

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 گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران-ایران

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

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

مقاله‌ی پژوهشی

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

چکیده

در این پژوهش اثرات میدان مغناطیسی خارجی $B_{ext} = (1000-0) T$ بر میزان نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی به درون پلاسما چگال با گستره چگالی $\rho_c = (200-1000) g.cm^{-3}$ 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 محدودی انرژی جنبشی اولیه $E_0 = (1.5-6.5) MeV$ 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 $\rho_c \sim 300 g.cm^{-3}$ در حضور میدان مغناطیسی $B_{ext} \sim 600 T$ با طول موج لیزر افروزنده $\lambda_{if} = 0.35 \mu m$ و شدت لیزر $I = 10^{21} W.cm^{-2}$ حاصل می‌شود، به طوری که می‌توان گفت با افزایش میدان مغناطیسی خارجی $B_{ext} > 600 T$ 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, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran.

2. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, 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 $B_{ext} = (0-1000) T$ on the energy deposition of the relativistic electrons into high density fuel of $\rho_c = (200-1000) g.cm^{-3}$ 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 $E_0 = (1.5-6.5) MeV$ 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 $\rho_c \sim 300 g.cm^{-3}$ in the presence of a magnetic field of about $B_{ext} \sim 600 T$ with an ignitor laser wavelength of $\lambda_{if} = 0.35 \mu m$ and laser intensity of $I = 10^{21} W.cm^{-2}$. It can therefore be concluded that by increasing the external magnetic field of $B_{ext} > 600 T$, the energy deposition rate increases slowly.

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

*Email: abo.ghasemi@gmail.com

۱. مقدمه

اثر هیدرودینامیکی اصلی میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده، مرجع [۲]، در هولورام راه‌انداز مستقیم گداخت محصورسازی اینرسی، کاهش قابل توجه رسانایی الکترون‌ها در راستای عمود بر میدان می‌باشد که باعث ایجاد پلاسمای داغ بین قرص سوخت و دیواره هولورام 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 پیش‌تر 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 هولورام 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 سه‌بعدی 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 دو‌بعدی 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 پلاسمای چگال [۱۲] دارای اهمیت می‌باشد. با توجه به این که انتقال الکترون در کرومای پلاسمای به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی

مطالعات تجربی و شبیه‌سازی زیادی در راستای تولید و انتقال الکترون‌های نسبیتی ناشی از برهم‌کنش لیزر پالسی پرشدت با پلاسمای و تخلیه انرژی آن‌ها در پلاسمای چگال در حضور میدان مغناطیسی خارجی انجام گرفته است. در مرجع [۱] از یک میدان مغناطیسی خارجی برای فشرده‌سازی 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 دو‌بعدی، 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 پلاسمای باعث افزایش زاویه واگرایی و اتلاف انرژی الکترون‌های نسبیتی می‌شود. به‌عبارت 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 فشرده‌سازی هسته در افروزش سریع برای گداخت اینرسی کافی و مناسب است.

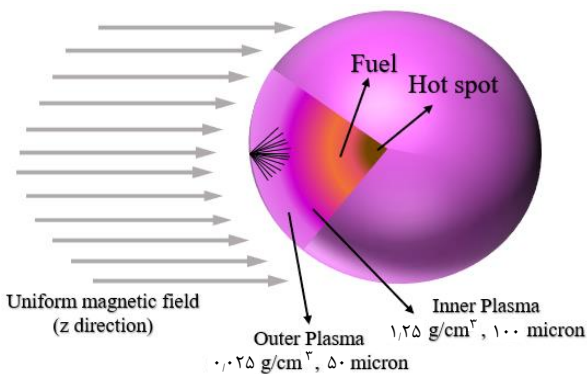
مرجع [۲] نیز از میدان مغناطیسی خارجی برای فشرده‌سازی هدف و انتقال انرژی بهینه در گداخت محصورسازی اینرسی برای بهبود عملکرد انفجار استفاده نموده است. قبل از انفجار، هدف در یک میدان مغناطیسی غوطه‌ور می‌شود و به محض تابش لیزر و با سرعت بالای انفجار و یونیزاسیون هدف، میدان مغناطیسی درون قرص سوخت به دام افتاده 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.

