اثر میدان مغناطیسی خارجی بر نهشت انرژی الکترون درون سوخت چگال در مدل افروزش سریع - شوکی با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4

سیدابوالفضل قاسمی^{۱*}، امیر مصلحی^۲، سمیرا فقیه^۳

۱. پژوهشکده پلاسما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران-ایران

۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران، ایران

۳. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه دامغان، صندوق پستی: ۳۶۷۱۶-۴۱۱۶۷، دامغان، ایران

*Email: abo.ghasemi@gmail.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۲/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۲

چکیده

در این پژوهش اثرات میدان مغناطیسی خارجی $B_{ext} = (100-0) \text{ T}$ بر میزان نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی به درون پلاسمای چگال با گستره چگالی $\rho_c = (200-1000) \text{ g.cm}^{-3}$ برای مدل ترکیبی افروزش سریع-شوکی و با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در مدل شبیه‌سازی، دو نوع توزیع انرژی نمایی و شبه-دودمایی برای الکترون‌های نسبیتی با محدوده‌ی انرژی جنبشی اولیه $E_0 = (1.5-6.5) \text{ MeV}$ لحاظ شده است. نتایج شبیه‌سازی در حضور میدان مغناطیسی خارجی نشان می‌دهند که دینامیک الکترون‌های نسبیتی تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی قرار گرفته و در نتیجه باعث انتقال بهینه انرژی آن‌ها به درون سوخت می‌شود. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد بهینه نهشت انرژی به ازای چگالی $\rho_c \sim 300 \text{ g.cm}^{-3}$ در حضور میدان مغناطیسی $B_{ext} \sim 600 \text{ T}$ با طول موج لیزر افروزنده $\lambda_{if} = 0.35 \mu\text{m}$ و شدت لیزر $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ حاصل می‌شود، به‌طوری که می‌توان گفت با افزایش میدان مغناطیسی خارجی $B_{ext} > 600 \text{ T}$ میزان نهشت انرژی با آهنگ کند و آرامی رشد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ابزار شبیه‌سازی Geant4، افروزش سریع - شوکی، میدان مغناطیسی خارجی، توزیع انرژی نمایی، توزیع انرژی شبه-دودمایی.

The effect of external magnetic field on the electron energy deposition in dense fuel for fast-shock ignition concept by using Geant4 simulation toolkit

S. A. Ghasemi^{1*}, A. Moslehi², S. Faghih³

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran.

2. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O. Box: 11365-3486, Tehran, Iran.

3. Department of Physics, Faculty of Basic Science, Damghan University, P.O. Box: 36716-41167, Damghan, Iran.

Research Article

Received 22.4.2020, Accepted 22.6.2020

Abstract

In the present work, the effect of the external magnetic field of $B_{ext} = (0-1000) \text{ T}$ on the energy deposition of the relativistic electrons into high density fuel of $\rho_c = (200-1000) \text{ g.cm}^{-3}$ in fast-shock ignition concept has been investigated by using the Geant4 simulation toolkit. In our simulation model, two types of the energy distribution function including exponential energy distribution and quasi-two temperature energy distribution function, for relativistic electrons with an initial kinetic energy of $E_0 = (1.5-6.5) \text{ MeV}$ were considered. The results of simulations in the presence of an external magnetic field show that the dynamics of the relativistic electrons are strongly affected by the external magnetic field which results in the optimum energy transfer into the fuel. The comparison of the results indicates that the optimal energy deposition is obtained for the density of $\rho_c \sim 300 \text{ g.cm}^{-3}$ in the presence of a magnetic field of about $B_{ext} \sim 600 \text{ T}$ with an ignitor laser wavelength of $\lambda_{if} = 0.35 \mu\text{m}$ and laser intensity of $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$. It can therefore be concluded that by increasing the external magnetic field of $B_{ext} > 600 \text{ T}$, the energy deposition rate increases slowly.

Keywords: Geant4 simulation toolkit, Fast-shock ignition, External magnetic field, Exponential energy distribution, Quasi-two temperature energy distribution.

