



بررسی مشخصه‌های باریکه‌ی الکترون تولید شده در برهم‌کنش تب افروزنده با هدف فشرده شده در رهیافت افروزش شوکی

سمیه رضائی^۱، امیرحسین فرهبد*^۱، محمدجعفر جعفری^۱، صمد سبحانیان^۲

۱. پژوهشکده‌ی پلاسما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

۲. گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، صندوق پستی: ۱۶۳-۵۱۶۶۵، تبریز - ایران

چکیده: پارامترهای تب لیزر افروزنده در افروزش شوکی در مرز برانگیختگی ناپایداری‌های لیزر- پلاسما و در نتیجه تولید الکترون‌های سریع قرار دارد. با توجه به طیف انرژی الکترون‌های تولید شده و نیز چگالی سوخت فشرده شده، این الکترون‌ها می‌توانند سبب پیش‌گرمایش سوخت و یا افزایش دامنه‌ی موج ضربه شوند. در این مقاله ابتدا پارامترهای هیدرودینامیکی هدف، پیش از اعمال تب ضربه با استفاده از کد هیدرودینامیکی-تابشی در یک بعد محاسبه و سپس توزیع انرژی باریکه‌ی الکترون در برهم‌کنش تب لیزر به شدت $10^{16} \text{ W cm}^{-2}$ با سوخت فشرده شده بررسی شد. در به دست آوردن پارامترهای چگالی و دمای سوخت فشرده شده شبیه‌سازی سیالی و به منظور بررسی برهم‌کنش تب افروزنده با پلاسما، رهیافت جنبشی به کار گرفته شد. با در نظر گرفتن شرایط واقعی پلاسما در لحظه‌ی فشرده‌گی بیشینه‌ی سوخت، نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی ذره‌ای پلاسما با مقیاس بلند، غیرهمگن و دمای بالا، توزیع دو دمایی جمعیت الکترون را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: افروزش شوکی، برهم‌کنش لیزر- پلاسما، الکترون‌های سریع، شبیه‌سازی سیالی و ذره‌ای

Characterization of electron beam generated in ignitor-plasma interaction of shock ignition concept

S. Rezaei¹, A.H. Farahbod*¹, M.J. Jafari¹, S. Sobhaniyan²

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

2. Nuclear Physics Department, Physics Faculty, University of Tabriz, P.O.Box: 51665-163, Tabriz - Iran

Abstract: Generally, laser ignitor parameters in shock ignition concept are above the threshold for laser-plasma instability and therefore are prompting the generation of fast electrons. Depending on the electron energy spectrum and compressed fuel density, the electrons can cause fuel preheating or increase the shock wave amplitude. In this paper, first, the target hydrodynamic parameters are calculated before driving ignitor pulse. Then, electron energy spectrum in the interaction of ignitor with plasma for laser intensity of 10^{16} Wcm^{-2} is considered. For density and temperature profiles of the compressed fuel, fluid approach and to evaluate ignitor pulse interaction with plasma, the kinetic approach are adopted. Considering the actual situation of the plasma at the moment of maximum compression, PIC simulations of high-scale, high-temperature and non-homogeneous plasma show bi-Maxwellian electron distribution.

Keywords: Shock ignition, Laser-plasma Interaction, Fast electrons, Hydrodynamic simulation, PIC simulation



۱. مقدمه

پارامترهای لیزری [۱۱، ۱۰]، طراحی هدف بهینه [۱۲] و مشخصه‌های تب افروزنده [۱۳] مطالعه و بررسی شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط آتسنی [۱۲] بر روی هدف مرجع نشان می‌دهد که برای دست‌یابی به شرایط افروزش بهینه، لازم است تب افروزنده در بازه‌ی زمانی ۷۰۰ پیکوثانیه و در زمان ۱۰ نانوثانیه راه‌اندازی شود. مطالعه‌ی جامعی در حوزه‌ی افروزش شوکی در مرجع‌های [۱۴، ۱۵] آورده شده است. با این وجود، جنبه‌های بسیاری هم‌چنان ناشناخته باقی مانده است.

