدار 0.1 برابر چگالی بحرانی $(0.1 n_c)$ 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 به عنوان یک هندسه مرجع انتخاب شده است، زیرا در مطالعات پیشین نشان داده شده که این ساختار می‌تواند موجب هدایت و تمرکز الکترون‌های داغ به ناحیه محوری شود. در مقابل، ساختار قوس‌مانند به منظور بررسی اثر تمرکز تدریجی تر 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 ماده هدف در نظر گرفته شده‌اند: الکترون‌ها، و یون‌های طلا با بار Au^{+40} . 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 پلاσμα، افزایش نرخ یونش، کاهش گسترش و حفظ گرادیان‌ها، جذب انرژی بیشتر و تولید میدان‌های قوی‌تر می‌شود. وجود لایه‌های سبک (H) و C^{+40} 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 به ترتیب برابر با $197 m_p$ و $12 m_p$ است که در آن m_p جرم حالت سکون پروتون است. توزیع چگالی این گونه‌ها بر اساس موقعیت مکانی و هندسه هر پیکربندی تعریف شده است، به گونه‌ای که در نواحی داخل مخروط و مجاورت پیش پلاσμα (داخل مخروط دوگانه در پیکربندی (الف) و در قسمت پشت ورقه قوسی‌شکل در پیکربندی (ب))، چگالی به صورت غیریکنواخت و تابعی از مختصات شعاعی و محوری است که این امر بر پویایی پلاσμα تأثیر قابل توجهی دارد.

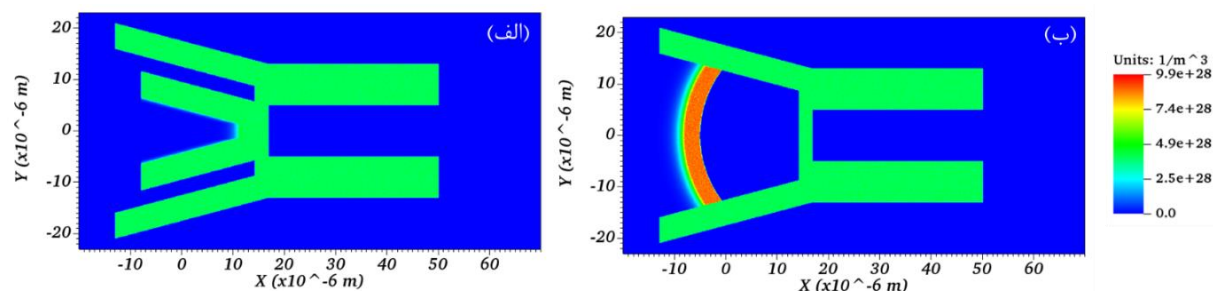
۳. نتایج و بحث

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 نحوه توزیع فضایی آن در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی است. تحلیل‌ها در چهار زمان شاخص $t=250$ فمتوثانیه، 500 فمتوثانیه، 750 فمتوثانیه و $t=1$ پیکوثانیه انجام شده‌اند که نشان‌دهنده مراحل مختلف نفوذ لیزر، شتاب‌گیری الکترون‌ها و شکل‌گیری جریان‌های حلقوی در پلاσμα هستند.

