

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

سهیل خوشبین‌فر<sup>۱</sup> و سیدعلی تقوی<sup>۲</sup>

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  $100 \text{ keV}$  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 راکتور گداخت با راه‌انداز یونی سنگین، شرایط بهینه بهره انرژی بالا در سامانه  $1.3 \text{ MJ}$  شبیه‌سازی و استخراج گردید. سپس نشان داده شد که در چنین وضعیتی، بهره انرژی ایده‌آل، نسبت به حالت متناظر تک سوخت  $DT$ ، حدود ۲۲ درصد افزایش بازده از خود نشان می‌دهد. در اینجا سوخت درونی  $DT$  نقش ماشه افروزشی را ایفا نموده و لایه بیرونی تر  $D^3He$  علاوه بر لایه سوختی، در حفاظ ذره و تابش نیز مؤثر بوده است.

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

### ۱. مقدمه

نویین در عرصه‌های دیگری چون صنعت و پزشکی نیز می‌گردد [۲]. در نسل اول راکتورهای 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  $\text{keV}$  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 آموزش 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 باسکوا<sup>۱</sup> (محقق برجسته مؤسسه تحقیقاتی آی‌تپ<sup>۲</sup> 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، تریتیوم 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 شکسانی 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،

پرتوهای ایزوتوپ تریتیوم 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 پراثری 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 نهستی محصولات گداخت در حجم پلاسمای داغ مرکزی خواهد بود. هم‌اکنون، ایده اصلی جهت مدیریت شار نوترونی ترکیب DT، استفاده از لیتیوم به منظور تولید مجدد تریتیوم است که این امر نیز به نوبه خود منجر به افزایش تراز پرتوی می‌گردد [۴]. تحقیقات نشان می‌دهد که در روش آموزش مستقیم، استفاده از بذر DT مرکزی، به عنوان عامل مؤثری در آموزش 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 آموزش 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 این رو، 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)

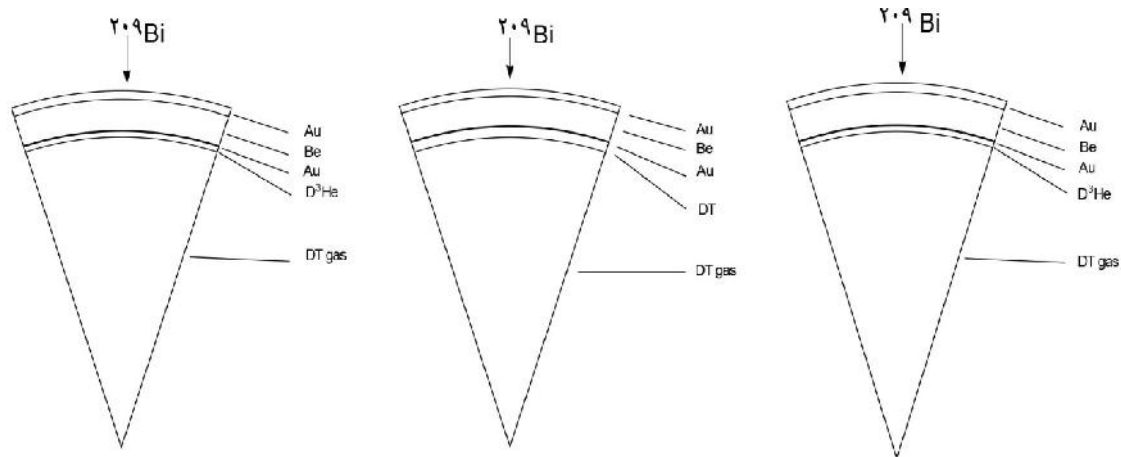
و سرایت شرایط افروزش و سوختن به سراسر حجم سوخت. مطابق سند طراحی مفهومی رآکتورهای گداخت هسته‌ای به روش محصور سازی لختی با راه‌انداز یونی، انتظار می‌رود که ابعاد هندسی هدف بین ۴-۵ mm در نظر گرفته شود و در طراحی هدف، به غیر از لایه سوخت، نقش کلیدی لایه‌های دیگ‌ر در فرایندهای هیدرودینامیکی، ترابرد انرژی و تکانه به دقت تنظیم شود [۹]. پیش‌بینی می‌شود که بهره انرژی واقعی در رآکتورهای گداخت به روش محصور سازی لختی با راه‌انداز یونی بین ۱۰۰-۴۰ باشد [۱۰]. طرح کلی هدف‌های 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<sup>۱</sup>، جاذب و تثبیت کننده است. از موارد مهم در انتخاب مواد در لایه‌های بالا می‌توان به انتخاب موادی با Z بالا در لایه کوبه برای مراقبت و جلوگیری از هم‌گسیختگی سوخت در حین فرایند انفجار درونی و همچنین افزایش بازده جفت شدگی بیشتر میان باریکه-هدف اشاره می‌شود. لایه جاذب وظیفه جذب انرژی لایه کوبه و تبدیل آن به تکانه را بر عهده دارد. از این‌رو از مواد با Z پایین انتخاب می‌گردد [۱۱] و [۱۲]. در طراحی‌های مشابه از لایه هل‌دهنده<sup>۲</sup> نیز استفاده می‌شود که به همراه لایه کوبه، ناحیه جاذب را در بر می‌گیرند و در حفاظ تابشی، افزایش بازده انفجار درونی و بهره هیدرودینامیکی هدف نقش اساسی دارند. سوخت‌های پیشرفته، به دلیل دمای افروزش بالا، نیازمند انرژی و توان راه‌انداز بزرگتری نسبت به همتای DT هستند. از این‌رو، به کارگیری آنها به عنوان تنها لایه سوختی در هدف‌های همجوشی محصور شده لختی به سختی منجر به بروز شرایط افروزش در ناحیه مرکزی می‌گردد. 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.