اخیراً برهم‌کنش تب افروزنده با هدف فشرده شده و تولید الکترون‌های سریع برای افروزش شوکی مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. این الکترون‌ها که از ناپایداری‌های پارامتریک نظیر پراکندگی القایی رامان^(۸) و واپاشی دوپلاسمایی^(۹) تولید می‌شوند، دمای مؤثری در گستره‌ی ۳۰ تا ۷۰ کیلو الکترون ولت دارند و ممکن است سبب پیش‌گرمایش هدف و افزایش آنتروپی آن و در نهایت کاهش بازده فرایند افروزش هدف شوند. اما از آن‌جا که چگالی سطحی^(۱۰) پوسته در لحظه‌ی اعمال تب افروزنده بیش‌تر از برد الکترون‌های تا انرژی ۱۰۰ keV است، این الکترون‌ها در پوسته‌ی چگال متوقف می‌شوند [۱۶]. به منظور بررسی اثر الکترون‌های سریع بر روی عملکرد هدف لازم است ابتدا مشخصه‌های باریکه‌ی الکترونی تولید شده در ناحیه‌ی کرونا به دست آید که در پژوهش حاضر به آن پرداخته شده است. شدت تب متراکم‌کننده در افروزش شوکی در حدود $10^{15} \text{ W cm}^{-2}$ و در حدی است که در آن فرایند جذب از طریق برمشترالانگ معکوس صورت می‌گیرد. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که جذب انرژی لیزر با تغییر شدت در حوزه‌ی 10^{15} تا $10^{16} \text{ W cm}^{-2}$ در حد ۶۵٪ ثابت باقی می‌ماند [۱۷]. در حالی که بازده جذب برخوردی با افزایش شدت کاهش می‌یابد، نقش ناپایداری‌های غیرخطی و جذب تشدیدی افزایش می‌یابد زیرا بسامد برخورد با افزایش دما کاهش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین پدیده‌ها در برهم‌کنش تب پر شدت با پلاسما، شتاب گرفتن الکترون‌ها در نتیجه‌ی پراکندگی رامان و انتقال انرژی به گروه نسبتاً کوچکی از الکترون‌های سریع است. در این پژوهش ابتدا شرایط اولیه‌ی هدف با استفاده از کد هیدرودینامیکی مالتی^(۱۱) [۱۸] و در لحظه‌ی پیش از اعمال موج ضربه به دست آمده است. سپس با

انرژی حاصل از واکنش‌های گرماسته‌ای به عنوان منبع انرژی پاک و ارزان می‌تواند جای‌گزین مناسبی برای انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی و نیز شکافت هسته‌ای باشد [۱]. تاکنون تلاش‌های عملی بسیاری برای مهار کردن انرژی هم‌جوشی از طریق محصورسازی مغناطیسی و محصورسازی اینرسی به ویژه هم‌جوشی با لیزر به انجام رسیده است. در حوزه‌ی هم‌جوشی با لیزر رهیافت‌های متعددی نظیر افروزش مرکزی^(۱) [۲]، سریع^(۲) [۳]، برخوردی^(۳) [۴] و ضربه‌ای^(۴) [۵] وجود دارد که در اصول کلی مشابه و در جزئیات و الزام‌های فنی با هم متفاوت‌اند. در این میان، دو روش جدید معرفی شده - افروزش سریع (FI) و افروزش شوکی (SI) - قابلیت دست‌یابی به بهره‌ی هدف بالا را دارا هستند. در این دو روش در سوخت فشرده شده لکه‌ی داغ تشکیل می‌شود. مرحله‌ی فشردگی هدف در هر دو روش با استفاده از تب کم شدت و با پهنای زمانی از مرتبه‌ی چند نانوثانیه تا چگالی حدود صد برابر چگالی جامد انجام می‌شود. شرایط افروزش در رهیافت افروزش سریع از طریق به جاگذاری انرژی باریکه‌ی الکترونی چندمگا الکترون ولتی در مرکز سوخت [۶] و در رهیافت افروزش شوکی از طریق ایجاد یک موج ضربه در لحظه‌ی فشردگی پیشینه‌ی هدف و ایستایی^(۵) ایجاد می‌شود. برای این منظور در افروزش شوکی، هدف بلافاصله بعد از اعمال تب متراکم‌کننده، به صورت متقارن تحت تابش تب پر شدت و با پهنای زمانی کوتاه‌تر از تب متراکم‌کننده، قرار می‌گیرد؛ فشار کندگی بیش از ۳۰۰ مگابار تولید شده به این ترتیب در هدف، منجر به راه‌اندازی موج ضربه به سمت مرکز آن می‌شود. برخورد این موج ضربه با موج برگشتی از مرکز هدف سبب تشکیل لکه‌ی داغ می‌شود [۷]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای در حوزه‌ی نظری، شبیه‌سازی و حوزه‌ی تجربی افروزش شوکی انجام شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از کدهای هیدرودینامیکی - تابشی نظیر DUED [۸] و نیز آزمایش‌های انجام شده در مرکز تحقیقاتی هاپر^(۶) [۹] نشان می‌دهند که افروزش شوکی با مجموعه‌های لیزری به مراتب ساده‌تر از افروزش سریع توانایی دست‌یابی به مقادیرهای بالای بهره‌ی هدف را دارد. حوزه‌های وسیعی از افروزش شوکی نظیر بررسی هدف‌های متفاوت و مقیاس‌بندی^(۷) برای اندازه‌ی هدف و



تپ استاندارد هایپر (شکل ۱)، انجام شده است. این هدف شامل پوسته‌ی یخی دوترون-تریتون، با چگالی 0.25 g cm^{-3} ، شعاع خارجی 1.044 mm و ضخامت $211 \mu\text{m}$ است که با گاز دوترون-تریتون، با چگالی 0.1 mg cm^{-3} در تعادل گرمایی است.