۱. مقدمه

مطالعات تجربی و شبیه‌سازی زیادی در راستای تولید و انتقال الکترون‌های نسبیتی ناشی از برهم‌کنش لیزر پالسی پر شدت با پلاسما و تخلیه انرژی آن‌ها در پلاسما چگال در حضور میدان مغناطیسی خارجی انجام گرفته است. در مرجع [۱] از یک میدان مغناطیسی خارجی برای فشردگی‌سازی هسته در افروزش سریع استفاده شده است. این مرجع علاوه بر مطالعه اثر میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت با محدوده $B = (1-50) \text{ MG}$ بر روی تولید و انتقال الکترون‌های با استفاده از شبیه‌سازی ذره - در- سلول دو بُعدی، اثر میدان مغناطیسی خودسازگار ناشی از حرکت الکترون‌ها را نیز مورد مطالعه و بررسی قرار داده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده می‌تواند در محصور کردن الکترون‌های نسبیتی مفید باشد در حالی که خود میدان مغناطیسی^۱ ناشی از پلاسما باعث افزایش زاویه واگرایی و اتلاف انرژی الکترون‌های نسبیتی می‌شود. به عبارت دیگر نتایج شبیه‌سازی مرجع [۱] نشان می‌دهد که بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی الکترون‌های نسبیتی فقط ۷ درصد انرژی کل لیزر ورودی را به سوخت چگال انتقال می‌دهند. در حالی که با اعمال یک میدان مغناطیسی $B > 3 \text{ MG}$ ، الکترون‌های نسبیتی ۲۰ درصد انرژی کل لیزر ورودی را منتقل می‌کنند. بنابر نتایج این مرجع میدان مغناطیسی خارجی با محدوده $B = (3-30) \text{ MG}$ برای موازی نمودن الکترون‌های نسبیتی و افزایش جریان الکترون‌های نسبیتی برای فشردگی‌سازی هسته در افروزش سریع برای گداخت اینرسی کافی و مناسب است.

مرجع [۲] نیز از میدان مغناطیسی خارجی برای فشردگی‌سازی هدف و انتقال انرژی بهینه در گداخت محصورسازی اینرسی برای بهبود عملکرد انفجار استفاده نموده است. قبل از انفجار، هدف در یک میدان مغناطیسی غوطه‌ور می‌شود و به محض تابش لیزر و با سرعت بالای انفجار و یونیزاسیون هدف، میدان مغناطیسی درون قرص سوخت به دام افتاده و از طریق فشار جریان تا ده‌ها مگاگوس تقویت می‌شود. در چنین میدان‌های مغناطیسی قوی لکه داغ درون هدف کروی به شدت مغناطیده می‌شود که علاوه بر اینکه باعث کاهش اتلاف گرمایی از طریق محصورسازی الکترون خواهد شد، دمای لکه داغ را به اندازه ۱۵ درصد در مقایسه با غیرمغناطیده نیز افزایش می‌دهد.

اثر هیدرودینامیکی اصلی میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده، مرجع [۳]، در هلولورام راه‌انداز مستقیم گداخت محصورسازی اینرسی، کاهش قابل توجه رسانایی الکترون‌ها در راستای عمود بر میدان می‌باشد که باعث ایجاد پلاسما داغ بین قرص سوخت و دیواره هلولورام می‌شود. شبیه‌سازی حرکت دینامیکی الکترون‌های داغ با استفاده از کد شبیه‌سازی ذره در سلول ZUMA و استفاده شرایط پلاسمایی با کد هیدرودینامیکی HYDRA نشان می‌دهد که این الکترون‌های داغ توسط یک میدان مغناطیسی یکنواخت ۷۰ تسلا به شدت مغناطیده شده و به سمت قرص سوخت هدایت می‌شوند و در نتیجه نهشت انرژی در سوخت دوتریم-تریتیم ۲۰ مرتبه بیش‌تر خواهد شد. اثر میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده بر روی نهشت انرژی در سوخت دوتریم-تریتیم به شدت به مکان الکترون‌های داغ تولید شده بستگی دارد که در امتداد خط واصل میدان به قرص سوخت باشد. این مطالعه نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی اعمال شده با بهبود انتشار پرتوهای داخلی و کاهش پراکندگی رامان در مدت اوج توان لیزر عملکرد هلولورام افزایش و تقویت می‌یابد.