1. Self-Magnetic Field

الکترون‌ها، مدل فیزیک الکترومغناطیسی LowE_Livemore 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 شبیه‌سازی (کل کُرِه سوخت)، میزان انرژی جذب‌شده درون سوخت به ازای هر الکترون محاسبه شده است. به‌منظور کاهش خطای آماری نسبی در انرژی‌های جذبی (کم‌تر از ۰.۵٪) تعداد الکترون‌ها 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، میدان‌های مغناطیسی قابلیت افزایش در حد $B_{ext} = 10kT$ را دارد که منجر به مقادیر بزرگ‌تر نهشت انرژی شده و به‌دلیل حجم بالای محاسبات و زمان‌بر بودن آن‌ها، انجام نشده است [۵].

۳. نتایج و بحث

در روش ترکیبی افروزش سریع - شوکی [۶-۱۱]، انتقال مؤثر و بهینه انرژی الکترون‌های نسبیتی ایجاد شده از برهم‌کنش لیزر افروزنده‌ی سریع با پیش‌پلاسمای زمینه به درون سوخت اصلی اهمیت ویژه‌ای دارد. زیرا این الکترون‌های نسبیتی با طی مسیر چند ده میکرونی در کرونا‌ی کم‌چگال واگرا و پراکنده شده و در واقع باعث اتلاف انرژی شده و آن را به‌طور بهینه به درون سوخت منتقل نمی‌کنند.



شکل ۱. لایه‌های کُرِه سوخت در مدل شبیه‌سازی.

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

است [۱۳]، نهشت انرژی الکترون‌های نسبیتی و انتقال آن درون سوخت می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله طول‌موج و شدت لیزر افروزنده، نوع تابع توزیع انرژی الکترون‌های نسبیتی و شدت میدان مغناطیسی خارجی باشند. از آنجا که واگرایی باریکه الکترونی یکی از مهم‌ترین پارامترهای تابع توزیع الکترونی است که می‌تواند در نهشت انرژی به درون سوخت اثر بگذارد، بنابراین در این مقاله بر آنیم که پراکندگی و واگرایی الکترون‌های نسبیتی تحت تأثیر میدان مغناطیسی کنترل شده و جهت‌دهی آن‌ها 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 الکترون‌های نسبیتی، با جهت‌گیری مناسب میدان مغناطیسی خارجی در راستای باریکه لیزر افروزنده فرودی، میزان پراکندگی باریکه الکترونی کاهش پیدا کرده، باریکه‌ها موازی شده و انتقال مؤثر انرژی به درون سوخت انجام می‌شود.

۲. شبیه‌سازی و محاسبات

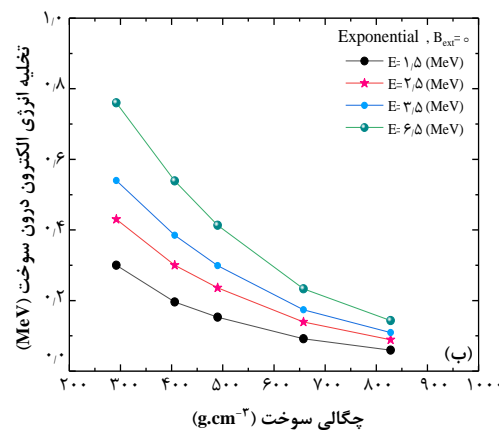
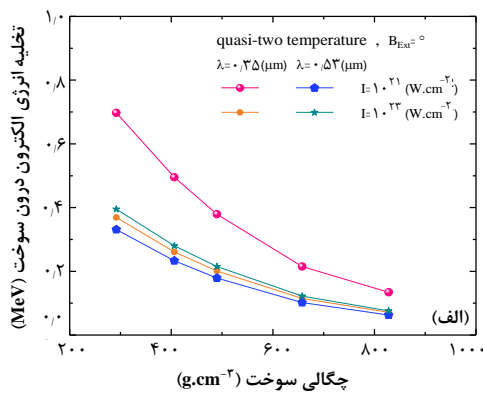
با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 و هندسه سوخت شبیه‌سازی شده در شکل ۱، که در آن سوخت به‌صورت یک پوسته کروی لکه داغ مرکزی را احاطه کرده، محاسبات انجام گرفته است.

