

بهبود بهره انرژی با پیکربندی سوخت $DT+D^3He$ در رآکتور گداخت هسته‌ای با راه‌انداز باریکه یونی سنگین

سهیل خوشبین‌فر^۱ و سیدعلی تقوی^۲

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان

پست الکترونیکی: skhoshbinfar@guilan.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۱/۲۴)

چکیده

امید است که استفاده از سوخت‌های پیشرفته در نسل دوم نیروگاه‌های گداخت هسته‌ای رخ دهد. محاسبات نظری نشان می‌دهد که در چنین سوختی، دمای بالاتر پلاسما در حدود 100 keV شرط لازم برای رونق نرخ واکنش همجوشی هسته‌ای است. با این حال، ایجاد چنین شرایط دمایی مستلزم بهره‌گیری از راه‌اندازهای بسیار قوی‌تر از آنچه امروزه در اختیار است، می‌باشد. در این پژوهش، با معرفی پیکربندی بهینه‌سازی شده دوگانه شامل لایه‌های سوخت DT و D^3He ، مناسب در رآکتور گداخت با راه‌انداز یونی سنگین، شرایط بهینه بهره انرژی بالا در سامانه 1.3 MJ شبیه‌سازی و استخراج گردید. سپس نشان داده شد که در چنین وضعیتی، بهره انرژی ایده‌آل، نسبت به حالت متناظر تک‌سوخت DT ، حدود ۲۲ درصد افزایش بازده از خود نشان می‌دهد. در اینجا سوخت درونی DT نقش ماشه افروزشی را ایفا نموده و لایه بیرونی‌تر D^3He علاوه بر لایه سوختی، در حفظ ذره و تابش نیز مؤثر بوده است.

واژه‌های کلیدی: رآکتور گداخت هسته‌ای، باریکه یونی سنگین، همجوشی محصور شده لختی، پیکربندی سوخت $DT+D^3He$ ، بهره انرژی بالا

۱. مقدمه

نوین در عرصه‌های دیگری چون صنعت و پزشکی نیز می‌گردد [۲]. در نسل اول رآکتورهای گداخت هسته‌ای به روش محصور سازی لختی از سوخت اصلی ایزوتوپ هیدروژن یعنی دوتریوم و تریتیوم بهره گرفته می‌شود. در حال حاضر به دلیل محدودیت‌های فنی، این ترکیب سوخت در بازه دمایی keV مزایایی نسبت به رقبای خود از جمله آهنگ واکنش‌پذیری و پارامتر اشتعال بالا را دارا است [۳]. با این وجود، به دلیل ذات

نیاز روزافزون بشر به منابع انرژی مطمئن در راستای توسعه پایدار و همچنین افزایش حساسیت‌های بین‌المللی در زمینه کاهش آلاینده‌های زیست محیطی به ویژه پرتوزا، موجب شده تا مسیر تحقیق و توسعه در زمینه گداخت هسته‌ای شتاب قابل توجهی بیابد [۱]. ارمغان دانش هسته‌ای در زمینه گداخت به جز رفع دغدغه تامین انرژی جوامع، موجب انتقال و سرایت فناوری‌های

و ابعاد هندسی مناسب جهت نصب و استفاده در رآکتور گداخت هسته‌ای با سوخت پیشرفته، شرایط افروزش و اشتعال سوخت ترکیبی DT با لایه کمکی D^3He مطالعه و ارزیابی گردد.

۱.۱. معرفی کد DEIRA

کد عددی DEIRA بر پایه مدلی فیزیکی به منظور شبیه‌سازی همجوشی محصور شده لختی با راه‌اندازی باریکه یون‌های سریع، نوشته شده است که در آن سازوکار فرایندهای فیزیکی اصلی همجوشی محصور شده گنجانده شده و شامل حل عددی به روش تفاضل محدود کاملاً ناصریح معادلات هیدرودینامیکی بقای تکانه، انرژی و پیوستگی جرم شامل تک‌شاره با سه دمای یونی، الکترونی و تابش است. این کد ۱- بعدی ۳- دمایی، توسط پرفسور میخائیل باسکو^۱ (محقق برجسته مؤسسه تحقیقاتی آی‌تپ^۲ روسیه) تحت فرترن ۷۷ در سال ۱۹۹۰ میلادی انتشار یافت و در این پژوهش از آخرین نسخه کد یعنی ویرایش ۴ آن استفاده شده است. این کد قابلیت طراحی هدف‌های همجوشی در سه هندسه صفحه‌ای، استوانه‌ای و کروی را داراست و نیز می‌توان چنین اهدافی را به طور متقارن با باریکه‌های یونی مورد تابش قرار داد که در این صورت یون‌ها در امتداد شعاع هدف انتشار می‌یابند. همچنین می‌توان ترکیباتی اختیاری از ایزوتوپ‌های دوتریم، تریتم و هلیوم-۳ را به عنوان سوخت گرما هسته‌ای در هدف تعبیه نمود. در زیر به مواردی که اساس مدل سازی کد DEIRA می‌باشد، اشاره می‌کنیم:

معادلات یک بعدی تک‌شاره‌ای دو دمایی مگنتوهیدرودینامیک، رسانندگی گرمایی یون و الکترون، و وشکسانی طبیعی یون.

معادله پخش برای مؤلفه‌های محوری میدان مغناطیسی. لازم به ذکر است که معادلات مگنتوهیدرودینامیک تنها برای هدف‌هایی با هندسه صفحه‌ای و استوانه‌ای قابل محاسبه می‌باشد و مؤلفه میدان مغناطیسی برای هندسه استوانه‌ای، فقط در راستای محور استوانه و برای هندسه صفحه‌ای،

پرتوزای ایزوتوپ تریتم کماکان نگرانی آلودگی پرتوی برقرار است. علاوه بر این، خطر نوترون‌های $14/1\text{ MeV}$ که موجب ایجاد میدان‌های شدید گاما و پرتوهای ثانویه در اطراف می‌گردد نیز از چالش‌های پیش رو در مراقبت‌های پرتوی تاسیسات اصلی اطراف قلب رآکتور گداخت محسوب می‌شود [۴ و ۵]. لذا انتظار می‌رود که در طراحی‌های نسل‌های بعدی و به موازات ارتقای توان فنی راه‌اندازهای یونی یا لیزری، از سوخت‌های پیشرفته نظیر D^3He استقبال گردد [۶]. مطابق رابطه زیر محصولات فرایند گداخت D^3He ذرات باردار بوده و انتظار می‌رود تا پروتون‌های پرانرژی بتوانند کسر قابل ملاحظه از انرژی خود را در برخوردها از دست بدهند



بنابراین، از جمله مزایای بالقوه چنین طرحی، حذف یا کاهش شار ذرات غیر-یوننده و افزایش انباشت انرژی نهشتی محصولات گداخت در حجم پلاسمای داغ مرکزی خواهد بود. هم‌اکنون، ایده اصلی جهت مدیریت شار نوترونی ترکیب DT، استفاده از لیتیم به منظور تولید مجدد تریتم است که این امر نیز به نوبه خود منجر به افزایش تراز پرتوی می‌گردد [۴]. تحقیقات نشان می‌دهد که در روش افروزش مستقیم، استفاده از بذر DT مرکزی، به عنوان عامل مؤثری در افروزش و اشتعال سوخت D^3He محسوب می‌شود [۷]. در صورتی که بتوانیم از یک لایه D^3He به عنوان یک لایه حفاظ و همچنین سوخت استفاده نمود، قادر خواهیم بود تا در صورت ترابرد ذره و انرژی درون این لایه از نقش مؤثر آنها جهت افزایش بهره انرژی نهایی هدف بهره بگیریم. پس از گذشت بیش از دو دهه از معرفی رهیافت جدید افروزش سریع در سال ۱۹۹۴ میلادی، تحقیقات جدید نشان می‌دهد که با استفاده از لیزرهای پرتوان تابیده شده بر هدف‌های لایه‌ای می‌توان باریکه‌های پر شدت و هم‌سوی یونی به ویژه یون‌های سنگین‌تر تولید نمود [۸]. از این‌رو، تحقق ایده رآکتورهای گداخت هسته‌ای با راه‌انداز یونی جدی‌تر می‌شود. در این تحقیق تلاش شده است تا برای اهداف کروی

۱. M. M. BASKO

۲. ITEP (Institute for Theoretical and Experimental Physic)

عمود بر صفحه در نظر گرفته می شود.

معادله پخش برای چگالی انرژی تابشی در تقریب یک گروه بسامد (تقریب یک دمای تابشی مجزا).

سه معادله پخش برای چگالی انرژی سه گونه محصولات باردار و پراثری همجوشی یعنی، ذرات آلفای $MeV\ 3.5$ و پروتونهای $MeV\ 3$ و $MeV\ 14.7$.

چهار معادله سوختن هسته ای برای فراوانی نسبی ایزوتوپ های دوتریم، تریتوم، هلیوم-۳ و بور-۱۱.

معادله توقف برای انتشار یون های سریع در تقریب مسیر خط مستقیم.