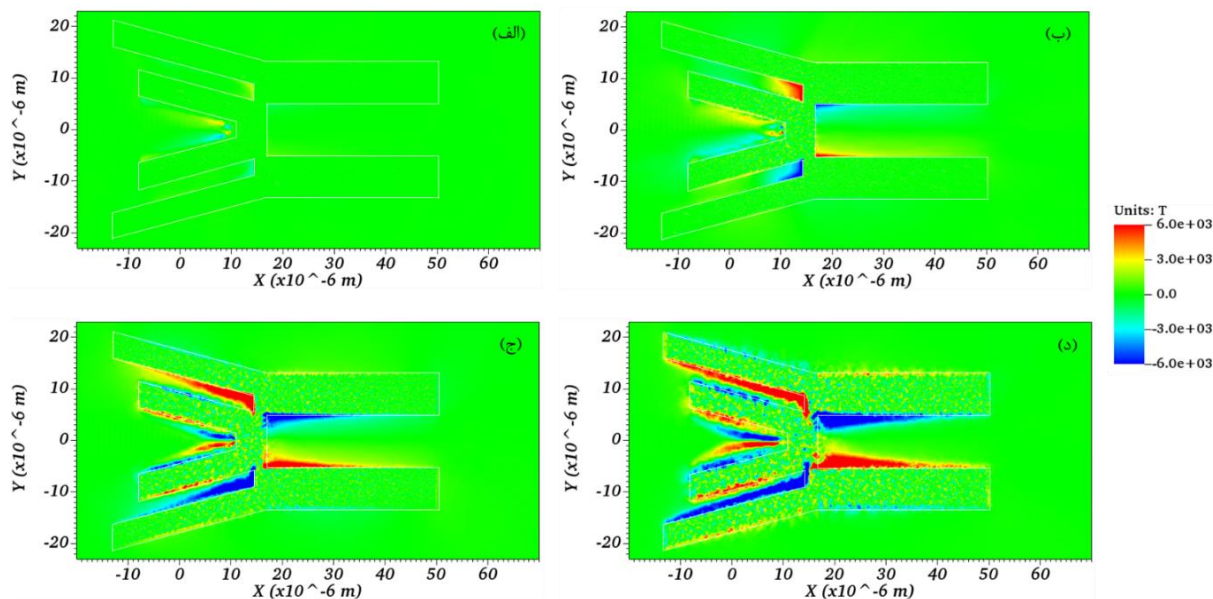
۳-۱- تحول زمانی میدان مغناطیسی تولید شده

پس از آغاز برهم‌کنش پرتو لیزر با پلاσμα، 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 تغییرات سریع زمانی و فضایی از خود نشان می‌دهند و دچار تغییرات سریع می‌شوند. به منظور 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.

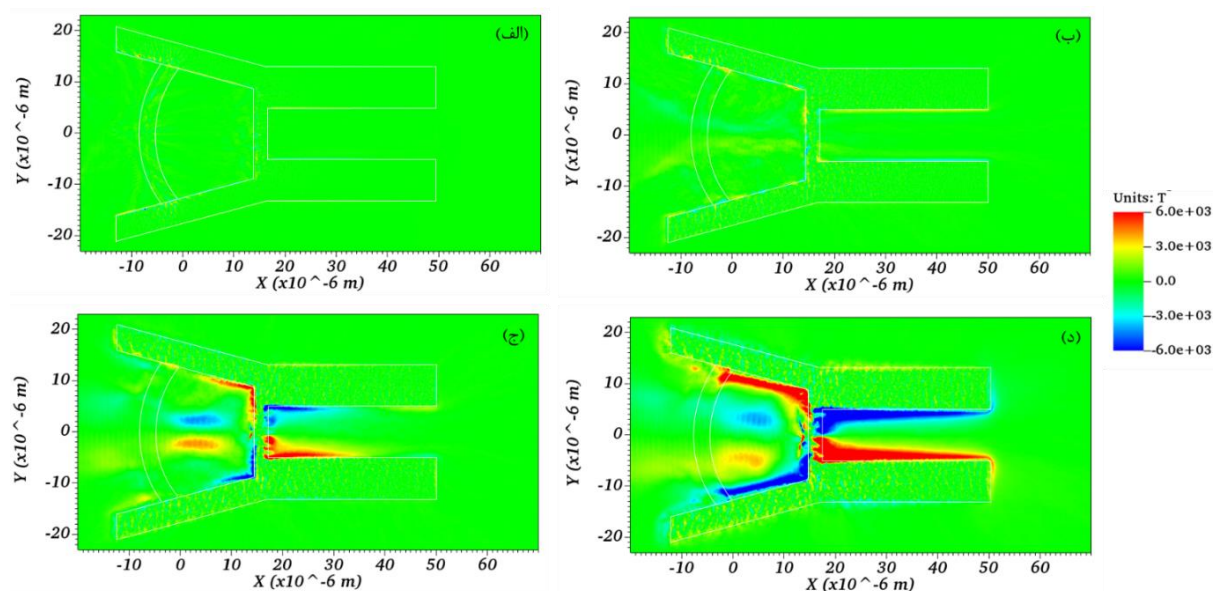
در پیکربندی (الف)، مطابق با شکل ۲، در زمان‌های اولیه پس از برخورد تپ لیزر به هدف، نواحی کوچکی از میدان مغناطیسی در اطراف محور برهم‌کنش مشاهده می‌شود که ناشی از حرکت‌های دسته‌جمعی الکترون‌ها و تشکیل جریان‌های حلقوی است. با گذشت زمان، این نواحی به تدریج گسترش یافته و شدت میدان افزایش می‌یابد. در مراحل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