برای دور سوخت چگال دو لایه در نظر گرفته شده است: لایه درونی به‌صورت یک پوسته پلاسمایی کم‌چگال با ضخامتی از مرتبه $100 \mu m$ و چگالی 1.25 g.cm^{-3} و لایه بیرونی به‌صورت یک پوسته پلاسمایی کروی دیگر با ضخامت $50 \mu m$ و چگالی 0.25 g.cm^{-3} . چگالی این دو پوسته پلاسمایی با توجه به تعداد یون‌های موجود در آن‌ها تعیین شده است. مقادیر چگالی و شعاع سوخت مورد استفاده در این شبیه‌سازی در جدول ۱ گزارش شده است.

کُرِه سوخت شبیه‌سازی‌شده در شرایط خلأ قرار داده شده است و الکترون‌های حاصل از برهم‌کنش لیزر- پلازما از یک چشمه صفحه‌ای دایروی شکل نازک به شعاع $15 \mu m$ و به صورت همسانگرد از زاویه صفر تا 180° درجه گسیل می‌شوند. برای شبیه‌سازی از دو نوع تابع توزیع انرژی نمایی و شبه دو دمایی برای الکترون‌های نسبیتی با گستره انرژی جنبشی اولیه $E_e = (1.5-6.5) \text{ MeV}$ و شدت و طول‌موج باریکه لیزر $I = (10^{21}, 10^{23}) \text{ W.cm}^{-2}$ ، $\lambda_{eff} = (0.35-0.53) \mu m$ عنوان پارامترهای ورودی استفاده شده است. برای ترابرد

ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و با تغییر پارامترهای لیزر، از جمله طول موج و شدت، تغییر می‌کند. شکل‌های ۳ تا ۷ در حضور میدان مغناطیسی خارجی به‌وضوح افزایش قابل ملاحظه نهشت انرژی درون سوخت را نشان می‌دهند که برای درک بیشتر با نتایج حاصل از عدم حضور میدان مغناطیسی مقایسه شده‌اند.

نتایج محاسبه نهشت انرژی الکترون‌های نسبی با توزیع انرژی شبه-دودمایی برای دو مقدار طول موج $\lambda_{if} = 0.35, 0.53 \mu\text{m}$ در شکل ۳-الف نشان می‌دهد که با اعمال میدان مغناطیسی خارجی و افزایش شدت لیزر فروزنده سریع، نهشت انرژی به درون سوخت در طول موج 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 ۳. نهشت انرژی الکترون‌های نسبی بر حسب چگالی سوخت و بدون حضور میدان مغناطیسی خارجی. الف) توزیع انرژی شبه-دودمایی، ب) توزیع انرژی نمای.

برای الکترون‌ها و شبه-دودمایی با طول موج و شدت لیزر فروزنده سریع به ترتیب $\lambda_{if} = (0.35 - 0.53) \mu\text{m}$ و $I = (10^{21}, 10^{23}) \text{ W.cm}^{-2}$ برای لیزر فروزنده 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 نسبی به درون سوخت در مدل فروزش سریع-شوکی می‌باشد، این شبیه‌سازی در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی انجام شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد اثر میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده 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 فروزنده، 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 عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی نشان می‌دهد. 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 نسبی، بیش‌ترین میزان نهشت انرژی در طول موج کوتاه‌تر و شدت پایین‌تر رخ می‌دهد. در حالی که با افزایش شدت لیزر فروزنده سریع در طول موج 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 طول موج و شدت کوتاه‌تر افت پیدا می‌کند. بنابراین در عدم حضور میدان مغناطیسی، حالت بهینه انتقال انرژی به ازای طول موج کوتاه‌تر $\lambda_{if} = 0.35 \mu\text{m}$ و شدت کم‌تر $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ به دست 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 نسبی به درون سوخت به‌طور قابل