برای محاسبه نهشت انرژی محصولات باردار، کم انرژی و کوتاه برد همجوشی هیچ معادله پخشی حل نمی شود، بلکه آنها را به عنوان منابع گرمایش محلی در نظر گرفته می شود. از طرفی برای محاسبه گرمایش غیرموضعی توسط نوترون های سریع، دو گزینه در دسترس است: تقریب اول پراکندگی و تقریب گرمایش غیریکنواخت. توجه کنید که در کد سهم گرمایش گرما- هسته ای توسط نوترون ها فقط برای کره سوخت مرکزی قابل ارزیابی می باشد. همچنین برای حل عددی معادلات هیدرودینامیک از ضریب وشکسانی فیزیکی در یک یاخته لاگرانژی استفاده می شود. برای تمام معادلات پخش و عبارت های رسانش گرمایی در معادلات انرژی هیدرودینامیکی، به طور ضمنی روش حل خطی در نظر گرفته شده است که در آن از مقادیر ظرفیت گرمایی و ضرایب انتقال گام زمانی ماقبل استفاده می شود.

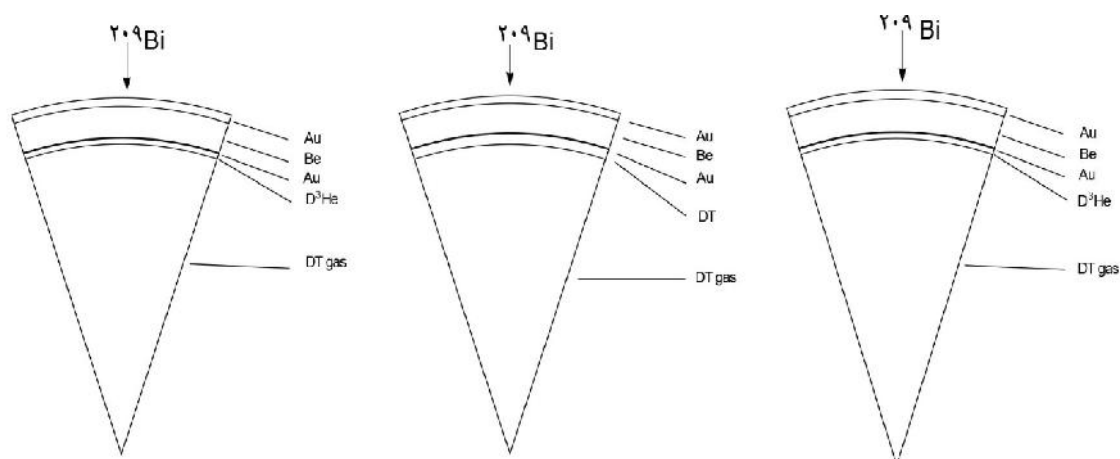
۲. بهینه سازی لایه های هدف

به منظور مطالعه جامع کل فرایند از لحظه تابش باریکه فرودی تا انفجار و تلاشی هدف در پایان، می توان فیزیک مسئله را به چند بخش تقسیم نمود. مرحله نخست، سازوکار ترابرد و نهشت انرژی باریکه فرودی در پلاسمای داغ هدف، دوم، انفجار درونی و هیدرودینامیک لایه ها و سوم، تشکیل لکه داغ

و سرایت شرایط افروزش و سوختن به سراسر حجم سوخت. مطابق سند طراحی مفهومی رآکتورهای گداخت هسته ای به روش محصور سازی لختی با راه انداز یونی، انتظار می رود که ابعاد هندسی هدف بین $mm\ 4-5$ در نظر گرفته شود و در طراحی هدف، به غیر از لایه سوخت، نقش کلیدی لایه های دیگر در فرایندهای هیدرودینامیکی، ترابرد انرژی و تکانه به دقت تنظیم شود [۹]. پیش بینی می شود که بهره انرژی واقعی در رآکتورهای گداخت به روش محصور سازی لختی با راه انداز یونی بین $100-40$ باشد [۱۰]. طرح کلی هدف های با بهره انرژی بالا در همجوشی باریکه یونی به جز سوخت اصلی، شامل سه لایه دیگر به ترتیب از بیرون به درون هدف، لایه کوبه^۱، جاذب و تثبیت کننده است. از موارد مهم در انتخاب مواد در لایه های بالا می توان به انتخاب موادی با Z بالا در لایه کوبه برای مراقبت و جلوگیری از هم گسیختگی سوخت در حین فرایند انفجار درونی و همچنین افزایش بازده جفت شدگی بیشتر میان باریکه- هدف اشاره می شود. لایه جاذب وظیفه جذب انرژی لایه کوبه و تبدیل آن به تکانه را بر عهده دارد. از این رو از مواد با Z پایین انتخاب می گردد [۱۱ و ۱۲]. در طراحی های مشابه از لایه هل دهنده^۲ نیز استفاده می شود که به همراه لایه کوبه، ناحیه جاذب را در بر می گیرند و در حفاظ تابشی، افزایش بازده انفجار درونی و بهره هیدرودینامیکی هدف نقش اساسی دارند. سوخت های پیشرفته، به دلیل دمای افروزش بالا، نیازمند انرژی و توان راه انداز بزرگتری نسبت به همتای DT هستند. از این رو، به کارگیری آنها به عنوان تنها لایه سوختی در هدف های همجوشی محصور شده لختی به سختی منجر به بروز شرایط افروزش در ناحیه مرکزی می گردد. با این حال، در صورتی که بتوان از آنها به عنوان یک لایه حفاظ گذاری استفاده نمود، قادر خواهیم بود تا در صورت ترابرد ذره و انرژی درون این لایه از نقش مؤثر آنها جهت افزایش بهره انرژی هدف نیز بهره بگیریم.

□ Tamper

□ Pusher



شکل ۱. طرح واره ساختار هدف لایه‌ای با سوخت D^3He خالص (راست)، سوخت DT خالص (وسط) و سوخت $DT+D^3He$ (چپ).

سازوکار فرایندهای فیزیکی اصلی همجوشی محصور شده گنجانده شده است و شامل حل عددی به روش تفاضلی محدود کاملاً ناصریح معادلات هیدرودینامیکی بقای تکانه، انرژی و پیوستگی جرم شامل پلاسمای تک‌شاره با سه دمای یونی، الکترونی و تابش است [۱۳]. درحین این فرایند، مرز سمت چپ ثابت شده است. علاوه بر این، بهینه‌سازی شعاع هدف، انرژی و توان باریکه فرودی و جرم سوخت D^3He در دو مورد به صورت مجزا در نظر گرفته شده است. با تنظیم مقادیر سرعت انفجار درونی، دما و فشار لایه در لایه‌های مختلف و زمان‌های مختلف، بهینه‌سازی اولیه جهت تعیین محدوده مناسب ضخامت لایه‌های هدف به ازای تابش باریکه فرودی با پارامترهای ورودی مشخص انجام گرفت. مطابق شکل ۱، چینش نسبی لایه‌های مختلف و موقعیت باریکه فرودی نمایش داده شده است.

فرایند گداخت به روش محصور شدگی لختی اهداف کروی به چهار مرحله تقسیم می‌شود. در مرحله نخست هدف کروی را توسط راه‌انداز طی مدت زمان معینی با باریکه یونی مورد تابش قرار می‌دهیم و در نتیجه تابش پراش در این مرحله، لایه بیرونی (لایه کوبه) تا حدی از سطح هدف جدا و به بیرون پرتاب می‌شود. در مرحله دوم، تصعید لایه محافظ و هم زمان بمباران بخش بیرونی هدف، موجب ایجاد تکانه‌ای در جهت معکوس به سمت لایه جاذب و آغاز انفجار درونی می‌شود. در مرحله سوم، به دلیل لختی لایه‌های شتابان در

عبور از این چالش جدی با معرفی ناحیه درونی‌تر با جرم ناچیز ترکیب سوختی DT مرتفع می‌گردد. افروزش مناسب سوخت پیشرفته D^3He در محدود دمای 100 keV رخ می‌دهد. لذا گرمایش مستقیم هدف و رساندن دمای مرکزی در مرحله پایانی انفجار درونی نیازمند امواج ضربه‌ای شدیدتری می‌باشد، بدین معنی که نیازمند راه‌انداز با توان و شدت بیشتری هستیم. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در مرحله اشتعال سوخت DT در همجوشی محصور شده لختی با باریکه یونی دمای سوخت به فراتر از یک صد keV بالغ می‌گردد. در این دما، آهنگ واکنش پذیری سوخت D^3He مطلوب می‌گردد و در نتیجه امکان سرایت موج اشتعالی به بخش‌های دیگر سوخت نیز تا حدی فراهم می‌گردد. از این‌رو، نقش افروزنده DT، تنها رساندن بخش مرکزی سوخت پیشرفته به دمای افروزش بوده و بهره انرژی کل هدف را متأثر نمی‌نماید.