در گداخت محصورسازی اینرسی با طرح افروزش سریع، مرجع [۴] با مطالعه انتشار الکترون‌های سریع در حضور یک میدان مغناطیسی قوی خارجی محوری با استفاده از کد شبیه‌سازی (کد هیبریدی سه بُعدی ZEPHYROS) نشان داد که میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده می‌تواند واگرایی باریکه الکترون‌های سریع را طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد.

نتایج بررسی‌های مرجع [۵] با اعمال یک میدان مغناطیسی محوری خارجی و یکنواخت برای هدایت باریکه الکترونی و با شبیه‌سازی ذره در سلول دو بُعدی نشان می‌دهد که الکترون‌های سریع با یک زاویه بزرگ پهن‌شدگی در فضای تکانه میدان مغناطیسی به دام افتاده و در نتیجه در امتداد خط میدان مغناطیسی انتشار می‌یابند.

در همه مطالعاتی که اشاره شد، اثر طیف الکترون‌های نسبیتی، گستره وسیع‌تر میدان مغناطیسی و گستره چگالی سوخت و انرژی جنبشی اولیه الکترون‌ها از جمله مواردی هستند که نیازمند مطالعه و بررسی بیش‌تر است.

در گداخت محصورسازی لختی با مدل جدید افروزش سریع - شوکی [۶-۱۱] نهشت انرژی الکترون‌های مگاالکترون ولتی درون پلاسما چگال [۱۲] دارای اهمیت می‌باشد. با توجه به این‌که انتقال الکترون در کرونی پلاسما به‌طور قابل - ملاحظه‌ای تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی

1. Self-Magnetic Field

فراخوانی شده است. با اعمال یک میدان مغناطیسی یکنواخت خارجی با شدت $B_{ext} = (0-1000)T$ در جهت محور Z (راستای تابش لیزر) به کل مجموعه شبیه سازی (کل گره سوخت)، میزان انرژی جذب شده درون سوخت به ازای هر الکترون محاسبه شده است. به منظور کاهش خطای آماری نسبی در انرژی های جذبی (کمتر از ۵٪) تعداد الکترون ها نیز 10^6 در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است مطالعه فوق در محدوده میدان $B_{ext} = (0-1000)T$ انجام شده است حال آنکه با توجه به شدت بالای لیزر مورد استفاده، میدان های مغناطیسی قابلیت افزایش در حد $B_{ext} = 10kT$ را دارد که منجر به مقادیر بزرگتر نهشت انرژی شده و به دلیل حجم بالای محاسبات و زمان بر بودن آن ها، انجام نشده است [۵].

۳. نتایج و بحث

در روش ترکیبی افروزش سریع - شوکی [۶-۱۱]، انتقال مؤثر و بهینه انرژی الکترون های نسبیتی ایجاد شده از برهم کنش لیزر افروزنده ی سریع با پیش پلاسمای زمینه به درون سوخت اصلی اهمیت ویژه ای دارد. زیرا این الکترون های نسبیتی با طی مسیر چند ده میکرونی در کرونا ی کم چگال و اگر ا و پراکنده شده و در واقع باعث اتلاف انرژی شده و آن را به طور بهینه به درون سوخت منتقل نمی کنند.

شکل ۱. لایه های گروی سوخت در مدل شبیه سازی.

جدول ۱. مقادیر جرم، چگالی و شعاع سوخت [۶].

M_c (mg)	ρ_c (g.cm ⁻³)	R_c (μm)
۰.۲۶۱	۸۲۸	۴۳
۰.۵۲۴	۶۵۸	۵۸.۱
۱.۳۱۴	۴۹۰	۸۶.۸
۲.۰۹۴	۴۰۶	۱۰۸
۴.۱۹۰	۲۹۲	۱۵۲

برای الکترون ها و شبه-دودمایی با طول موج و شدت لیزر افروزنده سریع به ترتیب $\lambda_{if} = (0.35-0.53) \mu m$ و