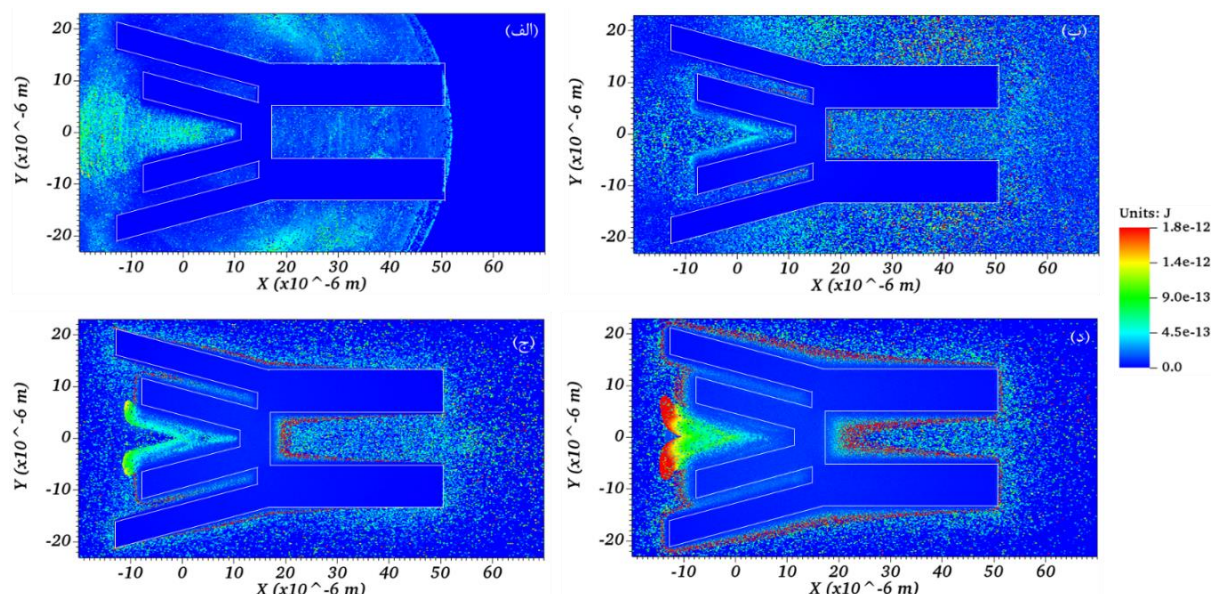
شکل ۱. طرح‌واره‌ای از هندسه دو پیکربندی شبیه‌سازی شده، (الف) پیکربندی مخروط دوگانه، و (ب) پیکربندی مخروط یگانه با ورقه قوس‌مانند.