برای هدف‌هایی با مقیاس راکتورهای گداخت هسته‌ای حاوی سوخت پیشرفته، چینش لایه‌های مواد و ضخامت هر یک نقش کلیدی در چگونگی رسیدن به بهره انرژی مطلوب خواهند داشت. بنابراین، در گام نخست، با چینش لایه‌های موازی مختلف هدف در شرایط مختلف (الف) سوخت D^3He خالص، (ب) سوخت DT خالص و (پ) سوخت D^3He و افروزنده DT، بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها با استفاده از کد شبیه‌سازی یک بعدی DEIRA انجام می‌گیرد [۱۳]. این کد برای شبیه‌سازی فرایند همجوشی محصور شده لختی هدف‌های تابیده شده با باریکه یونی به کار می‌رود و در آن

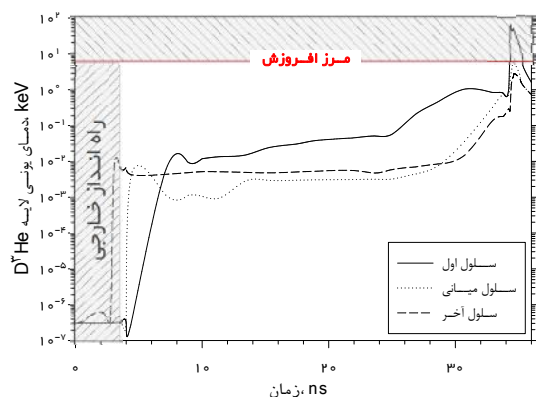
جدول ۱. مشخصات هندسی و فیزیکی لایه‌های هدف با سوخت اصلی DT، D³He و DT+D³He.

هدف با سوخت D ³ He خالص			هدف با سوخت DT خالص			هدف با افروزنده DT و سوخت D ³ He			جنس لایه
شعاع (mm)	چگالی (g/cm ³)	جرم (mg)	شعاع (mm)	چگالی (g/cm ³)	جرم (mg)	شعاع (mm)	چگالی (g/cm ³)	جرم (mg)	
۰-۳٫۳۲۶	۰٫۰۰۰۳	۰٫۰۴۶	۰-۳٫۳۲۶	۰٫۰۰۰۳	۰٫۰۴۶	۰-۳٫۳۲۶	۰٫۰۰۰۳	۰٫۰۴۶	DT Vapor
-	-	-	-	-	-	۳٫۳۲۶	۰٫۲۲۴	۳٫۶۲۲	DT
۳٫۳۲۶-۳٫۳۸۶	۰٫۳۱	۲٫۶۳۳	-	-	-	۳٫۴۳۵	۰٫۳۱	۲٫۸۰۶	D ³ He
۳٫۳۸۶-۳٫۳۹۵	۱۹٫۵	۲۵٫۳۵۲	۲۶٫۱۴۳	۱۹٫۵	۳٫۴۳۸، ۳٫۴۴۷	۳٫۴۹۵	۱۹٫۵	۳۰٫۰۱۸	Au
۳٫۳۹۵-۳٫۷۲۹	۱٫۹	۱۰۱٫۲۵۵	۹۹٫۴۷۴	۱٫۹	۳٫۷۶۷، ۳٫۴۴۷	۳٫۵۰۵	۱٫۹	۱۰۱٫۶۴۵	Be
۳٫۷۲۹-۳٫۸۲۱	۱۹٫۵	۳۲۱٫۲۸۳	۲۸۰٫۵۰۱	۱۹٫۵	۳٫۸۴۶، ۳٫۷۶۷	۳٫۸۲۲	۱۹٫۵	۳۲۲٫۳۰۷	Au

مرحله انفجار درونی و فرو- ریزش ماده در مرکز، انرژی جنبشی لایه‌ها به تدریج به انرژی درونی تبدیل شده که در اثر آن دما و چگالی بخش مرکزی صعود محسوسی را تجربه می‌کند. این مرحله مصادف با تشکیل لکه داغ احتمالی، افروزش واشتعال سراسری می‌باشد. سرانجام در مرحله آخر، موج اشتعالی برون‌سو، از مرکز مواد سوختی را در برگرفته و انرژی گرما هسته‌ای حاصل در کسر کوتاهی از مرتبه پیکوثانیه آزاد و به دنبال آن هدف متلاشی می‌شود. پس از اجرای برنامه به دفعات لازم، مقادیر بهینه هندسه هدف مطابق جدول ۱ استخراج گردید.

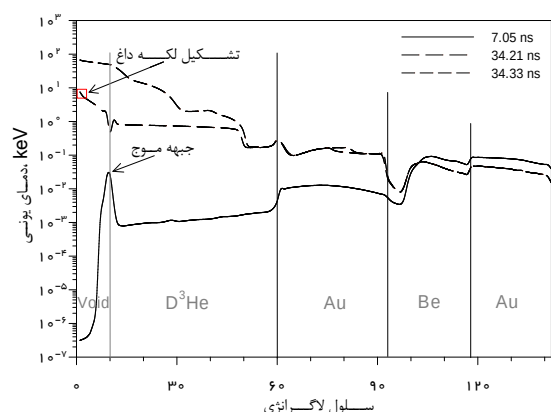
لازم به ذکر است که در لایه دوم از افروزنده DT جامد با چگالی یکنواخت 0.224 g/cm^3 استفاده شده است. همان گونه که پیش از این اشاره شده، ارزیابی اصلی در انتخاب مقادیر جدول ۱، کیفیت خروجی پارامترهای دینامیکی سوخت در پایان تحول هدف بوده است. متناسب با نوع هدف در جدول ۱، واکنش‌های گداخت هسته‌ای $D(D,T)p$ ، $D(^3\text{He},\alpha)p$ ، $D(T,\alpha)n$ و $D(D,^3\text{He})n$ به عنوان واکنش‌های اصلی درون برنامه اصلی فعال گردید. تشکیل لکه داغ مرکزی نیز به ازای برآورده شدن شرایط فیزیکی در ناحیه مرکزی با دمای $T_{\text{hs}} \sim 7 \text{ keV}$

و $0.4 \text{ g/cm}^3 \sim 0.2 \text{ } \rho R$ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به وجود لایه‌های مختلف و ابعاد هندسی هدف که برای استفاده در رآکتور گداخت هسته‌ای برنامه ریزی شده است، می‌بایست اثرات گرمایشی ناشی از تراورد محصولات گداخت را درون لایه‌های هدف در روند محاسبات گنجانده. از این‌رو، در فرایندهای گرمایشی علاوه بر سهم ذرات آلفای تولیدی، شار نوترون‌های 14.1 MeV و 2.45 MeV و همچنین پروتون‌های 14.7 MeV و 3.0 MeV در اندرکنش با یون‌های زمینه پلاسما لحاظ گردیده است. در این مرحله، از راه‌انداز باریکه یونی، حاوی یون‌های سنگین بیسموت (^{209}Bi) بهره جسته‌ایم، که انرژی متناسب به هر یون نیز 10 GeV می‌باشد [۱۱]. هر دو هدف مدنظر را با فرض ثابت بودن فشار، در شرایط یکسان بطور یکنواخت توسط راه‌اندازی با توان 360 TW به مدت $3/6 \text{ ns}$ مستقیماً مورد تابش قرار می‌دهیم. از این‌رو پس از خاموش شدن راه‌انداز هر کدام انرژی معادل $1/3 \text{ MJ}$ دریافت می‌کنند. پس از تابش یون‌های بیسموت توسط راه‌انداز به ساچمه سوخت، موج ضربه‌ای با حداکثر سرعت $1/44 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ طی مدت زمان $34/21 \text{ ns}$ به مرکز هدف می‌رسد. سپس با متراکم شدن مواد در مرکز و افزایش انرژی درونی محیط پلاسما، موجب



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تحول دمای یونی یاخته ابتدایی، میانی و انتهایی لایه سوخت D^+He خالص (نوار قائم در محدوده زمانی ۰ تا ۳/۶ نانو ثانیه، محدود تابش باریکه خارجی و نوار افقی در بالا نشانگر محدوده دمایی افروزش است).

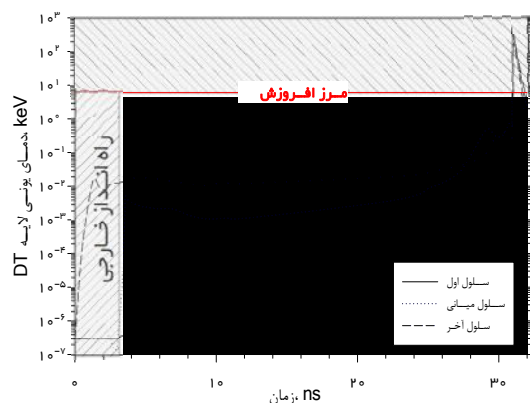
مشاهده می شود لحظاتی پیش از توقف تابش در ۳/۶ ns، موج انفجار درونی به بیرونی ترین بخش سوخت رسیده و دمای آن به سرعت افزایش می یابد. به طور مشابه یاخته میانی و درونی ترین یاخته نیز اندکی بعد شروع به حرکت می نمایند. در طول مرحله انفجار درونی تحول دمایی تقریباً یکنواخت می ماند که این موضوع برای بیرونی ترین یاخته واضح تر است. در این حالت، مواد شتابان انباشته شده در پشت هل دهنده با بخش بیرونی یاخته در تعادل دمایی باقی می ماند. با این وجود یاخته های درونی تر، به تدریج با جذب انرژی از بخش های بیرونی تر متحمل افت و خیز دمایی موقتی می گردند. در لحظات پایانی انفجار درونی و آغاز مرحله از دست دادن شتاب مواد در لایه های متحرک و افزایش چگالی، تبدیل انرژی جنبشی به انرژی درونی موجب افزایش بیشتر دما در یاخته های درونی تر می گردد. در مرحله مکث موقت، این تبدیل انرژی انجام گرفته و دمای درونی ترین یاخته از مرز دمایی افروزش عبور می کند. محدوده دمایی افروزش و اشتعال توسط نوار افقی در بالای نمودار مشخص شده است. همان گونه که مشاهده می شود یاخته های میانی به هیچ عنوان از مرز دمایی افروزش عبور نکرده و مقدار انرژی آزاد شده تنها ناشی از احتراق و اشتعال جرم ناچیزی در مرکز هدف می باشد.