است [۱۳]، نهشت انرژی الکترون های نسبیتی و انتقال آن درون سوخت می توانند تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله طول موج و شدت لیزر افروزنده، نوع تابع توزیع انرژی الکترون-های نسبیتی و شدت میدان مغناطیسی خارجی باشند. از آنجا که واگرایی باریکه الکترونی یکی از مهم ترین پارامترهای تابع توزیع الکترونی است که می تواند در نهشت انرژی به درون سوخت اثر بگذارد، بنابراین در این مقاله بر آنیم که پراکندگی و واگرایی الکترون های نسبیتی تحت تأثیر میدان مغناطیسی کنترل شده و جهت دهی آن ها به طرف کره سوخت بهبود یابد. با توجه به اثرات میدان مغناطیسی خارجی بر دینامیک ذرات باردار و دریافت انرژی از میدان مغناطیسی خارجی توسط الکترون های نسبیتی، با جهت گیری مناسب میدان مغناطیسی خارجی در راستای لیزر افروزنده فرودی، میزان پراکندگی باریکه الکترونی کاهش پیدا کرده، باریکه ها موازی شده و انتقال مؤثر انرژی به درون سوخت انجام می شود.

۲. شبیه سازی و محاسبات

با استفاده از ابزار شبیه سازی Geant4 و هندسه سوخت شبیه سازی شده در شکل ۱، که در آن سوخت به صورت یک پوسته کروی لکه داغ مرکزی را احاطه کرده، محاسبات انجام گرفته است.

برای دور سوخت چگال دو لایه در نظر گرفته شده است: لایه درونی به صورت یک پوسته پلاسمایی کم چگال با ضخامتی از مرتبه $100 \mu m$ و چگالی $1.25 g.cm^{-3}$ و لایه بیرونی به صورت یک پوسته پلاسمایی کروی دیگر با ضخامت $50 \mu m$ و چگالی $0.025 g.cm^{-3}$. چگالی این دو پوسته پلاسمایی با توجه به تعداد یون های موجود در آن ها تعیین شده است. مقادیر چگالی و شعاع سوخت مورد استفاده در این شبیه سازی در جدول ۱ گزارش شده است.

گره سوخت شبیه سازی شده در شرایط خلأ قرار داده شده است و الکترون های حاصل از برهم کنش لیزر- پلازما از یک چشمه صفحه ای دایروی شکل نازک به شعاع $15 \mu m$ و به صورت همسانگرد از زاویه صفر تا 180° درجه گسیل می شوند. برای شبیه سازی از دو نوع تابع توزیع انرژی نمایی و شبه دو دمایی برای الکترون های نسبیتی با گستره انرژی جنبشی اولیه $E_0 = (1.5-6.5) MeV$ و شدت و طول موج باریکه لیزر $I = (10^{21}, 10^{23}) W.cm^{-2}$ ، $\lambda_{if} = (0.35-0.53) \mu m$ به عنوان پارامترهای ورودی استفاده شده است. برای ترابرد الکترون ها، مدل فیزیک الکترومغناطیس LowE_Livemore

میدان مغناطیسی خارجی به‌وضوح افزایش قابل ملاحظه نهشت انرژی درون سوخت را نشان می‌دهند که برای درک بیشتر با نتایج حاصل از عدم‌حضور میدان مغناطیسی مقایسه شده‌اند.

نتایج محاسبه نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی با توزیع انرژی شبه-دودمایی برای دو مقدار طول‌موج $\lambda_{if} = 0.35, 0.53 \mu\text{m}$ در شکل ۳-الف نشان می‌دهد که با اعمال میدان مغناطیسی خارجی و افزایش شدت لیزر افروزنده سریع، نهشت انرژی به درون سوخت در طول‌موج کوتاه‌تر به‌طور قابل ملاحظه‌ای (تقریباً از مرتبه ضریب ۲) کاهش می‌یابد؛ در حالی که طبق شکل ۳-ب، با افزایش طول موج، نهشت بیشتر انرژی به ازای شدت بالاتر $I = 10^{23} \text{ W.cm}^{-2}$ حاصل شده است.

شکل ۲. نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی برحسب چگالی سوخت و بدون حضور میدان مغناطیسی خارجی. الف) توزیع انرژی شبه-دودمایی، ب) توزیع انرژی نمای.

$I = (10^{21}, 10^{23}) \text{ W.cm}^{-2}$ برای لیزر افروزنده سریع در نظر گرفته شده و نفوذ آن‌ها به درون سوخت با گستره چگالی $\rho_c = (1000-2000) \text{ g.cm}^{-3}$ بررسی شده است.