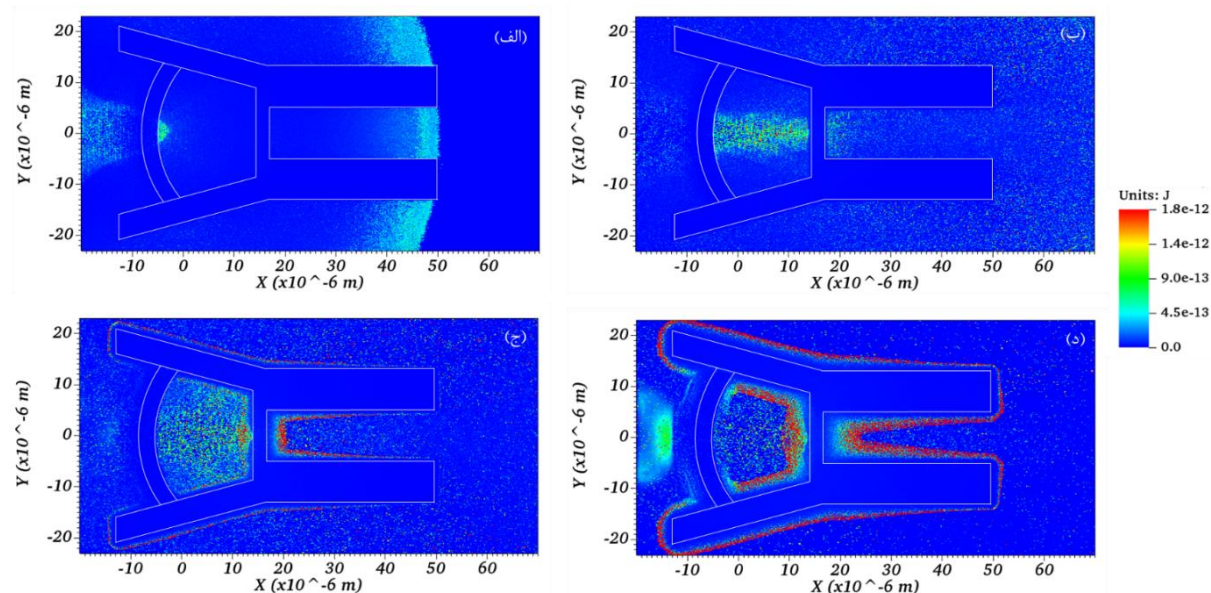
شکل ۲. میدان مغناطیسی تولید شده در پیکربندی (الف) در زمان‌های: (الف) $t=250$ فمتوثانیه، (ب) $t=500$ فمتوثانیه، (ج) $t=750$ فمتوثانیه و (د) $t=1$ پیکوثانیه.



شکل ۳. میدان مغناطیسی تولید شده در پیکربندی (ب) در زمان‌های: (الف) $t=250$ فمتوثانیه، (ب) $t=500$ فمتوثانیه، (ج) $t=750$ فمتوثانیه و (د) $t=1$ پیکوثانیه.



شکل ۴. میانگین انرژی ذرات در پیکربندی (الف) در زمان‌های: (الف) $t=250$ فمتوثانیه، (ب) $t=500$ فمتوثانیه، (ج) $t=750$ فمتوثانیه و (د) $t=1$ پیکوثانیه.



شکل ۵. میانگین انرژی ذرات در پیکربندی (ب) در زمان‌های: (الف) $t=250$ فمتوثانیه، (ب) $t=500$ فمتوثانیه، (ج) $t=750$ فمتوثانیه و (د) $t=1$ پیکوثانیه.

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 پیش‌پلازما منجر به رشد سریع‌تر میدان‌های مغناطیسی می‌شود. از آن‌جا که تقریباً در تمامی آزمایش‌های لیزر-پلازما به دلیل پدیده گسیل خودبه‌خودی تقویت شده^۲ پیش‌پلازما وجود دارد، بنابراین

در این شبیه‌سازی‌ها، وجود پیش‌پلازما قبل از رسیدن جبهه اصلی تپ لیزر از چند جهت حائز اهمیت است. پیش‌پلازما با ایجاد گرادیان چگالی ملایم در سطح هدف، جذب انرژی را از طریق سازوکارهایی مانند جذب تشدید، گرمایش خلاء^۱ و گرمایش $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ افزایش می‌دهد.