لازم به ذکر است به منظور اطمینان از صحت نتیجه‌های شبیه‌سازی، رویکرد کلی هدف در افروزش شوکی با استفاده از کد مالتی شبیه‌سازی و نتایج با کارهای مشابه مقایسه شده است [۲۱]. از آنجا که تپ ضربه در لحظه‌ی 10.2 نانوثانیه راه‌اندازی و با هدف که از طریق تپ بی‌دررو متراکم شده است، برهم‌کنش می‌کند از این رو پارامترهای هیدرودینامیکی هدف، در لحظه‌ی 10.2 نانوثانیه، به دست آمده است. در این محاسبات طول موج تپ لیزر 0.35 میکرومتر است و همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تپ متراکم‌کننده در لحظه‌ی $t=0 \text{ ns}$ با توان کم و ثابت 0.5 تراوات آغاز و توان تپ لیزر از لحظه‌ی 4 تا 7.5 نانوثانیه به صورت نمایی افزایش یافته و سپس به مدت 2.7 نانوثانیه با قله‌ی ثابت 25 تراوات ادامه یافته است.

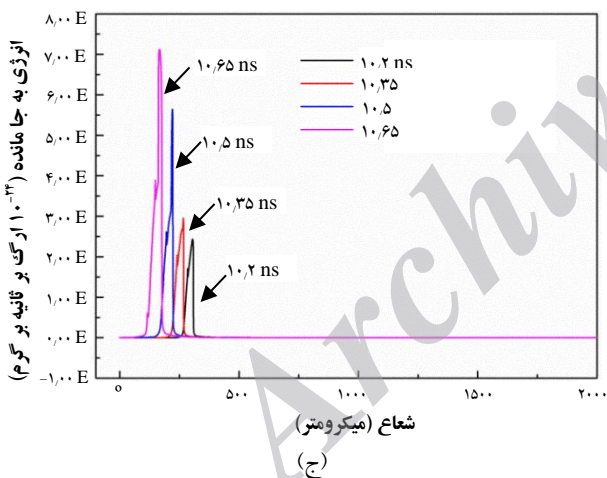
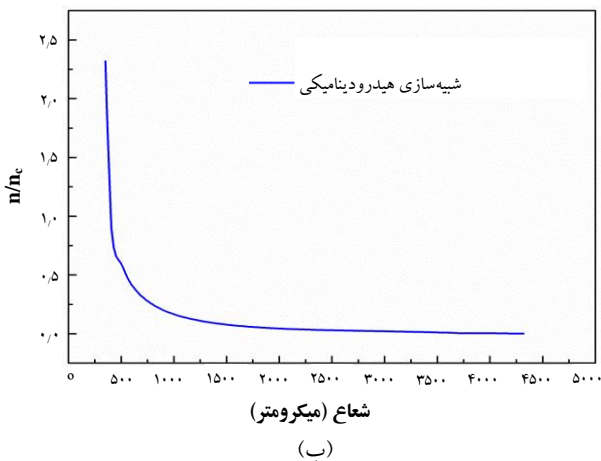
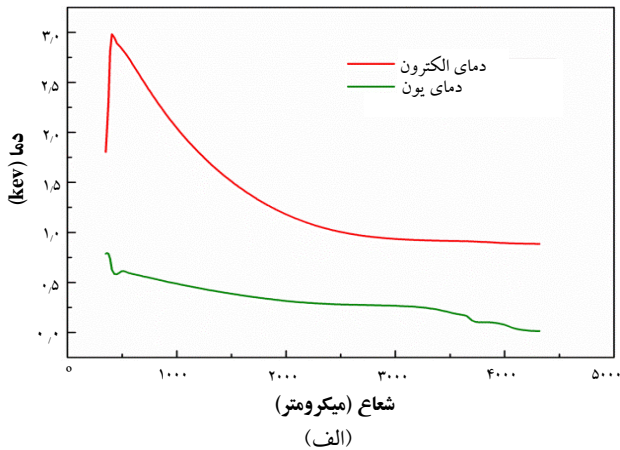
در پژوهش حاضر مطالعه و شبیه‌سازی مشخصه‌ی الکترون‌های سریع در برهم‌کنش تپ افروزنده با هدف فشرده شده به وسیله‌ی کد ذره‌ای پی‌کانت انجام شده است. برهم‌کنش‌های غیرجمعی در پلازما طی مسافتی مشخص غلاف می‌شود که به آن طول دی‌بای گفته می‌شود که در بیش‌تر موارد با مشخصه‌های دما و چگالی الکترونی توسط رابطه‌ی
$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 T_e}{n_e e^2}}$$
 در این جا T_e سرعت الکترون گرمایی است. شبکه‌ها در شبیه‌سازی PIC به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که اندازه‌ی آن‌ها از مرتبه‌ی طول دی‌بای باشد که البته از نقطه‌نظر پایداری عددی روش PIC نیز، این انتخاب حایز اهمیت است. پی‌کانت کد ذره‌ای الکترومغناطیسی سه‌بعدی است که به صورت موازی نوشته شده است و می‌توان در آن هدف چند لایه با تابعیت چگالی‌های مختلف و تپ لیزر با نمایه‌ی زمانی گوناگون را شبیه‌سازی کرد. در این پژوهش از تپ کسینوسی با قطبش p و پهنای 70 پیکوثانیه در شدت $W \text{ cm}^2$ 10^{16} استفاده شده است. اندازه‌ی شبکه متناسب با طول λ_D (حدود 30 نانومتر) و تعداد 50 ذره در هر سلول در نظر گرفته شده است.