با توجه به هدف این پژوهش، که بهبود فرآیند انتقال و نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی به درون سوخت در مدل افروزش سریع-شوکی می‌باشد، این شبیه‌سازی در حضور و عدم‌حضور میدان مغناطیسی خارجی انجام شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد اثر میدان مغناطیسی خارجی اعمال‌شده بر نهشت انرژی در سوخت به شدت به مکان الکترون‌های داغ تولید شده بستگی دارد که در امتداد خط واصل میدان به قرص سوخت باشد. بنابراین در این شبیه‌سازی میدان مغناطیسی در راستای باریکه لیزر افروزنده، محور z ، برای حصول بهینه نتایج در نظر گرفته شده است [۴].

شکل ۲ نتایج شبیه‌سازی را برای دو نوع توزیع انرژی نمای شبه-دودمایی در عدم‌حضور میدان مغناطیسی خارجی نشان می‌دهند. در هر دو شکل الف و ب، مقادیر کوچک محور عمودی نمودار بیان‌گر واگرایی شدید الکترون‌ها و پراکندگی به اطراف است. طبق شکل ۲-الف، برای توزیع انرژی شبه-دودمایی برای الکترون‌های نسبیتی، بیش‌ترین میزان نهشت انرژی در طول‌موج کوتاه‌تر و شدت پایین‌تر رخ می‌دهد. در حالی که با افزایش شدت لیزر افروزنده سریع در طول‌موج بلندتر، $\lambda_{if} = 0.53 \mu\text{m}$ ، نهشت انرژی مناسب‌تری حاصل می‌شود. مقایسه مقادیر عددی محور عمودی نشان می‌دهد که دامنه مقادیر نهشت انرژی در این حالت حدود ۲ برابر نسبت به طول‌موج و شدت کوتاه‌تر افت پیدا می‌کند. بنابراین در عدم حضور میدان مغناطیسی، حالت بهینه انتقال انرژی به ازای طول‌موج کوتاه‌تر $\lambda_{if} = 0.35 \mu\text{m}$ و شدت کمتر $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ به‌دست می‌آید.

در شکل ۲-ب، با افزایش چگالی سوخت، توان توقف پلاسما افزایش یافته و میزان نهشت انرژی کاهش می‌یابد. برای غلبه بر توان توقف پلاسما، انرژی جنبشی اولیه باریکه الکترونی افزایش داده می‌شود که موجب افزایش نسبی نهشت انرژی درون سوخت خواهد شد.

با اعمال میدان مغناطیسی خارجی دامنه میزان نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی به درون سوخت به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و با تغییر پارامترهای لیزر، از جمله طول‌موج و شدت، تغییر می‌کند. شکل‌های ۳ تا ۷ در حضور

حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی، که در شکل‌های ۳ و ۴ گزارش شده، بیان‌گر این است که مقادیر چگالی سوخت در مقایسه با دیگر عوامل مهمی همچون پارامترهای فیزیکی لیزر افروزنده سریع مانند شدت و طول موج و میدان مغناطیسی خارجی تأثیر قابل توجهی بر میزان نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی به درون سوخت ندارد.

شکل ۵ نیز برای دو مقدار کمینه و بیشینه چگالی سوخت $\rho_c = 292, 828 \text{ g.cm}^{-3}$ ، نهشت انرژی به درون سوخت به ازای مقادیر طول موج $0.53 \text{ } \mu\text{m}$ ، $0.35 \text{ } \mu\text{m}$ و شدت لیزر $I = 10^{21}, 10^{23} \text{ W.cm}^{-2}$ را در حضور میدان مغناطیسی خارجی با محدوده $B_{ext} = (0-1000) \text{ T}$ نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش چگالی سوخت نهشت انرژی الکترون‌های با توزیع انرژی شبه-دودمایی به درون سوخت کاهش پیدا می‌کند. همچنین طبق شکل‌های ۵-الف و ۵-ب، بیش‌ترین مقدار نهشت انرژی به ازای چگالی $\rho_c = 292 \text{ g.cm}^{-3}$ در طول موج کوتاه‌تر $0.35 \text{ } \mu\text{m}$ و شدت پایین‌تر $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ حاصل می‌شود. ضمن این‌که نمودارها نشان می‌دهند با افزایش طول موج لیزر افروزنده بیش‌ترین میزان نهشت انرژی به ازای شدت بالاتر حاصل می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که افزایش شدت میدان مغناطیسی خارجی تا مقدار $B_{ext} = 600 \text{ T}$ باعث افزایش نهشت انرژی در محدوده چگالی $\rho_c = 200-1000 \text{ g.cm}^{-3}$ می‌شود، اما در بیشینه مقدار چگالی افزایش نهشت انرژی به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد.