۱. Vacuum heating

۲. Amplified spontaneous emission (ASE)

مغناطیسی قوی‌تر شده و یک چرخه تقویت‌کننده بین این دو کمیت فیزیکی شکل می‌گیرد.

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

۳-۳-۱- مؤلفه E_x

برای تحلیل دقیق‌تر ساختار میدان الکتریکی، مؤلفه 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، دامنه میدان کاهش یافته و به سمت نواحی بیرونی‌تر گسترش می‌یابد که ناشی از پخش بارهای الکتریکی در محیط پلازما است و در شکل ۶. (ب) آورده شده است. اما در پیکربندی (ب) در شکل ۷، دامنه 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- مؤلفه E_y

به‌طور مشابه، مؤلفه عمودی میدان الکتریکی (E_y) نیز برای بررسی اثرات هندسه هدف بر ساختار میدان بررسی شده است. توزیع میانگین میدان الکتریکی در زمان‌های $t=75^\circ$ فمتوثانیه و $t=12^\circ$ پیکوثانیه برای پیکربندی (الف) در شکل ۸ و برای پیکربندی (ب) در شکل ۹ آورده شده است.

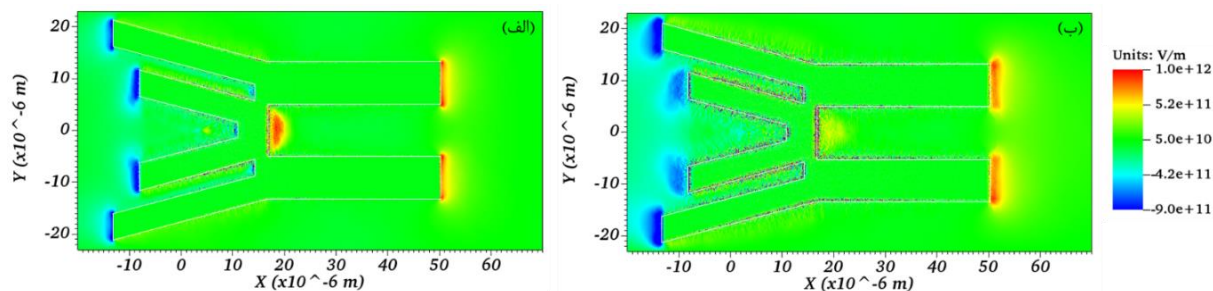
نتایج نشان می‌دهد که در پیکربندی (الف)، میدان E_y نسبت به E_x از شدت کمتری برخوردار است و توزیع آن نسبتاً یکنواخت‌تر است. در مقابل، در پیکربندی (ب) الگوهای پیچیده‌تری از میدان E_y مشاهده می‌شود که ناشی از خمیدگی مسیر حرکت الکترون‌ها و تمرکز موضعی بارهای الکتریکی است. این تفاوت در ساختار میدان E_y نیز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

در نظر گرفتن آن، شبیه‌سازی را واقع‌بینانه‌تر و معتبرتر می‌سازد. شیب چگالی پلازما در ناحیه 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 ناحیه برهم‌کنش می‌شود. این فرآیند با تقویت جریان‌های الکترونی محوری، به افزایش شدت میدان مغناطیسی تولیدشده منجر می‌شود.