توجه به گستره‌ی دمایی و چگالی الکترون‌ها و با استفاده از شرایط اولیه‌ی محاسبه شده با کد مالتی به عنوان ورودی در کد ذره‌ای پی‌کانت^(۱۲) که نسخه‌ی پیشرفته‌ی کد آلا‌دین^(۱۳) [۱۹] است، مشخصه‌های باریکه‌ی الکترونی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. روش محاسبه

با وجود این که طی چند دهه‌ی اخیر مطالعه‌های زیادی بر روی پلاسمای لیزری انجام شده است، اما مدل واحدی که قادر به توصیف تمامی فیزیک دربرگیرنده‌ی برهم‌کنش لیزر-پلازما از قبیل تحول باریکه‌ی پلازما، برهم‌کنش باریکه با هدف و تحول هدف باشد وجود ندارد. از طرف دیگر همه‌ی این فرایندها هم‌زمان و یا دست‌کم در طول مشخصه‌های زمانی و مکانی یکسانی اتفاق نمی‌افتد، بنابراین می‌توان توصیف نظری فیزیک برهم‌کنش را با صرف نظر کردن و یا میانگین‌گیری فرایندهایی که در مقیاس‌های زمانی و مکانی بزرگ تری نسبت به فرایندهای موردنظر اتفاق می‌افتند ساده کرد. در ساختار ساده شده با توجه به طول مشخصه‌های پلازما و تپ لیزری می‌توان پلازما را با مدل سیالی و یا مدل جنبشی توصیف کرد. از آنجا که پارامترهای لیزری تپ افروزنده (IL^2) در افروزش شوکی در مرز رشد ناپایداری‌های لیزر-پلاسمایی قرار می‌گیرد، بهره‌گیری از هر دو مدل سیالی و جنبشی در توصیف کامل فرایندها لازم است. در پژوهش حاضر ابتدا پارامترهای ماکروسکوپی پلازما در پایان مرحله‌ی فشرده‌گی و درست پیش از اعمال تپ ضربه با استفاده از شبیه‌سازی سیالی شبیه‌سازی شده است، سپس برای به دست آوردن طیف انرژی الکترون‌ها در برهم‌کنش تپ ضربه با هدف فشرده شده از توصیف جنبشی استفاده شده است. کدهای سیالی مالتی و ذره‌ای پی‌کانت ابزارهای اصلی به کار گرفته شده در این مقاله‌اند.

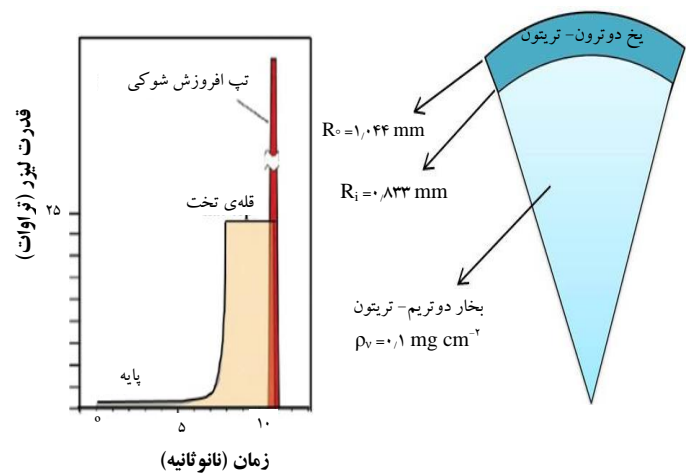
مالتی، کد هیدرودینامیکی-تابشی با رویکرد لاگراژی است و شامل مدل سه‌دمایی مجزا برای الکترون، یون و تابش، با ضرب‌های ترابرد کلاسیکی و هدایت گرمایی اسپیتزر با شار محدود^(۱۴)، معادله‌ی حالت سزومی^(۱۵)، پخش چندگروهی تابش و واکنش‌های هم‌جوشی است. هم‌چنین در این کد، ذرات باردار حاصل از واکنش هم‌جوشی (در مورد واکنش دوترون-تریتون، ذرات آلفا) انرژی خود را با مدل پخش چندگروهی به جا می‌گذارند. شبیه‌سازی‌ها بر روی هدف مرجع و با به کارگیری



شکل ۲. نمایه‌ی (الف) دمای الکترون و یون، (ب) چگالی الکترون در لحظه‌ی پیش از اعمال تب فروزنده، (ج) مقدار انرژی به جا مانده‌ی تب لیزری متراکم‌کننده.