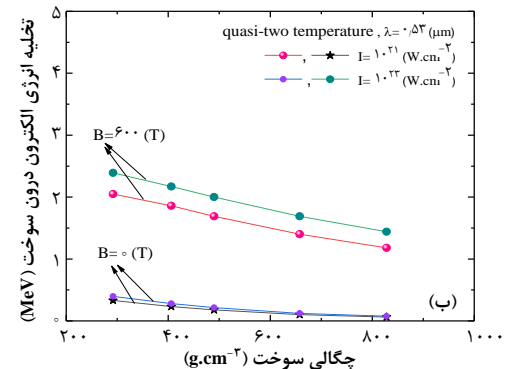
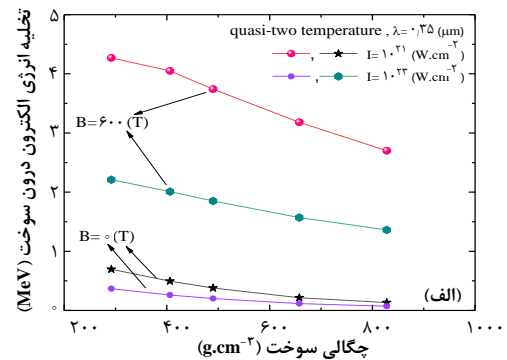
حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی، که در شکل‌های ۳ و ۴ گزارش شده، بیان‌گر این است که مقادیر چگالی سوخت در مقایسه با دیگر عوامل مهمی همچون پارامترهای فیزیکی لیزر افروزنده سریع مانند شدت و طول موج و میدان مغناطیسی خارجی تأثیر قابل توجهی بر میزان نهشت انرژی الکترون‌های نسبتی به درون سوخت ندارد.

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 $0.53 \mu\text{m}$ ، $0.35 \mu\text{m}$ و شدت لیزر $I = 10^{21}, 10^{23} \text{ W.cm}^{-2}$ را در حضور میدان مغناطیسی خارجی با محدوده $B_{ext} = (0-1000)T$ 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 $0.35 \mu\text{m}$ و شدت پایین‌تر $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ حاصل می‌شود. ضمن این که 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 $B_{ext} = 600 T$ 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 $B_{ext} \geq 600 T$ ، تغییر قابل ملاحظه‌ای در روند صعودی نهشت انرژی مشاهده نمی‌شود و نهشت انرژی به آرامی تغییر می‌کند.

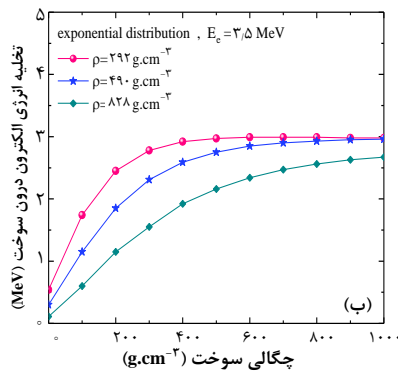
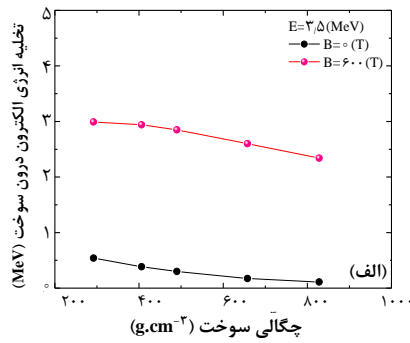
نتایج محاسبه نهشت انرژی با توزیع انرژی نمایی به ازای انرژی میانگین $E_e = 3.5 \text{ MeV}$ در شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش چگالی سوخت نهشت انرژی الکترون‌های نسبتی به درون سوخت به آرامی کاسته می‌شود؛ طبق شکل ۶-الف با اعمال میدان $B_{ext} = 600 T$ افزایش بیش از ۳ برابری نهشت انرژی درون سوخت حاصل می‌شود. 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 نسبتی 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 $\lambda = 0.35, 0.53 \mu\text{m}$ ، $I = 10^{21}, 10^{23} \text{ W.cm}^{-2}$.

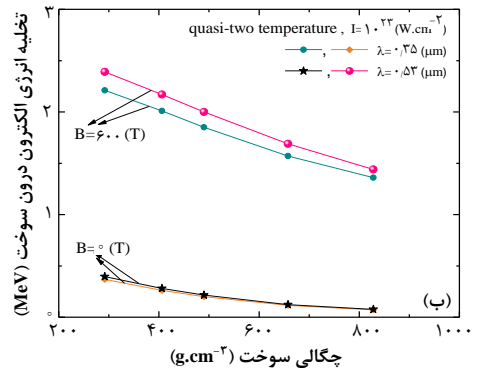
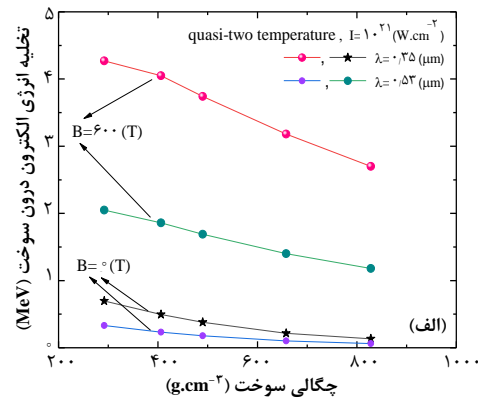
در توزیع انرژی شبه-دودمایی تغییر طول موج لیزر افروزنده سریع در یک شدت معین لیزر، قویاً بر واگرایی الکترون‌های نسبتی اثر می‌گذارد. در شدت پایین‌تر لیزر افروزنده سریع $I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ ، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش طول موج لیزر افروزنده سریع در هر دو حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی 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