عمود بر صفحه در نظر گرفته می‌شود. 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 پرنرژی همجوشی یعنی، ذرات آلفای ۳/۵ MeV و پروتون‌های ۳ MeV و ۱۴/۷ MeV. چهار معادله سوختن هسته‌ای برای فراوانی نسبی ایزوتوپ‌های دوتریم، تریتیوم، هلیوم-۳ و بور-۱۱. معادله توقف برای انتشار یون‌های سریع در تقریب مسیر خط مستقیم.

برای محاسبه نهشت انرژی محصولات باردار، کم انرژی و کوتاه‌برد همجوشی هیچ معادله پخشی حل نمی‌شود، بلکه آنها را به عنوان منابع گرمایش محلی در نظر گرفته می‌شود. از طرفی برای محاسبه گرمایش غیرموضعی توسط نوترون‌های سریع، دو گزینه در دسترس است: تقریب اول پراکندگی و تقریب گرمایش غیریکنواخت. توجه کنید که در کد سهم گرمایش گرما-هسته‌ای توسط نوترون‌ها فقط برای کره سوخت مرکزی قابل ارزیابی می‌باشد. همچنین برای حل عددی معادلات هیدرودینامیک از ضریب وشکسانی فیزیکی در یک یاخته لاگراژی استفاده می‌شود. برای تمام معادلات پخش و عبارت‌های 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 می‌شود.

## ۲. بهینه‌سازی لایه‌های هدف

به منظور مطالعه جامع کل فرایند از لحظه تابش باریکه فرودی تا انفجار و تلاشی هدف در پایان، می‌توان 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 لایه‌ها و سوم، تشکیل لکه داغ



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 پرشدت 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 هم‌زمان 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  $10^8$  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 این رو، 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

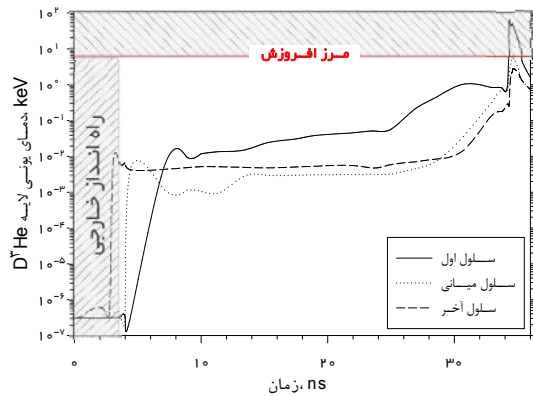
جدول ۱. مشخصات هندسی و فیزیکی لایه‌های هدف با سوخت اصلی DT, D<sup>3</sup>He و DT+D<sup>3</sup>He.