جدول ۱. شرایط اولیه‌ی استفاده شده در شبیه‌سازی ذره‌ای پی‌کانت

شدت تب (P)	$10^{16} \text{ W cm}^{-2}$
طول موج	$0.35 \mu\text{m}$
جرم و عدد اتمی	$Z=1, M_i=2.5 m_p$
نمایه‌ی چگالی	خطی و نمایه
اندازه‌ی پلاسما	$1000 \mu\text{m}$
چگالی ناحیه‌ی ۱	0.01 تا $0.03 n_c$
چگالی ناحیه‌ی ۲	0.02 تا $0.1 n_c$
چگالی ناحیه‌ی ۳	0.1 تا $1.1 n_c$

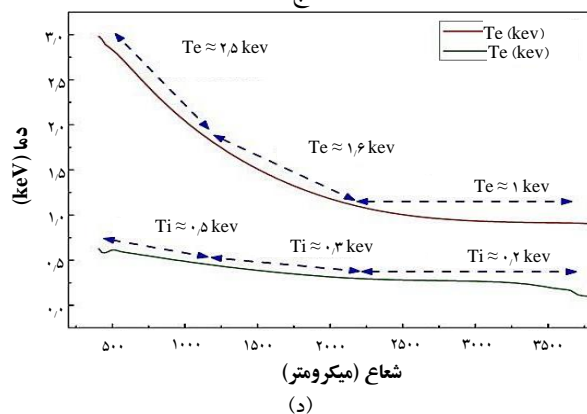
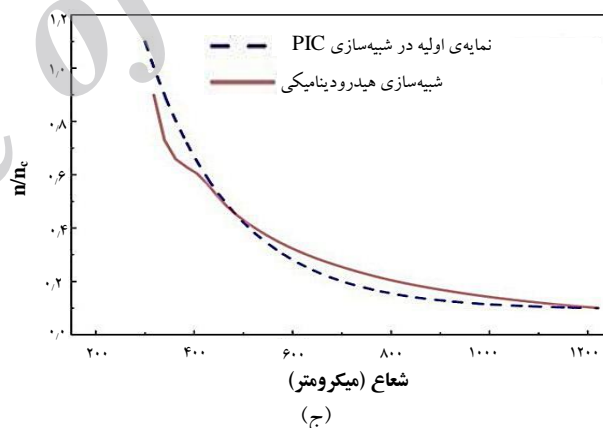
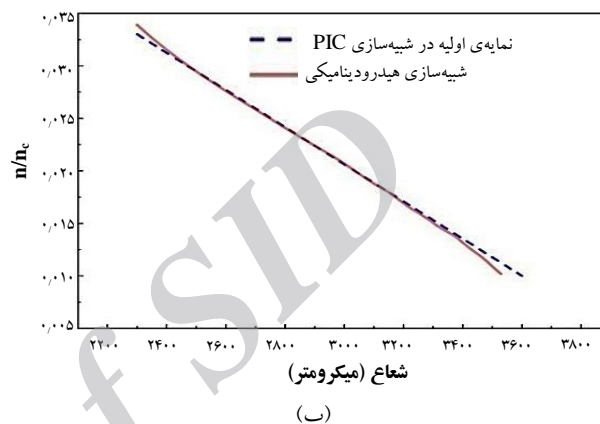
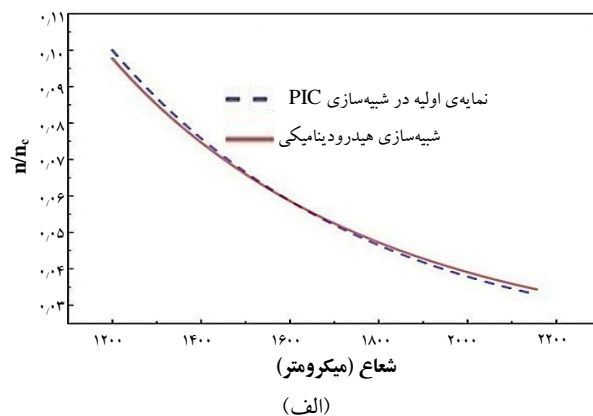


شکل ۱. هدف مرجع استفاده شده در هاپیر برای افروزش شوکی [۲۰].