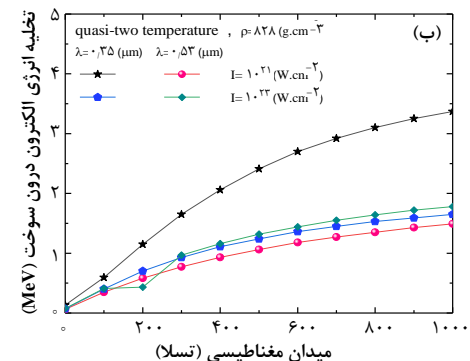
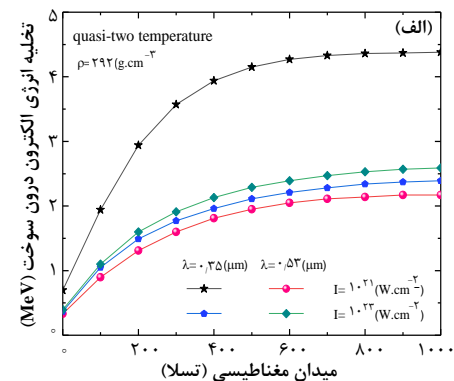


شکل ۶. نهشت انرژی الکترون‌های نسبی با توزیع انرژی نمای الف) بر حسب چگالی سوخت با محدوده $\rho = 292-828 \text{ g.cm}^{-3}$ در دو وضعیت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی، ب) بر حسب میدان مغناطیسی خارجی برای چگالی‌های $\rho = 292, 490, 828 \text{ g.cm}^{-3}$ ، با انرژی اولیه میانگین $E_0 = 3.5 \text{ MeV}$.

شکل ۷ نهشت انرژی الکترون‌های نسبی به درون سوخت برای دو نوع توزیع انرژی شبه-دودمایی و نمای 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 نمایی برای الکترون‌ها منجر به نهشت ضعیف‌تر انرژی خواهد شد. حال آنکه افزایش طول موج و شدت لیزر افزونده نتیجه معکوس را نشان می‌دهد و طیف نمایی نهشت بیشتر انرژی را به دست می‌دهد. بنابراین مقایسه داده‌های شکل ۷ نشان می‌دهد در حالت کلی نتیجه بهینه به ازای طول موج کوتاه‌تر $\lambda_{if} = 0.35 \mu\text{m}$ و شدت پایین‌تر $I = 1.0^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ و برای طیف الکترون‌ها دو دمایی الکترون‌ها حاصل می‌شود. در شکل ۸ تراورد 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. به‌علاوه در حضور میدان از پخش‌شدگی الکترون‌ها جلوگیری شده و تقریباً همه‌ی آن‌ها به سوخت برخورد کرده‌اند.



شکل ۴. نهشت انرژی الکترون‌های نسبی 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 افزونده الف) $I = 1.0^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ و ب) $I = 1.0^{23} \text{ W.cm}^{-2}$.

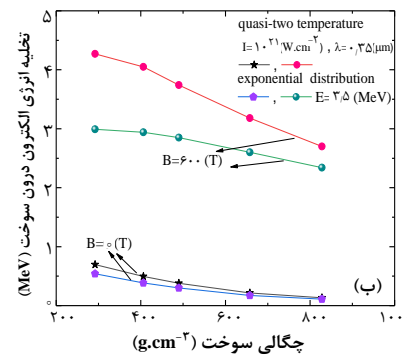
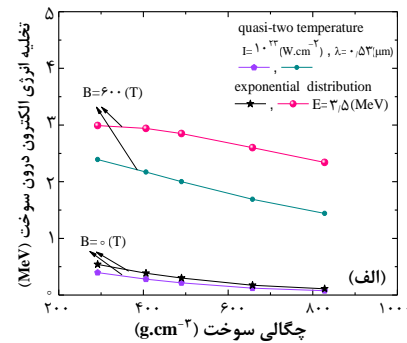