به ازای شدت میدان مغناطیسی بیش‌تر از $B_{ext} \geq 600 \text{ T}$ ، تغییر قابل ملاحظه‌ای در روند صعودی نهشت انرژی مشاهده نمی‌شود و نهشت انرژی به آرامی تغییر می‌کند.

نتایج محاسبه نهشت انرژی با توزیع انرژی نمایی به ازای انرژی میانگین $E_e = 3.5 \text{ MeV}$ در شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش چگالی سوخت نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی به درون سوخت به آرامی کاسته می‌شود؛ طبق شکل ۶-الف با اعمال میدان $B_{ext} = 600 \text{ T}$ افزایش بیش از ۳ برابری نهشت انرژی درون سوخت حاصل می‌شود. روند تغییرات نهشت انرژی برای سه چگالی سوخت نیز در شکل شکل ۶-ب ترسیم شده است. مشاهده می‌شود با کاهش چگالی سوخت نهشت انرژی با تغییرات آرام افزایش می‌یابد ضمن اینکه افزایش میدان مغناطیسی باعث افزایش نهشت می‌شود.

شکل ۳. نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی با توزیع انرژی شبه دودمایی برای محدوده چگالی $\rho = 292-828 \text{ g.cm}^{-3}$ و طول موج و شدت لیزر افروزنده $I = 10^{21}, 10^{23} \text{ W.cm}^{-2}$ ، $\lambda = 0.35, 0.53 \text{ } \mu\text{m}$.

در توزیع انرژی شبه-دودمایی تغییر طول موج لیزر افروزنده سریع در یک شدت معین لیزر، قویاً بر واگرایی الکترون‌های نسبیتی اثر می‌گذارد. در شدت پایین‌تر لیزر افروزنده سریع $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ ، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش طول موج لیزر افروزنده سریع در هر دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی نهشت انرژی به درون سوخت کاهش پیدا می‌کند (شکل ۴-الف). این کاهش نهشت انرژی در حضور میدان مغناطیسی خارجی قابل ملاحظه بوده و حدوداً با ضریب ۲ است. در حالی که طبق شکل ۴-ب، با افزایش شدت به $I = 10^{23} \text{ W.cm}^{-2}$ نتیجه عکس حاصل می‌شود و در طول موج‌های بلندتر انرژی به میزان بیش‌تری درون سوخت تخلیه می‌شود؛ لازم به ذکر است که مقادیر عددی محور قائم در این حالت در حدود نصف حالت قبل است. هر دو شکل ۳ و ۴ به‌طور همسو نشان می‌دهند که نتیجه بهینه در حضور میدان مغناطیسی به ازای شدت پایین‌تر و طول موج کوتاه‌تر لیزر حاصل خواهد شد.

روند تغییر نزولی آرام نهشت انرژی الکترون‌ها با توزیع انرژی شبه-دودمایی به درون سوخت به ازای افزایش مقادیر چگالی سوخت با محدوده $\rho_c = (200-1000) \text{ g.cm}^{-3}$ در دو

شکل ۶. نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی با توزیع انرژی نمایشی الف) بر حسب چگالی سوخت با محدوده $\rho = 292 - 828 \text{ g.cm}^{-3}$ در دو وضعیت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی، ب) بر حسب میدان مغناطیسی خارجی برای چگالی‌های $\rho = 292, 490, 828 \text{ g.cm}^{-3}$ ، با انرژی اولیه میانگین $E_c = 3.5 \text{ MeV}$.