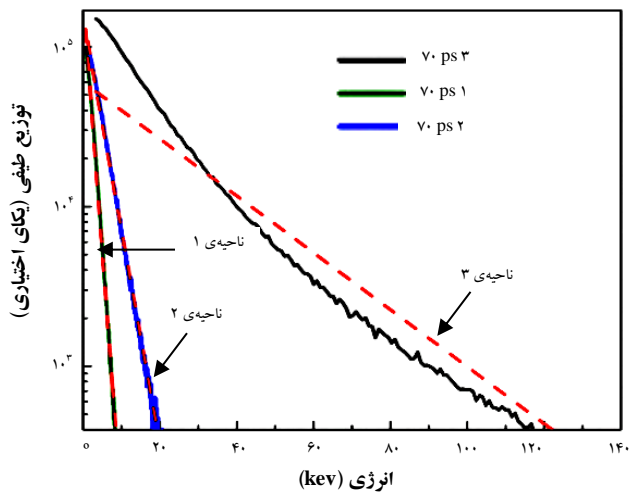
۳. شبیه‌سازی‌های یک‌بعدی سیالی و ذره‌ای

در بخش اول، شبیه‌سازی‌های یک‌بعدی با استفاده از کد مالتی و با تقارن کروی انجام شده است. شکل ۲، نمایه‌ی چگالی الکترون و دمای الکترون و یون را در لحظه‌ی 10.2 نانوثانیه نشان می‌دهد. همچنین مقدار انرژی به جا مانده بر واحد جرم در زمان آغاز اعمال تب ضربه و در زمان‌های بعدی در شکل ۲ ج، نشان داده شده است. با توجه به نمایه‌ی چگالی الکترون در شکل ۲ ب، مقیاس مکانی ناحیه‌ی کرونا‌ی تشکیل شده پس از برهم‌کنش تب متراکم‌کننده حدود 3000 میکرون است. شبیه‌سازی کامل و هم‌زمان این ناحیه طی برهم‌کنش با تب افروزنده و با استفاده از کد پی‌کانت از نظر محاسباتی بسیار زمان‌بر و با امکانات موجود تقریباً ناممکن است. به همین علت در این پژوهش، ناحیه‌ی کرونا در سه قسمت مجزا با تغییرات چگالی درج شده در جدول ۱، شبیه‌سازی شد تا سهم اصلی ناحیه‌ی جذب انرژی مشخص شود. شکل ۳، ناحیه‌های مختلف چگالی الکترون را نشان می‌دهد که به چگالی بحرانی بهنجار شده است.

هم چنین تابع برازش برای نمایه‌ی چگالی و دما که به عنوان شرایط اولیه در کد پی کانت استفاده شده است در شکل ۳ ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمایه‌ی چگالی در مجاورت سطح بحرانی ($n_e = 9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) با طول مقیاس تقریباً ۲۵۰ میکرون نمایی است. شکل ۳، نیز نمایه‌ی دمای هدف استفاده شده در لحظه‌ی ۱۰/۲ ns برای الکترون و یون و نیز میانگین دمایی در کد پی کانت را نشان می‌دهد. پارامترهای لیزر مورد استفاده در تمام شبیه‌سازی‌ها یکسان بوده و در جدول ۱ درج شده است. شبیه‌سازی‌ها برای تب لیزر با پهنای ۷۰ پیکوثانیه و با زمان خیزش ۵ پیکوثانیه انجام شده است. توزیع طیفی (انرژی) الکترون‌ها برای ناحیه‌های مختلف در شکل ۴ رسم شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۴ الف و ۴ ب، مشاهده می‌شود، توزیع طیفی (انرژی) الکترونی در انتهای زمان شبیه‌سازی (منحنی آبی‌رنگ) نسبت به زمان آغازین شبیه‌سازی (منحنی مشکی‌رنگ) تغییر زیادی نکرده است، در حالی که جمعیت قابل توجهی از الکترون‌ها در ناحیه‌ی ۳، انرژی کسب کرده و توزیع دمایی الکترون‌ها در این قسمت از توزیع ماکسولی اولیه فاصله گرفته است (شکل ۴ ج). هم چنین شیب لگاریتمی منحنی‌های توزیع انرژی در لحظه‌ی ۷۰ پیکوثانیه برای هر سه ناحیه‌ی چگالی مشخص شده در جدول ۱ در شکل ۵ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع انرژی برای دو ناحیه‌ی دورتر از چگالی بحرانی را می‌توان با یک خط برازش کرد در حالی که برای ناحیه‌ی نزدیک به چگالی بحرانی (منحنی با رنگ مشکی) این توزیع را می‌توان با توزیع دو دمایی ماکسولی برازش کرد و دمایی متناظر با الکترون‌های سرد و داغ را به دست آورد.



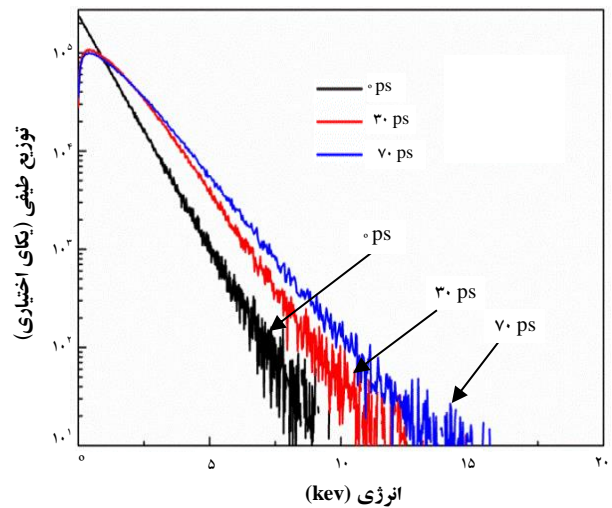
شکل ۳. نمایه‌ی چگالی الکترون حاصل از شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و منحنی برازش شده برای ناحیه‌ی (الف) ۰٫۱ تا ۰٫۳ n_e ، (ب) ۰٫۳ تا ۰٫۷ n_e ، (ج) ۰٫۷ تا ۱٫۱ n_e ، (د) نمایه‌ی دمای الکترون و یون و میانگین دمایی استفاده شده در شبیه‌سازی.