هدف با افزودن DT و سوخت D <sup>3</sup> He			هدف با سوخت DT خالص			هدف با سوخت D <sup>3</sup> He خالص			جنس لایه
جرم (mg)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	شعاع (mm)	جرم (mg)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	شعاع (mm)	جرم (mg)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	شعاع (mm)	
۰,۰۴۶	۰,۰۰۰۳	۰-۳,۳۲۶	۰,۰۴۶	۰,۰۰۰۳	۰-۳,۳۲۶	۰,۰۴۶	۰,۰۰۰۳	۰-۳,۳۲۶	DT Vapor
۳,۵۰۶	۰,۲۲۴	-۳,۴۳۵ ۳,۳۲۶	۳,۶۲۲	۰,۲۲۴	-۳,۴۳۸ ۳,۳۲۶	-	-	-	DT
۲,۸۰۶	۰,۳۱	-۳,۴۹۵ ۳,۴۳۵	-	-	-	۲,۶۳۳	۰,۳۱	۳,۳۲۶-۳,۳۸۶	D <sup>3</sup> He
۳۰,۰۱۸	۱۹,۵	-۳,۵۰۵ ۳,۴۹۵	۲۶,۱۴۳	۱۹,۵	۳,۴۳۸,۳,۴۴۷	۲۵,۳۵۲	۱۹,۵	۳,۳۸۶-۳,۳۹۵	Au
۱۰۱,۶۴۵	۱,۹	-۳,۸۲۲ ۳,۵۰۵	۹۹,۴۷۴	۱,۹	-۳,۷۶۷ ۳,۴۴۷	۱۰۱,۲۵۵	۱,۹	۳,۳۹۵-۳,۷۲۹	Be
۳۲۲,۳۰۷	۱۹,۵	-۳,۹۱۰ ۳,۸۲۲	۲۸۰,۵۰۱	۱۹,۵	-۳,۸۴۶ ۳,۷۶۷	۳۲۱,۲۸۳	۱۹,۵	۳,۷۲۹-۳,۸۲۱	Au

و  $0.4 \text{ g/cm}^3 - 0.2 \sim \langle R \rangle$  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 تراپید محصولات گداخت را درون لایه‌های هدف در روند محاسبات گنجانند. از این رو، در فرایندهای گرمایشی علاوه بر سهم ذرات آلفای تولیدی، شار نوترون‌های  $14.1 \text{ MeV}$  و  $2.45 \text{ MeV}$  و همچنین پروتون‌های  $1 \text{ MeV}$   $14/7$  و  $3/0$  در اندرکنش با یون‌های زمینه پلاسما لحاظ گردیده است. در این مرحله، از راه‌انداز باریکه یونی، حاوی یون‌های سنگین بیسموت ( $^{209}\text{Bi}$ ) بهره جسته‌ایم، که انرژی متناسب به هر یون نیز  $10 \text{ GeV}$  می‌باشد [۱۱]. هر دو هدف مدنظر را با فرض ثابت بودن فشار، در شرایط یکسان بطور یکنواخت توسط راه‌اندازی با توان  $360 \text{ TW}$  به مدت  $3/6 \text{ ns}$  مستقیماً مورد تابش قرار می‌دهیم. از این رو 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

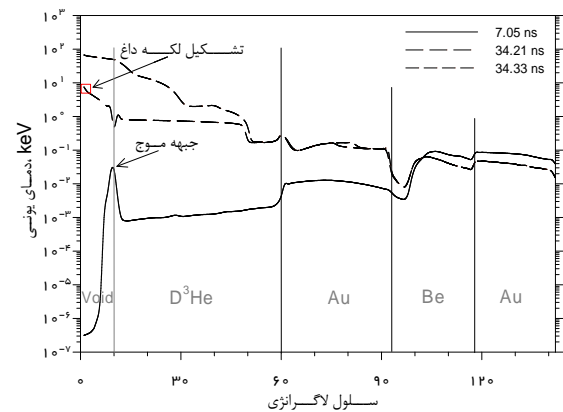
مرحله انفجار درونی و فرو- ریزش ماده در مرکز، انرژی جنبشی لایه‌ها به تدریج به انرژی درونی تبدیل شده که در اثر آن دما و چگالی بخش مرکزی صعود محسوس را تجربه می‌کند. این مرحله مصادف با تشکیل لکه داغ احتمالی، افروزش و اشتعال سراسری می‌باشد. سرانجام در مرحله آخر، موج اشتعالی برون‌سو، از مرکز مواد سوختی را در برگرفته و انرژی گرما هسته‌ای حاصل در کسر کوتاهی از مرتبه پیکوژانیه 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 افزودن DT جامد با چگالی یکنواخت  $0.224 \text{ g.cm}^{-3}$  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  $D(D,T)p$ ,  $D(^3\text{He}, n)$ ,  $D(T, n)$  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  $T_{\text{hs}} \sim 7 \text{ keV}$