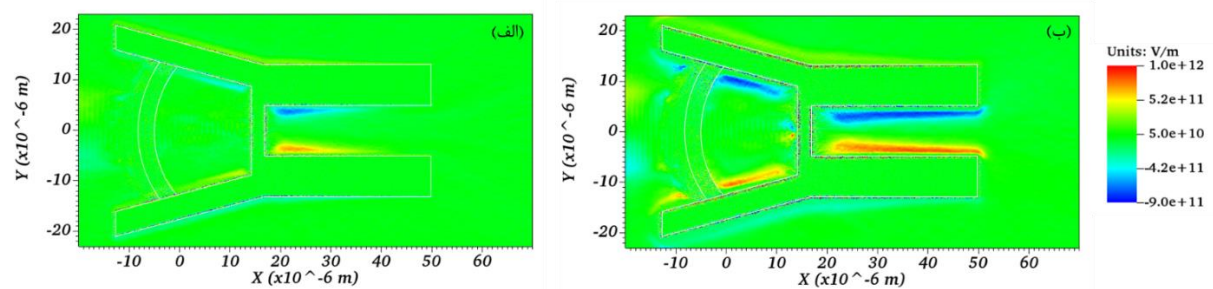
به‌کارگیری یون‌های سنگین مانند طلا در ساختار هدف مزایای متعددی دارد. یون‌های سنگین دیرتر از یون‌های سبک شتاب می‌گیرند، بنابراین شکل هندسی هدف مدت طولانی‌تری حفظ می‌شود. ضریب جذب لیزر در مواد سنگین بزرگ‌تر بوده و تولید الکترون‌های داغ بیشتر، زمینه‌ساز ایجاد جریان‌ها و میدان مغناطیسی قوی‌تر است. انبساط 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

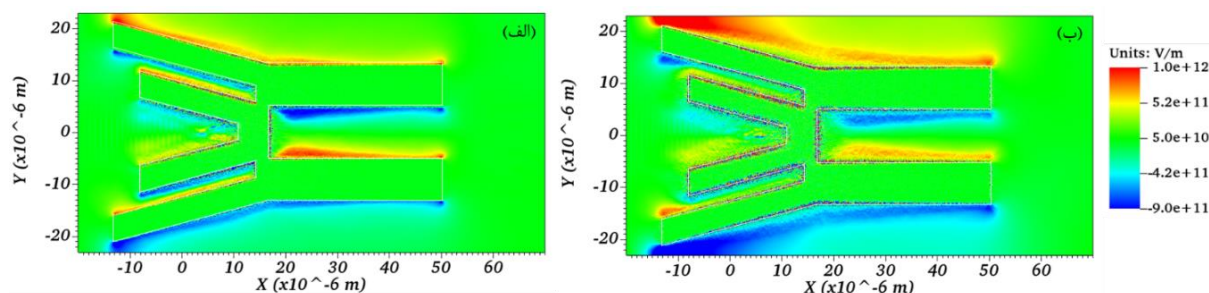
برای بررسی دقیق‌تر تفاوت دینامیک انرژی در دو پیکربندی، میانگین انرژی ذرات شبیه‌سازی‌شده محاسبه و مقایسه شد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مطابق با شکل‌های ۴ و ۵، در پیکربندی (ب) افزایش قابل‌توجه‌تری در میانگین انرژی ذرات نسبت به پیکربندی (الف) مشاهده می‌شود. این موضوع به‌طور مستقیم با شدت بیشتر میدان الکتریکی و مغناطیسی در این پیکربندی مرتبط است. در واقع، میدان‌های قوی‌تر باعث شتاب‌گیری مؤثرتر ذرات و انتقال انرژی بیشتر از میدان لیزر به پلازما می‌شوند. از سوی دیگر، شیب افزایش انرژی در پیکربندی (ب) در بازه 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 پراثری‌تر منجر به ایجاد میدان‌های