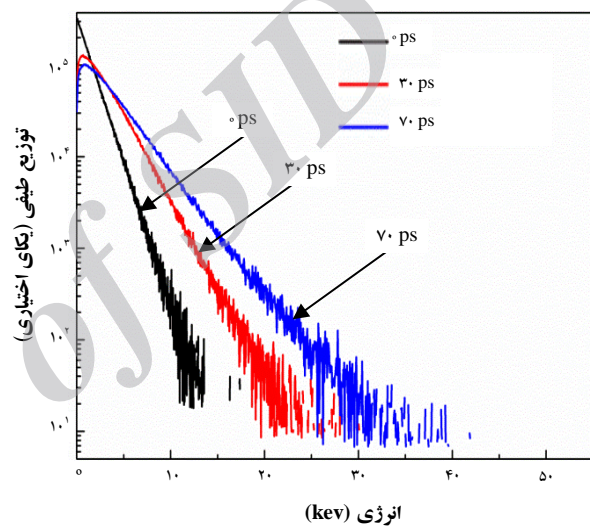
شکل ۵. شیب لگاریتمی توزیع طیفی (انرژی) الکترون در انتهای زمان شبیه‌سازی و برای ناحیه‌های مشخص شده در جدول ۱.

۴. نتیجه‌گیری

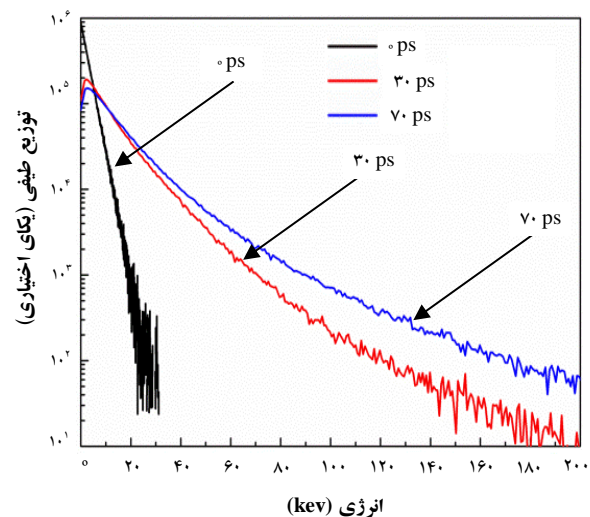
از آنجا که الکترون‌های داغ، ناحیه‌ی برهم‌کنش لیزر-پلازما را به سرعت ترک می‌کنند و میانگین طول پویس آن‌ها نسبتاً بلند است، در نتیجه انرژی را از سطح هدف به مرکز آن انتقال می‌دهند. بنابراین دمای پلازما در ناحیه‌ی برهم‌کنش به طور غالب با دمای T_e مشخص‌کننده‌ی جمعیت الکترون‌ها تعیین می‌شود. این الکترون‌ها، الکترون‌های گرمایی نامیده می‌شوند در حالی که جمعیت الکترون‌های داغ بسیار کم‌تر از الکترون‌های گرمایی است اما انرژی بیش‌تری با خود حمل می‌کنند؛ به این دلیل شتاب و تراکم الکترون‌های داغ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بسیاری از کاربردهای جدید پیشنهاد شده بر مبنای الکترون‌های پرانرژی است. در این پژوهش از کد هیدرودینامیکی برای توصیف پلازما، پیش از اعمال تپ ضربه استفاده شده است. نتیجه‌های به دست آمده از این شبیه‌سازی به ویژه نمایه‌ی چگالی و دمای الکترون و یون، نقطه‌ی آغاز شبیه‌سازی‌های ذره‌ای است. برای این منظور توزیع انرژی الکترون‌ها با استفاده از کد ذره‌ای برای سه ناحیه‌ی چگالی مجزا شبیه‌سازی شد. نتیجه‌های به دست آمده، توزیع دو دمایی الکترون‌ها در ناحیه‌ی با چگالی 0.1 تا $1.1 n_c$ را نشان می‌دهد. هم‌چنین از آنجا که بخش عمده‌ای از انرژی لیزر در برهم‌کنش محرک متراکم‌کننده با هدف در حوالی سطح بحرانی جذب می‌شود برای بررسی سایر پارامترها می‌توان شبیه‌سازی خود را به ناحیه‌ی کوچکی از حوالی این سطح محدود کرد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. توزیع طیفی (انرژی) جمعیت الکترون‌ها در برهم‌کنش تپ لیزری با شدت $10^{16} \text{ W cm}^{-2}$ با هدف با چگالی (الف) 0.1 تا $0.03 n_c$ ، (ب) 0.3 تا $0.1 n_c$ و (ج) 0.1 تا $1.1 n_c$.