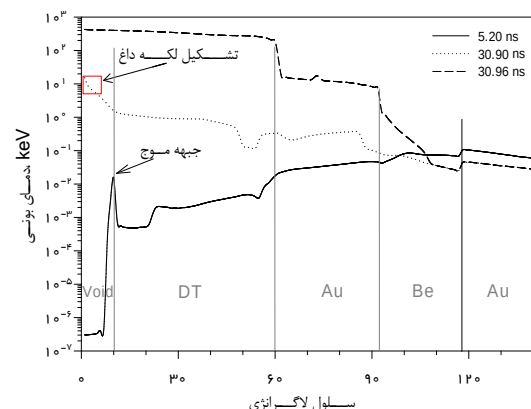
شکل ۴. دمای یونی لایه های هدف با سوخت D^+He خالص در سه مرحله مختلف تحول، (الف) در لحظه $t=7/05$ ns پیش از بسته شدن حفره مرکزی، (ب) در لحظه $t=34/21$ ns زمان تشکیل لکه داغ مرکزی و (پ) در لحظه $t=34/33$ ns پایان فاز انفجار بیرونی.

یونیزه شده کامل سوخت می شود. همچنین بیشینه فشار ۸۰ Gbar را تجربه می کند و بیشینه چگالی لایه سوخت تا مقدار 314 g.cm^{-3} افزایش می یابد. بر اساس شکل ۲، تحول دمای یونی هدف در سه مرحله متمایز نشان داده شده است. لحظه $t=7/05$ ns مصادف با رسیدن موج فرودی به مرکز هدف و لحظاتی پیش از بسته شدن حفره مرکزی است. لحظه $t=34/21$ ns هم زمان با تشکیل لکه داغ مرکزی است. همان گونه که مشاهده می شود تنها ۲ یاخته به دمای فراتر از مرز افروزش رسیده اند و لحظه $t=34/33$ ns هم زمان با تشکیل لکه داغ مرکزی و انتشار امواج اشتعالی به سمت بیرونی هدف در مراحل پایانی فاز انفجار بیرونی است. لازم به ذکر است که انتخاب تعداد سلول های لاگرانژی در هر لایه تابعی از درجه اهمیت ترابردی آن لایه و همچنین ضخامت آن می باشد. انتخاب نادرست آن موجب بروز مشکل در درون یابی اطلاعات استخراجی کد و در نتیجه کیفیت جواب ها خواهد شد.

بهره انرژی در این حالت بسیار ناچیز می باشد ($G=3$). در شکل ۳ نمودار تحول دمایی در عمق لایه سوخت از لحظه تابش باریکه یونی خارجی تا انفجار هدف ترسیم شده است. در این شکل نوار عمودی در محدوده زمانی ۰-۳/۶ ns مربوط به محدوده تابش باریکه یونی خارجی است. همان گونه که



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تحول دمای یونی یاخته ابتدایی، میانی و انتهایی لایه سوخت DT خالص (نوار قائم در محدوده زمانی ۰ تا ۳۰/۹۰ نانوثانیه، محدوده تابش باریکه خارجی و نوار افقی در بالا نشانگر محدوده دمایی افروزش است).



شکل ۴. دمای یونی لایه‌های هدف با سوخت DT خالص در سه مرحله مختلف تحول، (الف) در لحظه $t=5/20$ ns پیش از بسته شدن حفره مرکزی، (ب) در لحظه $t=30/90$ ns زمان تشکیل لکه داغ مرکزی و (پ) در لحظه $t=30/96$ ns پایان فاز انفجار بیرونی.

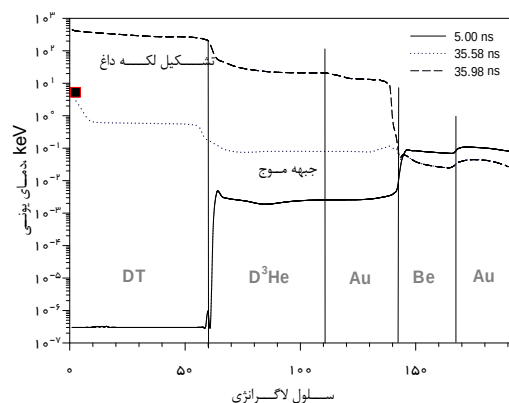
در گام بعدی شرایط افروزش و اشتعال هدفی با مقیاس رآکتور گداخت و تنها شامل سوخت DT بررسی و ارزیابی می‌گردد. با ثابت نگه داشتن پارامتر باریکه یونی تاییده شده و مطابق جدول ۱ با تغییرات انجام گرفته در خصوصیات هندسی هدف با سوخت جایگزین، شرایط افروزش و اشتعال استخراج شد. بر خلاف سوخت پیشرفته خالص D^3He ، در حالت اخیر بهره انرژی ایده آل هدف بالا بوده و بالغ بر ۳۵۱ می‌گردد. پس از تابش یون‌های بیسموت توسط راه‌انداز به ساچمه این هدف، موج ضربه‌ای با حداکثر سرعت $2/14 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ طی $30/90$ ns به مرکز هدف می‌رسد. سپس با متراکم شدن مواد در مرکز و افزایش انرژی درونی محیط پلاسما، موجب یونیزه شدن کامل سوخت می‌شود. در این میان، بیشینه فشار ۲۶۰ Gbar را تجربه می‌کند، همچنین بیشینه چگالی لایه سوخت تا مقدار 247 g.cm^{-3} افزایش می‌یابد. به طور مشابه، مطابق شکل ۴ منحنی تغییرات دمای یونی در لایه‌های مختلف سوخت در سه لحظه معین متناظر با $t=5/20$ ns لحظاتی پیش از رسیدن موج ضربه به مرکز هدف، لحظه $t=30/90$ ns هنگام تشکیل لکه داغ مرکزی و لحظه $t=30/96$ ns در پایان بازه انفجار بیرونی ناشی از موج اشتعالی برون‌سو. در مقایسه منحنی مشابه سوخت D^3He خالص مشاهده می‌شود که در حالت اخیر ابعاد هندسی

مطابق شکل ۵ نمودار تغییرات دمایی یاخته ابتدایی، میانی و پایانی لایه سوخت نمایش داده شده است. روند ابتدایی تحول نسبت به حالت قبل اندکی سریع‌تر شده، که ناشی از تفاوت چگالی جرمی سوخت در دو حالت می‌باشد. در حین فرایند انفجار درونی دما تقریباً در سراسر لایه سوخت بدون تغییر تحول می‌یابد.

لکه داغ مرکزی افزایش یافته و بالغ بر هفت یاخته می‌گردد. با توجه به ابعاد مشابه ناحیه حاوی بخار رقیق گاز DT، استنباط می‌شود که شعاع لکه داغ در حالت دوم حدوداً دو برابر شده است. علاوه بر این، تأثیر کلیدی لایه نازک هل‌دهنده طلا در حبس ذره و انرژی در لحظه پایانی انتشار موج اشتعالی برون‌سو، به وضوح نمایان است، به گونه‌ای که در این لحظه متوسط دمای یونی بالغ بر ۳۰۰ keV می‌شود. بنابراین پیش از بررسی گام سوم، به لحاظ کمی تا حدی واضح شده است که حضور پیکربندی سوخت جدید توجیه فیزیکی دارد. بر این اساس دمای بیشینه افروزش و اشتعال سوخت مرکزی DT موجب می‌شود تا شرایط افروزش سوخت بیرونی تر D^3He به ترتیب با سطح مقطع ۱b و آهنگ واکنش پذیری $10^{-16} \text{ cm}^3.\text{s}^{-1}$ بهینه خود پیشروی کند.

سوخت تا $63/4 \text{ g.cm}^{-3}$ افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۶، برای اولین بار تک‌یاخته اولیه دمای یونی فراتر از 5 keV را تجربه می‌کند. تحت شرایط حاکم لکه داغ با $\langle \rho R \rangle_{\text{hs}} = 0/23 \text{ g.cm}^{-2}$ تشکیل شده و افروزش سوخت رخ می‌دهد. سپس در بازه زمانی کمتر از 200 ps امواج اشتعالی به سوخت سرد اطراف لکه داغ با $\rho = 200 \text{ g.cm}^{-3}$ سرایت می‌کند. لحظه $35/98 \text{ ns}$ مصادف با عبور موج اشتعالی از مرکز به سمت نواحی مرز لایه هل‌دهنده است. مطابق شکل ۶، مشاهده می‌شود که در این حالت، برخلاف نتایج شکل ۲، اکنون دمای لایه حاوی سوخت D^3He افزایش یافته و در سراسر لایه روند نسبتاً یکنواختی حدود 50 keV را تجربه می‌کند. با این وجود، دمای ناحیه مجاور سوخت DT به طور متوسط بالغ بر 100 keV می‌گردد و همین دما شرایط مطلوب آغاز گداخت D^3He را فراهم می‌کند. در حالت گداخت سوخت DT خالص در شکل ۴ مشاهده می‌شود که در آن دمای هل‌دهنده طلا به طور متوسط حدود 20 keV بوده و انرژی نشتی تا بیش از نیمی از عمق لایه جذب کننده برلیوم نیز نفوذ کرده است. در مقایسه با این حالت، در شکل ۶، وجود لایه سوخت D^3He موجب حفظ انرژی شده و نفوذ انرژی نشتی را به لایه‌های بیرونی‌تر، تا نزدیکی مرز لایه هل‌دهنده و جاذب کاهش داده است.