شکل ۷ نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی به درون سوخت برای دو نوع توزیع انرژی شبه-دودمایی و نمایشی بر حسب چگالی سوخت در دو وضعیت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی را نشان می‌دهند. شکل ۷-الف نشان می‌دهد که به ازای طول موج کوتاه‌تر و شدت پایین‌تر، در هر دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی در نظر گرفتن طیف نمایشی برای الکترون‌ها منجر به نهشت ضعیف‌تر انرژی خواهد شد. حال آنکه افزایش طول موج و شدت لیزر افزوننده نتیجه معکوس را نشان می‌دهد و طیف نمایشی نهشت بیشتر انرژی را به دست می‌دهد. بنابراین مقایسه داده‌های شکل ۷ کوتاه‌تر $\lambda_{if} = 0.35 \mu\text{m}$ و شدت پایین‌تر $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ و برای طیف انرژی دو دمایی الکترون‌ها حاصل می‌شود. در شکل ۸ ترابرد الکترون‌ها درون سوخت در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تعدادی فوتون تابش ترمزی (رنگ سبز) تولید شده است که حاکی از افزایش انرژی الکترون‌ها در میدان مغناطیسی است. به علاوه در حضور میدان از پخش‌شدگی الکترون‌ها جلوگیری شده و تقریباً همه‌ی آن‌ها به سوخت برخورد کرده‌اند.

شکل ۴. نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی بر حسب میدان مغناطیسی خارجی با توزیع انرژی شبه-دودمایی برای محدوده چگالی $\rho = 292 - 828 \text{ g.cm}^{-3}$ و طول موج $\lambda = 0.35, 0.53 \mu\text{m}$ و شدت لیزر افزوننده الف) $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ و ب) $I = 10^{23} \text{ W.cm}^{-2}$.

شکل ۵. نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی بر حسب میدان مغناطیسی خارجی با توزیع انرژی شبه-دودمایی $\rho = 292 \text{ g.cm}^{-3}$ ، $I = 10^{21}, 10^{23} \text{ W.cm}^{-2}$ ، $\lambda = 0.35, 0.53 \mu\text{m}$ ، ب) برای مقادیر $\rho = 828 \text{ g.cm}^{-3}$ ، $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ و $\lambda = 0.35, 0.53 \mu\text{m}$.

درون سوخت کاهش پیدا می‌کند و انرژی مؤثر بسیار کمی به درون سوخت تخلیه می‌شود. به‌طوری که با اعمال میدان مغناطیسی خارجی برای الکترون‌ها با طیف دو دمایی و لیزر با شدت $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ و طول موج $\lambda_{if} = 0.35 \mu\text{m}$ نهشت انرژی درون سوخت بیش از ۵ برابر افزایش می‌یابد. چرا که وجود میدان مغناطیسی خارجی بر جهت و مقدار انرژی دریافتی الکترون‌های نسبیتی اثر گذاشته و بدین ترتیب باعث پراکندگی مؤثرتر الکترون‌ها شده و در نهایت با جهت‌گیری مناسب به عمق بیش‌تری از قرص سوخت نفوذ نموده و انرژی بیش‌تری به سوخت تحویل می‌دهند.

در این مطالعه نشان داده شد که ضمن اینکه واگرایی الکترون‌های نسبیتی حاصل از برهم‌کنش لیزر- پلاسما از پارامترهای فیزیکی لیزر افروزنده سریع، شدت و طول موج تأثیر می‌پذیرد، میدان مغناطیسی خارجی برای جهت‌گیری مناسب و در نتیجه تخلیه بهینه انرژی به درون سوخت تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد.

به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی در دو وضعیت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی نشان می‌دهد که در نظر گرفتن توزیع انرژی شبه- دودمایی برای الکترون‌های به ازای کمینه مقدار شدت و طول موج لیزر افروزنده سریع، $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ ، $\lambda = 0.35 \mu\text{m}$ ، عملکرد بهتر و مؤثرتری در مقایسه با توزیع انرژی نمایی حاصل می‌شود. این در حالی است که توزیع انرژی نمایی با مقدار انرژی میانگین اولیه باریکه الکترونی ($E_0 = 3.5 \text{ MeV}$) در مقایسه با توزیع انرژی شبه- دودمایی در شدت و طول موج بالاتر لیزر افروزنده سریع، $I = 10^{23} \text{ W.cm}^{-2}$ ، $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ ، نقش مؤثرتری در افزایش نهشت انرژی به درون سوخت خواهد داشت. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، بهینه نهشت انرژی به ازای چگالی $\rho_c \sim 300 \text{ g.cm}^{-3}$ در حضور میدان مغناطیسی $B_{ext} \sim 600 \text{ T}$ با طول موج لیزر افروزنده $\lambda_{if} = 0.35 \mu\text{m}$ و شدت لیزر $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ حاصل می‌شود؛ به‌طوری که می‌توان گفت با افزایش میدان مغناطیسی خارجی $B_{ext} > 600 \text{ T}$ ، میزان نهشت انرژی به کندی صورت گرفته و افزایش محسوسی ندارد.