1. Central ignition
2. Fast ignition
3. Impact ignition
4. Shock ignition
5. Stagnation
6. High power laser energy research facility (HiPER)
7. Scaling law
8. Stimulated raman scattering (SRS)
9. Two decay plasmon
10. Areal density
11. MULTI
12. Piccante
13. AlaDyn
14. Flux limited spitzer thermal conduction
15. SESAME

- [1] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/421667/nuclear-fusion/48320/History-of-fusion-energy-research>.
- [2] J. Nuckolls, L. Wood, Laser Compression of Matter to Super-High Densities: Thermonuclear (CTR). *Nature*, 239 (1972) 139.
- [3] M. Tabak, J. Hammer, M.E. Glinsky, W.L. Kruer, S.C. Wilks, J. Woodworth, M. Campbell, M.D. Perry, Ignition and high gain with ultrapowerful lasers. *Physics of Plasmas* (1994-present), 1(5) (1994) 1626-1634.
- [4] M. Murakami, H. Nagatomo, H. Azechi, F. Ogando, M. Perlado, and S. Eliezer, Innovative ignition scheme for ICF—impact fast ignition, *Nuclear fusion*, 46(1) (2005) 99.
- [5] R. Betti, C.D. Zhou, K.S. Anderson, L.J. Perkins, W. Theobald, A.A. Solodov, Shock ignition of thermonuclear fuel with high areal density, *Physical review letters*, 98(15) (2007) 155001.
- [6] S. Atzeni, Inertial fusion fast ignitor: Igniting pulse parameter window vs the penetration depth of the heating particles and the density of the precompressed fuel, *Physics of plasmas*, 6 (1999) 3316.
- [7] M. Lafon, X. Ribeyre, G. Schurtz, Gain curves and hydrodynamic modeling for shock ignition, *Physics of Plasmas*, 17 (2010) 052704.
- [8] S. Atzeni, 2-D Lagrangian studies of symmetry and stability of laser fusion targets, *Computer Physics Communications*, 43(1) (1986) 107-124.
- [9] D. Batani, Experimental results on advanced inertial fusion schemes obtained within the HiPER NUKLEONIKA, 57(1) (2012) 3–10.
- [10] S. Atzeni, A. Marocchino, A. Schiavi, G. Schurtz, Energy and wavelength scaling of shock-ignited inertial fusion targets, *New Journal of Physics*, 15(4) (2013) 045004.
- [11] X. Ribeyre, M. Lafon, G. Schurtz, M. Olazabal-Loum'e, J. Breil, S. Galera, S. Weber, Shock ignition: modelling and target design robustness, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 51(12) (2009) 124030.
- [12] S. Atzeni, A. Schiavi, A. Marocchino, Studies on the robustness of shock-ignited laser fusion targets, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 53(3) (2011) 035010.
- [13] M. Lafon, X. Ribeyre, G. Schurtz, Optimal conditions for shock ignition of scaled cryogenic deuterium–tritium targets, *Physics of Plasmas*, 20 (2013) 022708.
- [14] D. Batani, S. Baton, A. Casner, S. Depierreux, M. Hohenberger, O. Klimo, M. Koenig, C. Labaune, X. Ribeyre, C. Rousseaux, G. Schurtz, W. Theobald, V.T. Tikhonchuk, Physics issues for shock ignition, *Nuclear Fusion*, 54(5) (2014) 054009.
- [15] S. Atzeni, X. Ribeyre, G. Schurtz, A.J. Schmitt, B. Canaud, R. Betti, L.J. Perkins, Shock ignition of thermonuclear fuel: principles and modelling, *Nuclear Fusion*, 54(5) (2014) 054008.
- [16] R. Betti, W. Theobald, C.D. Zhou, K.S. Anderson, P.W. McKenty, S. Skupsky, D. Shvarts, V.N. Goncharov, L.A. Delettrez, P.B. Radha, T.C. Sangster, C. Stoeckl, D.D. Meyerhofer, Shock ignition of thermonuclear fuel with high areal densities, in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, (2008).
- [17] O. Klimo, V.T. Tikhonchuk, X. Ribeyre, G. Schurtz, C. Riconda, S. Weber, J. Limpouch, Laser plasma interaction studies in the context of shock ignition, Transition from collisional to collisionless absorption, *Physics of Plasmas*, 18 (2011) 082709.
- [18] R. Ramis, J. Meyer-ter-Vehn, J. Ramírez, MULTI2D—a computer code for two-dimensional radiation hydrodynamics, *Computer Physics Communications*, 180(6) (2009) 977-994.
- [19] C. Benedetti, A. Sgattoni, G. Turchetti, P. Londrillo, A High-Accuracy PIC Code for the Maxwell–Vlasov Equations, *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 36(4) (2008) 1790-1798.
- [20] S. Atzeni, A. Schiavi, C. Bellei, Targets for direct-drive fast ignition at total laser energy of 200–400 kJ., *Physics of plasmas*, 14 (2007) 052702.
- [21] M.J. Jafari, A.H. Farahbod, S. Rezaei, Effect of ignitor time behavior on performance of shock ignition scheme, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 72(3) (2015) 81-86.