بنابراین، متوسط دمای لایه D^3He در مقایسه با وضعیت مشابه در شکل ۲ چند برابر افزایش یافته است. علاوه بر موارد اشاره شده، انباشت انرژی و افزایش دمای بخش درونی هدف موجب شده تا مدت پایداری پلاسما پیش از تلاشی هدف، حدود 5 ns افزایش بیابد. در فرایند افروزش و اشتعال هدف با پیکربندی $\text{DT}+\text{D}^3\text{He}$ ، حدود 40% از جرم DT و 11% از جرم D^3He سوخته و انرژی گرما- هسته‌ای 559 MJ ، معادل با بهره انرژی 431 آزاد شد که 69% از آن سهم نوترون‌های $14/1 \text{ MeV}$ ، 20% سهم ذرات آلفای $3/5 \text{ MeV}$ و 9% سهم پروتون‌های $14/7 \text{ MeV}$ می‌باشد. بهره انرژی ایده‌آل هدف با پیکربندی ترکیبی جدید بالغ بر 431 می‌گردد که نسبت به وضعیت DT خالص، افزایش در حدود 23 درصد را نوید می‌دهد. پارامترهای اساسی راه‌انداز و دینامیکی سوخت



شکل ۶. دمای یونی لایه‌های هدف با پیکربندی سوخت $\text{DT}+\text{D}^3\text{He}$ در سه مرحله مختلف تحول، (الف) در لحظه $t=5/00 \text{ ns}$ پیش از بسته شدن حفره مرکزی، (ب) در لحظه $t=35/58 \text{ ns}$ زمان تشکیل لکه داغ مرکزی و (پ) در لحظه $t=35/98 \text{ ns}$ پایان فاز انفجار بیرونی.

۳. افروزش و اشتعال پیکربندی $\text{DT}+\text{D}^3\text{He}$

۳.۱. فرایند انفجار درونی

در آغاز، اجزای بیرونی هدف، توسط باریکه یونی گرم شده و سپس تبخیر، کاملاً یونیزه و سرانجام به سمت بیرون منبسط می‌شوند. این گونه به نظر می‌آید که یاخته‌های گرم شده از سطح جدا و به سمت بیرون رانده می‌شود. پایداری تکانه در اثر فشار کنده شدن، لایه‌های درونی را مجاب به حرکت به سمت درون می‌کند. در این لحظه یعنی در زمان $4/0 \text{ ns}$ به بیرونی‌ترین یاخته لایه جاذب ضربه‌ای با حداکثر فشار Mbar وارد می‌شود و لایه‌های داخلی را در لحظه $6/1 \text{ ns}$ به سمت مرکز فروریزش می‌کنند. در پی آن لایه‌های درونی با شتابی ملایم و سرعت $0/55 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ به سوی مرکز راهی می‌شوند و انفجار درونی آغاز می‌شود. سرعت انفجار درونی در زمان $19/05 \text{ ns}$ به مقدار بیشینه $2 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ رسیده و مطابق شکل ۶، اولین ضربه موج در لحظه 5 ns به مرز لایه DT می‌رسد. با اتمام انفجار درونی طی مدت $35/58 \text{ ns}$ و افزایش تدریجی پارامتر ρR ، انرژی جنبشی مواد به تدریج به انرژی درونی تبدیل شده و در حداکثر فشردگی مواد، شاهد توقف لحظه‌ای می‌باشیم. در این هنگام، شعاع بیرونی‌ترین یاخته لایه هل‌دهنده طلا از $3/5 \text{ mm}$ به $0/3 \text{ mm}$ کاهش یافته و چگالی لایه مرکزی

جدول ۲. پارامترهای راه‌انداز و خصوصیات انفجار درونی، افروزش و اشتعال سوخت DT+D³He.

ویژگی های هدف در قله اول $\langle rR \rangle$			ویژگی های هدف در قله دوم $\langle rR \rangle$			پارامترهای فیزیک راه‌انداز یونی	
DT	بیشینه ρR (g/cm ³)	۱٫۱۲	DT	بیشینه ρR (g/cm ³)	۱٫۲۳	انرژی راه‌انداز (MJ)	۱٫۳
	بیشینه دمای الکترون (keV)	۵٫۳۹		بیشینه دمای الکترون (keV)	۳۴۶	بیشینه توان (TW)	۳۶۰
	بیشینه دمای یون (keV)	۵٫۷۵		بیشینه دمای یون (keV)	۹۰٫۹	انرژی یون‌ها (GeV)	۱۰
	بیشینه دمای تابش (keV)	۰٫۸۸۳		بیشینه دمای تابش (keV)	۵٫۴۲	جرم لایه DT (mg)	۳٫۶۲۲
D ³ He	بیشینه ρR (g/cm ³)	۰٫۷۸	D ³ He	بیشینه ρR (g/cm ³)	۰٫۸۳	جرم لایه D ³ He (mg)	۲٫۶۸۸
	بیشینه دمای الکترون (keV)	۰٫۶۱۸		بیشینه دمای الکترون (keV)	۱۸۴	بهره انرژی هدف	
	بیشینه دمای یون (keV)	۰٫۶۱۸		بیشینه دمای یون (keV)	۵۵٫۷	بهره هیدرودینامیکی	۰٫۲۴
	بیشینه دمای تابش (keV)	۰٫۶۱۷		بیشینه دمای تابش (keV)	۱۰٫۴	بهره هدف	۴۳۱

در پیکربندی DT+D³He به طور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است.

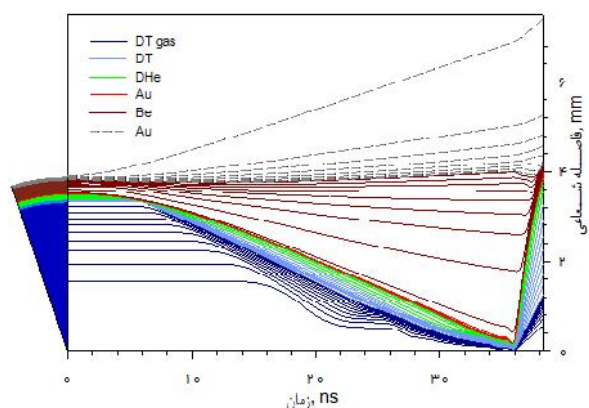
لازم به ذکر است که مقادیر گزارش شده در جدول ۱، مقادیر بهینه ضخامت و ابعاد هندسی لایه‌های مختلف هدف می‌باشد. با توجه به استدلال‌های اشاره شده در شکل ۶، انتظار داریم که مشارکت لایه سوخت D³He در بهره انرژی پیکربندی جدید محدود به نواحی هم جوار با بخش بیرونی لایه سوخت DT باشد. مطابق شکل ۷، مشاهده می‌شود که بیشینه تفاوت دمایی یاخته اول به میانی در اوج خود بالغ بر ۱۰۰ keV می‌گردد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که حدود ۱۰ درصد سوخت D³He در افزایش بهره انرژی پیکربندی جدید مشارکت داشته و همچنین موجب افزایش اندک متوسط دمای لایه DT نیز شده است، که در مجموع باعث بهبود میزان بهره انرژی گردیده است.

در شکل ۸، نمودار انفجار درونی را نشان داده شده است. ساچمه سوخت را به طور شعاعی به ۱۹۲ یاخته جرمی تقسیم و مسیر تحول مرز مشترک این یاخته‌ها در صفحه شعاع - زمان رسم نمودیم. در این نمودار، می‌توان کل فرایند را یک جا رصد کرد و در آن وقوع فرایند انفجار درونی به وضوح آشکار است. همان گونه که مشاهده می‌شود بخشی از لایه کوبه طلا در اثر جذب انرژی راه‌انداز یونی جدا شده و هاله پلاسمای رقیقی را تا انتهای مرحله انفجار کپسول در اطراف آن احاطه می‌کند. با کمک این نمودار نیز می‌توان به راحتی با محاسبه شیب متوسط در هر لایه هدف، سرعت انفجار درونی و بیرونی آنها را نسبت

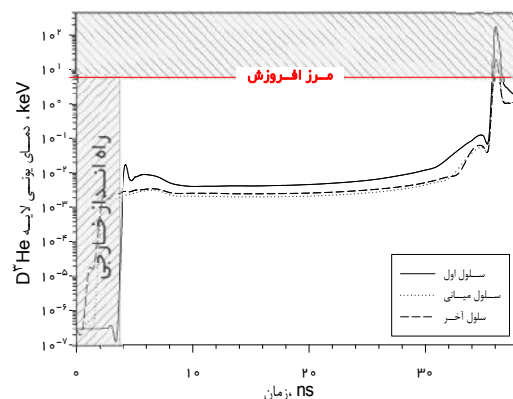
به لحظه مکث موضعی برآورد نمود. در سمت چپ منحنی قطاعی از هدف شامل پیکربندی سوخت DT+D³He پیش از تابش باریکه یونی بر سطح آن با رنگ آمیزی مشابه با ماده درون هر لایه در نمودار نیز نمایش داده شده است.