شکل ۵. نهشت انرژی الکترون‌های نسبی بر حسب میدان مغناطیسی خارجی با توزیع انرژی شبه-دودمایی $\rho = 292 \text{ g.cm}^{-3}$ الف) برای مقادیر $I = 1.0^{21}, 1.0^{23} \text{ W.cm}^{-2}$ ، $\lambda = 0.35, 0.53 \mu\text{m}$ ، $\rho = 292 \text{ g.cm}^{-3}$ ب) برای مقادیر $I = 1.0^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ ، $\lambda = 0.35, 0.53 \mu\text{m}$ ، $\rho = 828 \text{ g.cm}^{-3}$.

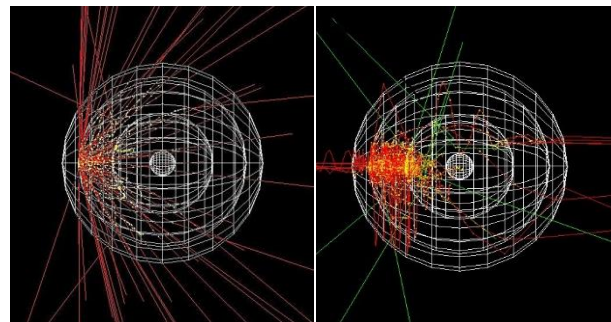
درون سوخت کاهش پیدا می‌کند و انرژی مؤثر بسیار کمی به درون سوخت تخلیه می‌شود. به طوری که با اعمال میدان مغناطیسی خارجی برای الکترون‌ها با طیف دو دمایی و لیزر با شدت $I = 1.0^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ و طول موج $\lambda_{if} = 0.35 \mu\text{m}$ نهشت انرژی درون سوخت بیش از ۵ برابر افزایش می‌یابد. چرا که وجود 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، $I = 1.0^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ ، $\lambda = 0.35 \mu\text{m}$ 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، $I = 1.0^{23} \text{ W.cm}^{-2}$ ، $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ 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 $I = 1.0^{21} \text{ W.cm}^{-2}$ حاصل می‌شود؛ به طوری 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. راست) تراپرد الکترون‌ها در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت 600 T . چپ) هندسه شبیه‌سازی شده و تابش الکترون‌ها (با رنگ قرمز و تعداد 1000 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

- 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).
- M. Hohenberger, et al., *Inertial confinement fusion implosions with imposed magnetic field compression using the OMEGA Laser*, *Phys. plasmas* **19**, 056306 (2012)
- D. J. Strozzi, et al., *Imposed magnetic field and hot electron propagation in inertial fusion hohlraums*, *J. Plasma Phys*, vol. **81**, 475810603 (2015).
- X. H. Yang, et al., *Effects of external axial magnetic field on fast electron propagation*, *Phys. plasmas* **18**, 093102 (2011).
- T. Johzaki, et al., *Electron beam guiding by strong longitudinal magnetic fields*, *Journal of Physics: Conference Series* **688** 012041(2016).
- S. A. Ghasemi, A.H. Farahbod, S. Sobhanian, *Analytical model for fast shock ignition*, *AIP Adv.* **4**, 077130 (2014).
- A. H. Farahbod, et al., *Improvement of non-isobaric model for shock ignition*, *Eur. Phys. J. D.*, **68:314** (2014)
- A. H. Farahbod, S. A. Ghasemi, *Fast-Shock Ignition: A new concept to Inertial confinement fusion*, *Iranian J. Phys. Res.* 12,4 (2013).
- S.A. Ghasemi, A.H. Farahbod, *The Role of fast ignitor in fast-shock ignition concept*, *Iranian J. Phys. Res.* **13,4** (2013).
- S.A. Ghasemi, A.H. Farahbod, *Fast-Shock Ignition: A New Concept to Inertial Confinement Fusion*, *Bull. Am. Phys. Soc.* **58**, 308 (2013).
- S.A. Ghasemi, A.H. Farahbod, *Electron Energy Deposition in Fast-Shock Ignition*, *Bull. Am. Phys. Soc.* **59**, No. 1 (2014).
- 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).
- 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