شکل ۷. نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی برحسب چگالی سوخت در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی با توزیع انرژی نمایی و شبه- دودمایی.

شکل ۸. تراپرد الکترون‌ها در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت ۶۰۰ T (چپ) هندسه شبیه‌سازی شده و تابش الکترون‌ها (با رنگ قرمز و تعداد ۱۰۰۰ برای نمونه) بدون حضور میدان مغناطیسی.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی به درون سوخت با دو نوع توزیع انرژی نمایی و شبه- دودمایی با ابزار شبیه‌سازی Geant4 درون سوخت چگال در فرآیند گداخت محصورسازی لختی با رویکرد افروزش سریع- شوکی در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی و با در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی مؤثر لیزر افروزنده سریع، شدت و طول موج، مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته شده است.

نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهند که بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی با وجود پراکندگی‌های بین ذرات باردار، نفوذ الکترون‌های نسبیتی حاصل از برهم‌کنش لیزر- پلاسما به

مراجع

1. Hong-bo Cai and Shao-ping Zhu and X. T. He, *Effects of the imposed magnetic field on the production and transport of relativistic electron beams*, *Phys. plasmas* **20**, 072701 (2013).
2. M. Hohenberger, et al., *Inertial confinement fusion implosions with imposed magnetic field compression using the OMEGA Laser*, *Phys. plasmas* **19**, 056306 (2012)
3. D. J. Strozzi, et al., *Imposed magnetic field and hot electron propagation in inertial fusion hohlraums*, *J. Plasma Phys*, vol. **81**, 475810603 (2015).
4. X. H. Yang, et al., *Effects of external axial magnetic field on fast electron propagation*, *Phys. plasmas* **18**, 093102 (2011).
5. T. Johzaki, et al., *Electron beam guiding by strong longitudinal magnetic fields*, *Journal of Physics: Conference Series* **688** 012041(2016).
6. S. A. Ghasemi, A.H. Farahbod, S. Sobhanian, *Analytical model for fast shock ignition*, *AIP Adv.* **4**, 077130 (2014).
7. A. H. Farahbod, et al., *Improvement of non-isobaric model for shock ignition*, *Eur. Phys. J. D.*, **68**:314 (2014)
8. A. H. Farahbod, S. A. Ghasemi, *Fast-Shock Ignition: A new concept to Inertial confinement fusion*, *Iranian J. Phys. Res.* **12**, 4 (2013).
9. S.A. Ghasemi, A.H. Farahbod, *The Role of fast ignitor in fast-shock ignition concept*, *Iranian J. Phys. Res.* **13**, 4 (2013).
10. S.A. Ghasemi, A.H. Farahbod, *Fast-Shock Ignition: A New Concept to Inertial Confinement Fusion*, *Bull. Am. Phys. Soc.* **58**, 308 (2013).
11. S.A. Ghasemi, A.H. Farahbod, *Electron Energy Deposition in Fast-Shock Ignition*, *Bull. Am. Phys. Soc.* **59**, No. 1 (2014).
12. C. K. Li and R. D. Petrasso, *Energy deposition of MeV electrons in compressed targets of fast-ignition inertial confinement fusion*, *Phys. plasmas* **13**, 056314, *American Institute of Physics* (2006).
13. K. Miyamoto, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion*, published by University of Tokyo Press (2004).

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

سیدابوالفضل قاسمی، امیر مصلحی، سمیرا فقیه (۱۳۹۹)، اثر میدان مغناطیسی خارجی بر نهشت انرژی الکترون درون سوخت چگال در مدل افروزش سریع- شوکی با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4. ۹۴، ۸۴-۹۱

DOI: 10.24200/nst.2020.1173

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1173.html