۲.۳. تابش باریکه و کنده شدن لایه کوبه

لایه کوبه طلا، مقدار ۰٫۶ MJ انرژی از تابش باریکه یونی دریافت می‌کند. با افزایش دما، ماهیت این لایه متمایل به پلاسما شده و در برابر عبور تابش شفاف می‌شود. سپس به لایه جاذب بریلیوم ۰٫۷ MJ انرژی می‌رسد. انرژی نهشتی به واسطه رسانش گرمایی الکترون‌های پلاسما به لایه‌های درونی انتقال می‌یابد، بنابراین یون‌ها توسط برخورد با الکترون‌ها گرم می‌شوند. سردتر بودن یون‌ها در لایه‌هایی درونی را می‌توان در شکل ۹ (الف) مشاهده نمود. البته این انرژی به طور غیرمستقیم سبب انفجار درونی می‌شود، بدین صورت که باریکه پرتوان بیسموت با گرمایش ذرات لایه محافظ، باعث کندن ناگهانی آن از سطح هدف می‌شود. همین امر تکانه‌ای رو به عقب به لایه بریلیوم اعمال می‌کند و ضربه موجی در اثر فشار حاصل از کنده شدن به سمت مرکز راهی می‌شود. در شکل ۹ (الف) مشاهده می‌شود، که این فشار در $t = 6.0 \text{ ns}$ قله‌ای با مقدار ۶۸ Mbar دارد. همچنین در این هنگام پوسته‌ای چگال با ضخامت 0.05 mm و چگالی 45 g.cm^{-3} در حوزه شعاعی لایه DT مشاهده می‌شود که با حداکثر سرعت 10^7 cm.s^{-1}



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار یکپارچه مکان-زمان تحول هدف از لحظه تابش تا انتهای انفجار کپسول حاوی سوخت $DT+D^3He$.

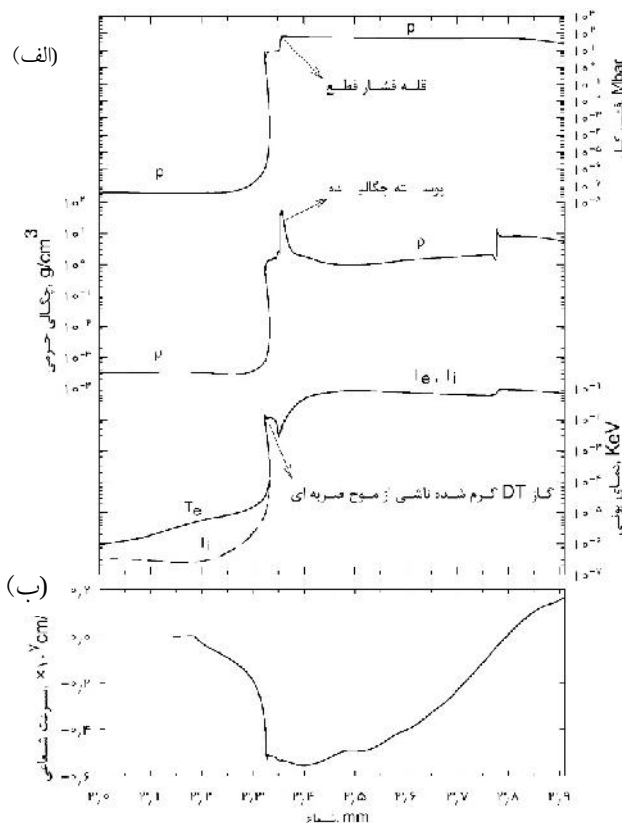


شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تحول دمای یونی یاخته ابتدایی، میانی و انتهایی لایه سوخت D^3He در پیکربندی $DT+D^3He$ (نوار قائم در محدوده زمانی ۰ تا ۳/۶ نانوثانیه، محدوده تابش باریکه خارجی و نوار افقی در بالا نشانگر محدوده دمایی افروزش است).

بیرونی بیانگر جدا شدن آن از سطح هدف، و نیز افزایش ملایم سرعت در جهت منفی بیانگر حرکت درونی مواد می‌باشد. همچنین نمودارهای شکل ۱۰، تغییر مقادیر هیدرودینامیکی را در حین انفجار درونی با زمان نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با گذشت زمان مقادیر دما، چگالی جرمی و فشار در لایه‌های بیرونی (شعاع بزرگتر از ۳/۵ mm) کاهش می‌یابد و برعکس در لایه‌های درونی، این مقادیر در حال افزایش هستند. از اختلاف مقادیر دما، چگالی و فشار بین بازه ۲۰-۳۰ ns در لایه مرکزی، رشد سریع این پارامترها با زمان به وضوح دیده می‌شود. دمای یونی ۱/۱۱ keV، چگالی ۰/۱۷ g.cm^{-۳} و فشار ۱۴۳ Mbar در این زمان برای لایه DT گازی ثبت شده است. اندکی پس از این انفجار درونی متوقف شده و شرایط افروزش مهیا می‌شود که در بخش بعدی به آن می‌پردازیم.

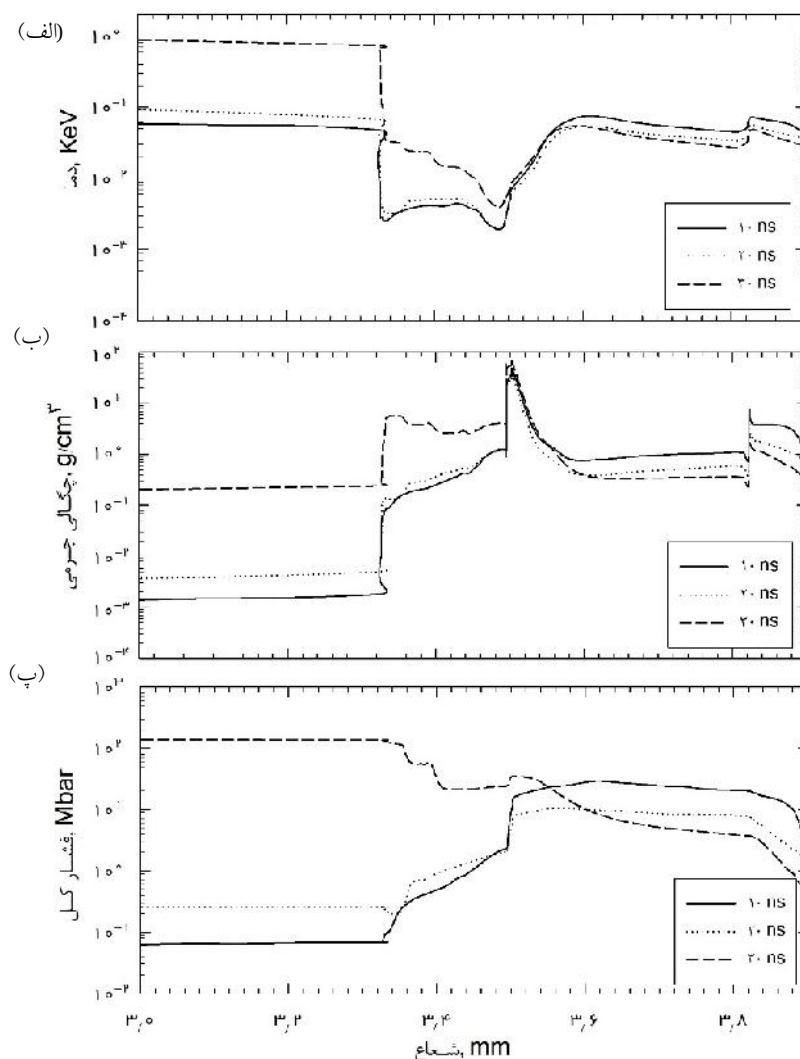
۳.۳. تشکیل لکه داغ

با اتمام انفجار درونی انرژی راه‌انداز در لایه‌ها به صفر میل می‌کند، همچنین تراکم مواد در مرکز به بیشترین مقدار خود رسیده و منجر به افزایش دما تا مرز افروزش می‌شود. شکل ۱۱ (الف) مسیر تحول شعاعی سلول‌های لاگرانژی را در بازه ۲۸-۳۸ ns نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دید که در



شکل ۹. نهشت انرژی راه‌انداز در لایه بیرونی و کنده شدن آن توسط نمایه شعاعی مقادیر هیدرودینامیکی در $t=۰/۶$ ns، (الف) دما، چگالی جرمی و فشار، (ب) سرعت سیال.