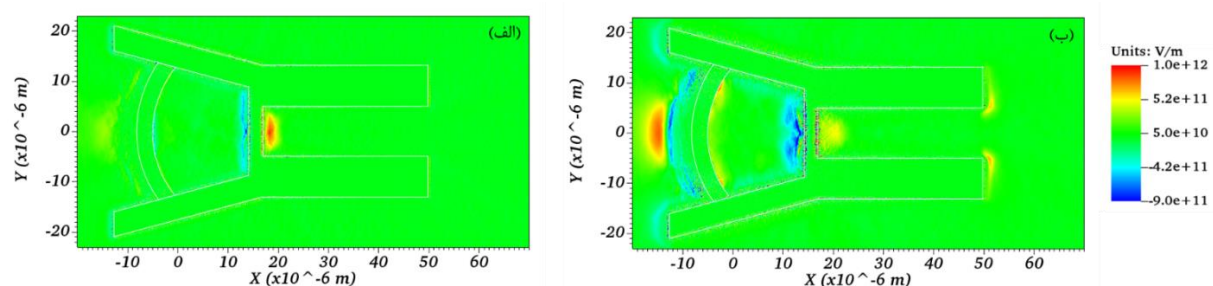
شکل ۶. توزیع میدان الکتریکی E_x پیکربندی (الف) در زمان‌های: (الف) $t = 75$ فمتوثانیه، و (ب) $t = 1$ پیکوثانیه.



شکل ۷. توزیع میدان الکتریکی E_x پیکربندی (ب) در زمان‌های: (الف) $t = 75$ فمتوثانیه، و (ب) $t = 1$ پیکوثانیه.



شکل ۸. توزیع میدان الکتریکی E_y پیکربندی (الف) در زمان‌های: (الف) $t = 75$ فمتوثانیه، و (ب) $t = 1$ پیکوثانیه.



شکل ۹. توزیع میدان الکتریکی E_y پیکربندی (ب) در زمان‌های: (الف) $t = 75$ فمتوثانیه، و (ب) $t = 1$ پیکوثانیه.

۴. نتیجه‌گیری

(ب)، که تنها تفاوت آن‌ها در وجود یا عدم وجود بخش هدایتی و ساختار اصلاح‌شده هدف بود، امکان تحلیل مستقیم سازوکارهای فیزیکی مؤثر را فراهم ساخت.

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

در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی‌های دوبعدی PIC در دستور EPOCH، نقش هندسه هدف در فرایند تولید، تقویت و همگرایی میدان مغناطیسی تولیدشده در برهم‌کنش لیزر-پلازما بررسی شد. مقایسه دو پیکربندی هدف (پیکربندهای (الف) و

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 پلازما 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 پایداری و متمرکزتری تشکیل می‌دهد. مقایسه 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 نشان‌دهنده بهبود فرآیند شتاب‌دهی و کاهش اتلاف عرضی انرژی است. این امر منجر به ایجاد جریان‌های بازگشتی قوی‌تر و در نتیجه میدان مغناطیسی شبه‌ایستای پایداری می‌شود. تحلیل میدان‌های الکتریکی E_x و E_y نیز نشان‌دهنده 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 پیش‌پلازما در هر دو پیکربندی نقش مهمی در شکل‌دهی اولیه جریان‌ها و جلوگیری از شوک ناگهانی انرژی لیزر ایفا کرده است. پیش‌پلازما به‌عنوان محیطی با گرادیان چگالی ملایم‌تر، موجب بهبود جذب لیزر، افزایش حجم ناحیه برهم‌کنش و فراهم‌شدن شرایط مناسب برای رشد ناپایداری‌های جریان-بازگشتی می‌شود. این اثرات در پیکربندی (ب) که هندسه هدایت‌کننده نیز دارد، به‌صورت هم‌افزایی منجر به تقویت بیشتر میدان

مراجع

مغناطیسی شده است. همچنین به‌کارگیری یون‌های طلا به‌عنوان ماده 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 ناخواسته 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 پلازما، نشان داده می‌شود که صرفاً تغییر هندسه هدف می‌تواند به تقویت قابل‌توجه میدان مغناطیسی و افزایش پایداری آن منجر شود. مقایسه مستقیم دو ساختار مخروطی و قوس‌مانند نشان می‌دهد که هندسه 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 پیش‌پلازما، 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 گوس) و کاربردهایی مانند هدایت الکترونی، محصورسازی پلازما و بهبود بازدهی منابع تابشی پرنرژی فراهم می‌کند.

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.