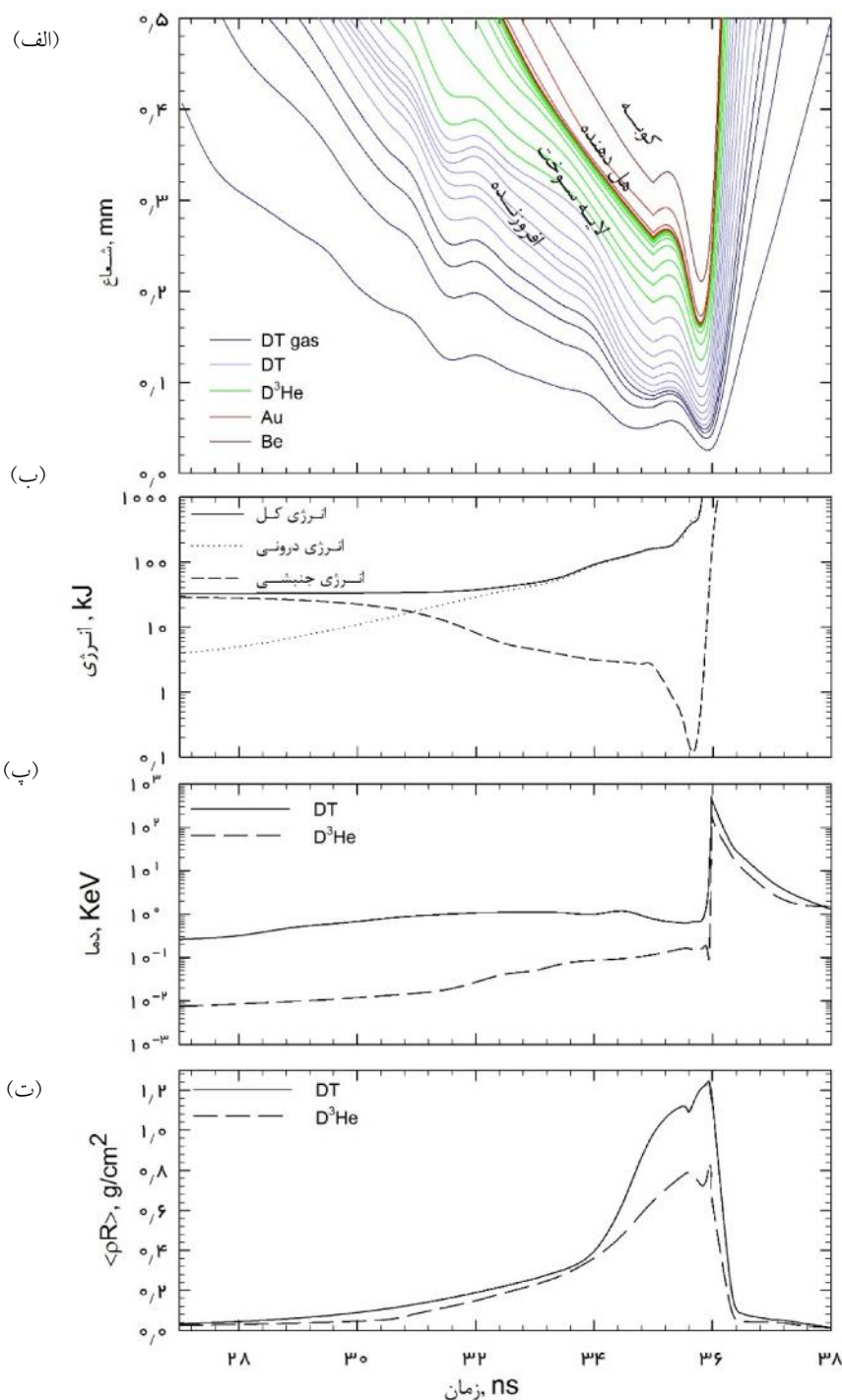
به سوی نمایش گذاشته است که مطابق آن، مثبت بودن سرعت لایه



شکل ۱۰. تحول مقادیر ترمودینامیکی انفجار درونی در $t=10$ ns، $t=20$ ns و $t=30$ ns (الف) دمای یونی، (ب) چگالی جرمی و (پ) فشار.

مصادق این واقعیت است. در شکل ۱۱ بروند تغییرات انرژی جنبشی و تبدیل آن به انرژی درونی را می توان مشاهده نمود. شکل ۱۱ (پ) نیز دمای یونی سوخت DT و D³He را به نمایش گذاشته است، و در ۳۵/۹۸ ns مقدار بیشینه ۳۸۸ keV برای DT و ۱۵۲ keV برای D³He به ثبت رسیده است. همچنین با توجه به شکل ۱۱ (ت)، در این زمان شاهد دومین بیشینه برای $\langle pr \rangle_{dt}$ با مقدار $1/23 \text{ g.cm}^{-2}$ هستیم. اکنون به بررسی ساختار هدف در لحظه افروزش می پردازیم. در شکل ۱۲ ساختاری متشکل از یک لکه داغ مرکزی که توسط لایه ای با چگالی بیشتر احاطه شده را می توان مشاهده کرد. با فرض حداقل دمای افروزش ۷-۱۰ keV، در این لحظه شعاع لکه داغ $R_{hs}=72 \text{ } \mu\text{m}$ خواهد بود، همچنین ضریب محصورسازی $\langle pr \rangle_{hs}=0/23 \text{ g.cm}^{-2}$

۳۵/۵۸ ns برای لحظه ای، یاخته ها از حرکت درونی باز ایستاده و اندکی منبسط می شوند. علت این امر آن است که لایه هل دهنده مانع از تلاشی هدف شده، و موج باز تابیده شده از آن موجب فشردگی مضاعف مواد در مرکز می شود. در واقع نقش کلیدی لایه هل دهنده در اینجا آشکار می شود. همچنین در این زمان که مصادف با تشکیل لکه داغ است، درونی ترین یاخته دمای افروزش را تجربه می کند و پارامتر محصورسازی $\langle pr \rangle$ نیز اولین قله را با مقدار $1/12 \text{ g.cm}^{-2}$ برای سوخت DT رقم می زند، که این حقیقت را شکل ۱۱ به وضوح نشان می دهد. سپس مجدداً در ۳۵/۹۸ ns توقفی لحظه ای در فشرده شدن مواد رخ داده و طی مدت کوتاهی هدف متلاشی می شود. رشد ناگهانی شعاع یاخته های لاگرانژی در شکل ۱۱ (الف)



شکل ۱۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) کمیت‌های فیزیکی پیکربندی سوخت DT+D³He در زمان تشکیل لکه داغ مرکزی، (الف) شعاع، (ب) انرژی، (پ) دما و (ت) پارامتر محصورسازی $\langle \rho R \rangle_{fuel}$.

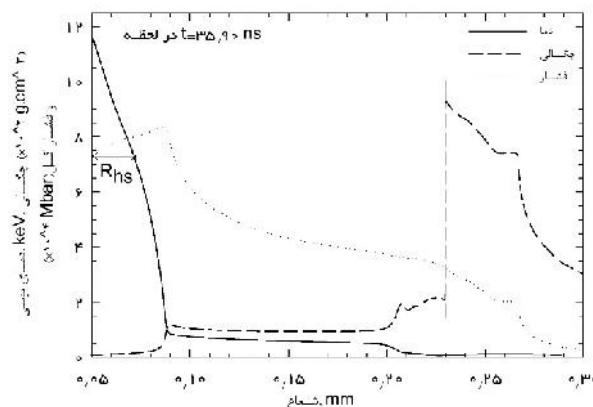
دقت شود که فشار در نواحی لکه داغ و سوخت چگال تغییرات چندانی ندارد، از این حیث می‌توان ساختار افروزش هم فشار را برای این هدف در نظر گرفت. تفاوت در آنتروپی از ویژگی‌های

و نیز میانگین چگالی $\rho = 20 \text{ g.cm}^{-3}$ به دست آمده است. دما در ناحیه سوخت چگال‌تر حدود چند صد کیلو الکترون ولت می‌باشد، این درحالی است که چگالی به 118 g.cm^{-3} می‌رسد.

است که فشار را در سراسر سوخت در تمام این زمان‌ها ثابت باقی می‌ماند.

نتیجه‌گیری

سوخت‌های پیشرفته نظیر D³He در دماهای فراتر از ۱۰۰ keV شرایط گداخت هسته‌ای مناسبی خواهند یافت. از این رو به عنوان سوخت رآکتورهای نسل دوم گداخت هسته‌ای قلمداد می‌شوند. بنابراین با توجه به شدت و توان راه‌اندازهای موجود امید چندانی برای افروزش و اشتعال سوخت خالص پیشرفته متصور نمی‌شود. در این پژوهش، در یک رآکتور گداخت هسته‌ای به روش محصورسازی لختی با راه‌انداز یونی، برای هدف چند میلیمتری، شرایط بهینه و ایده‌آل گداخت سوخت پیشرفته به صورت شبیه‌سازی عددی با کمک کد اعتبارسنجی شده DEIRA انجام گرفت. در گام نخست با اعمال باریکه خارجی یونی ²⁰⁹Bi با توان ۳۶۰ TW و به مدت ۳/۶ ns، به صورت مقارن بر سطح خارجی هدف کروی با سوخت خالص D³He تحول هیدرودینامیکی هدف بررسی گردید و نشان داده شده که برای یک دستگاه ۱/۳ MJ با مشخصات ذکر شده و به ازای سوختی به جرم ۲/۶۳۳ mg، بهره انرژی هدف ۳ به دست آمد که به لحاظ عملی مطلوب نخواهد بود. در طول محاسبات گام نخست، بهینه‌سازی‌های لازم از جهت جنس، ضخامت و رعایت موارد هیدرودینامیکی پایداری هدف انجام گرفت. در گام بعدی، شرایط متناظر برای هدف حاوی سوخت خالص اصلی DT بررسی و بهینه‌سازی‌های مشابه از نو تکرار گردید. در این شرایط بهره انرژی حاصل بالغ بر ۳۵۱ گردید. مطابق منحنی دمای یونی، موج اشتعالی به راحتی به مرز بیرونی لایه هل‌دهنده نشت یافته است. این امر بر کیفیت فرایند افروزش و اشتعال تأثیر منفی دارد. استفاده از لایه هل‌دهنده ضخیم‌تر نیز به دلیل ایجاد لختی بیشتر اثر نامطلوب بر کیفیت فرایند انفجار درونی و تحول بعدی خواهد داشت. سرعت انفجار درونی‌ای که منجر به افروزش در همجوشی باریکه یونی می‌شود، در بازه $10^7 - 3 \times 10^7$ cm.s⁻¹ است. با اطلاعات به دست آمده از دو مطالعه مجزای نخست، در گام پایانی طراحی هدف با پیکربندی سوخت

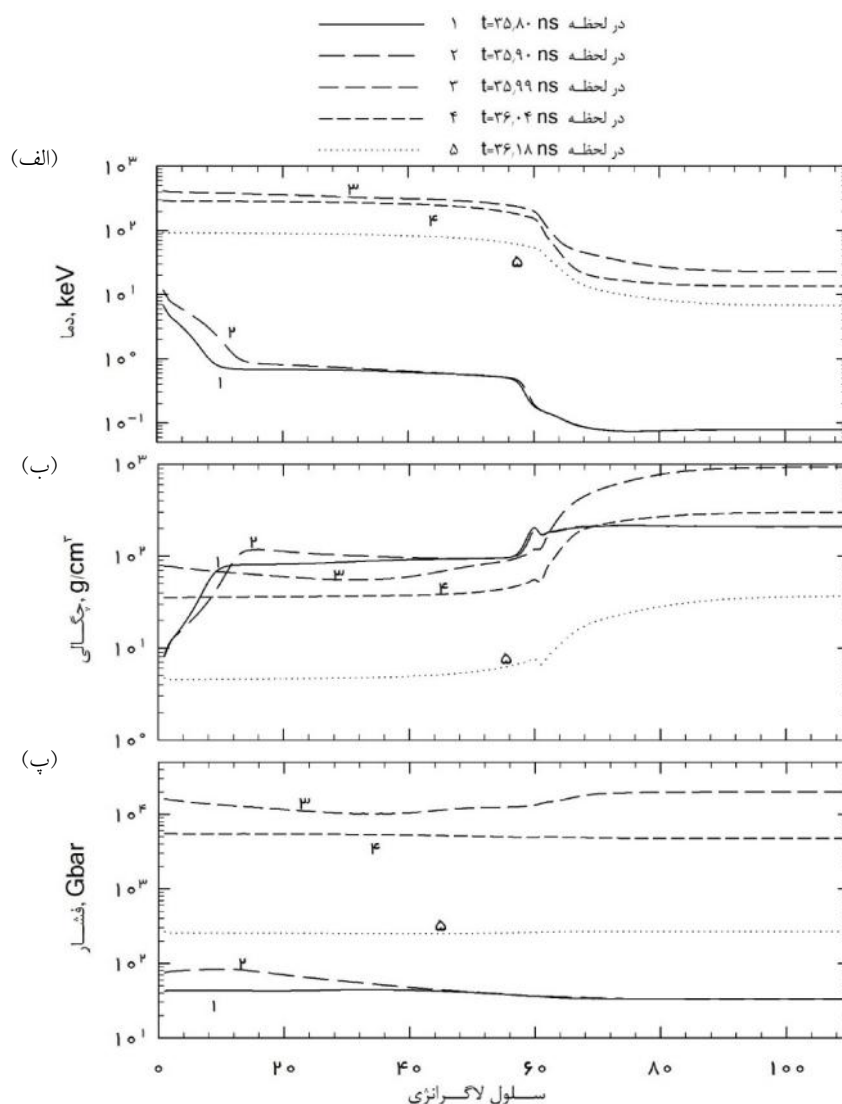


شکل ۱۲. تغییرات شعاعی دما، چگالی و فشار در لحظه تشکیل لکه داغ مرکزی.

لکه داغ و سوخت سرد اطراف آن است که به جهت اختلاف در چگالی (سوخت جامد و گازی) حاصل می‌شود [۱۴].

۴.۳. اشتعال و تلاشی هدف

با ایجاد لکه داغ و افروخته شدن سوخت DT، شرایط برای اشتعال آن و انتشار به سوخت D³He مهیا می‌باشد. از این رو امواج اشتعالی طی مدت زمانی کمتر از ۲۰۰ ps از مرکز به سمت ناحیه سوخت سرد حول لکه داغ حرکت کرده و به سوخت D³He سرایت می‌کند. شکل ۱۳ تحول مقادیر دما یونی، چگالی و فشار را از لحظه افروزش تا زمان قبل از تلاشی هدف، در یاخته‌های حاوی سوخت به نمایش گذاشته است. ۱۰ یاخته اولیه مربوط به گاز DT، از یاخته ۱۰ تا ۶۰ DT جامد و از یاخته ۶۰ تا ۱۱۰ به سوخت D³He تعلق دارد. در این شکل، نمودارهای شماره ۱ و ۲ به ترتیب برای زمان‌های ۳۵/۵۸ ns و ۳۵/۹۰ ns می‌باشد که در شکل ۱۳ (الف) تشکیل لکه داغ در ۱۰ یاخته اولیه مشاهده می‌شود. با دقت در شکل ۱۳ (ب)، چگالی پایین لکه داغ را به وضوح می‌توان دید. نمودارهای شماره ۳، ۴ و ۵ نیز به ترتیب وابسته به زمان‌های ۳۵/۹۹ ns، ۳۶/۰۴ ns و ۳۶/۱۸ ns می‌باشند. با توجه به شکل ۱۳ (الف) و ۱۳ (ب) مقادیر چگالی و دما از لحظه ۳۵/۹۹ ns با گذشت زمان در حال کاهش‌اند. از اینجا می‌توان مشاهده نمود که سوخت محصور شده فرصت بسیار کوتاهی برای اشتعال و آزاد کردن انرژی گرما هسته‌ای دارد. شکل ۱۳ (پ) بیانگر این واقعیت



شکل ۱۳. تحولات دما، چگالی و فشار پیکربندی $DT+D^3He$ هنگام اشتعال هدف.

قدردانی

نویسندگان مقاله از پروفیسور م باسکو مؤلف کد DEIRA به خاطر در اختیار گذاشتن این برنامه کامپیوتری جهت انجام پژوهش اخیر سپاسگزاری می‌نمایند.

$DT+D^3He$ بهینه‌سازی شد. در این حالت بهره انرژی بالغ بر ۴۳۱ گردید و افزایشی در حدود ۲۲ درصد را نشان می‌دهد. با مقایسه منحنی تحول دمای یونی برای پیکربندی جدید به وضوح نقش مضاعف لایه D^3He در حفاظ گذاری تابشی و ذره و به عنوان لایه سوختی آن مشاهده می‌شود. در ادامه نیز با جزئیات، تحول هیدرودینامیکی هدف، از تابش باریکه خارجی تا انتشار امواج اشتعالی و تلاشی سوخت بررسی گردید.

مراجع

1. T Hamacher and A M Bradshaw, "Fusion as a Future Power Source: Recent Achievements and Prospects", 18th World Energy Congress Energy Markets: The Challenges of the New Millennium, Buenos Aires, Argentina 21 (2001).
2. E L Neau, "Environmental and Industrial Applications of Pulsed Power Systems", IEEE Transactions on Plasma Science 22 (1994) 2.

9. D A Callahan-Miller and M Tabak, *Physics of Plasmas* **7** (2000) 2083.
10. B Yu. Sharkov et al., *Nuclear Fusion* **45** (2005) S291.
11. D Bohne, et al., *Nuclear Engineering and Design* **73** (1982) 195.
12. B Badger et al., "HIBALL-II-an Improved Conceptual Heavy Ion Beam Driven Fusion Reactor Study", Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Germany, FR. Inst. fuer Neutronenphysik und Reaktortechnik (1985).
13. M M Basko, *Nuclear Fusion* **30** (1990) 2443.
14. S Atzeni and A Caruso, *Il Nuovo Cimento B* **80** (1984) 71.
3. S Atzeni and J Meyer-Ter-Vehn, "The Physics of Inertial Fusion: Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics and Hot Dense Matter," Clarendon Oxford university press (2004).
4. M Ragheb and D Haseltine, *Journal of Fusion Energy* **3** (1983) 283.
5. S J Zinkle and L L Snead, *Annual Review of Materials Research* **44** (2014) 241.
6. S V Ryzhkov, *Sustainable Cities and Society* **14** (2015) 313.
7. S Ido and T Tazim, *Japanese Journal of Applied Physics* **22** (1983) 1194.
8. H Daido, M Nishiuchi, and A S Pirozhkov, *Report Progress in Physics* **75** (2012) 056401-72.