**شکل ۳.** (رنگی در نسخه الکترونیکی) تحول دمایی 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).

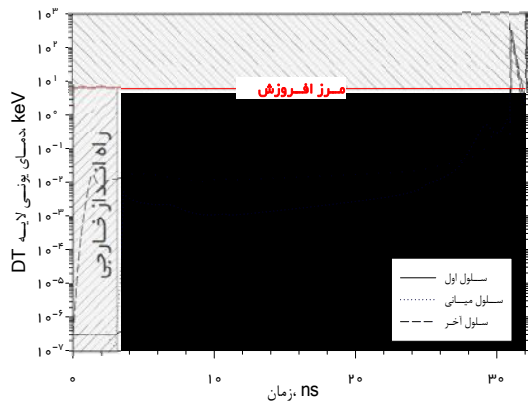
مشاهده می شود لحظاتی پیش از توقف تابش در ۳٫۶ ns موج انفجار درونی به بیرونی ترین بخش سوخت رسیده و دمایی آن به سرعت افزایش می یابد. به طور مشابه یاخته میانی و درونی ترین یاخته نیز اندکی بعد شروع به حرکت می نمایند. در طول مرحله انفجار درونی تحول دمایی تقریباً یکنواخت می ماند که این موضوع برای بیرونی ترین 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 دمایی 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 ۲.** دمایی 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  $314 \text{ g.cm}^{-3}$  افزایش می یابد. بر اساس شکل ۲، تحول دمایی یونی هدف در سه مرحله متمایز نشان داده شده است. لحظه  $t=7.05$  ns مصادف با رسیدن جبهه 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 دمایی 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 لاگ انرژی در هر لایه تابعی از درجه اهمیت تراپردی 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.

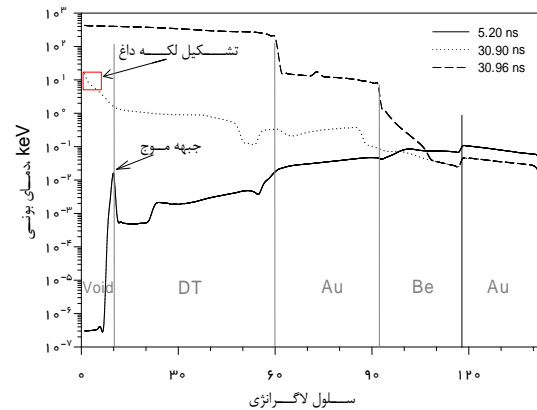
بهره انرژی در این حالت بسیار ناچیز می باشد ( $G=3$ ). در شکل ۳ نمودار تحول دمایی در عمق لایه سوخت از لحظه تابش باریکه یونی خارجی تا انفجار هدف ترسیم شده است. در این شکل نوار عمودی در محدوده زمانی ۰-۳٫۶ ns مربوط به محدوده تابش باریکه یونی خارجی است. همان گونه که



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 ۳٫۶ نانوثانیه، محدوده تابش باریکه خارجی و نوار افقی در بالا نشانگر محدوده دمایی افروزش است).

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<sup>3</sup>He به ترتیب با سطح مقطع ۱b و آهنگ واکنش پذیری  $10^{-16} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  بهینه خود پیشروی کند.

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.

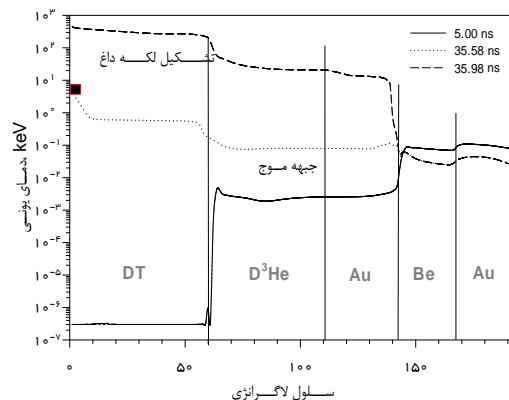


شکل ۴. دمای یونی لایه‌های هدف با سوخت DT خالص در سه مرحله مختلف تحول، (الف) در لحظه  $t=5.20 \text{ ns}$  پیش از بسته شدن حفره مرکزی، (ب) در لحظه  $t=30.90 \text{ ns}$  زمان تشکیل لکه داغ مرکزی و (پ) در لحظه  $t=30.96 \text{ ns}$  پایان فاز انفجار بیرونی.

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 تابیده 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<sup>3</sup>He، در حالت اخیر بهره انرژی ایده‌آل هدف بالا بوده و بالغ بر ۳۵۱ می‌گردد. پس از تابش یون‌های بیسموت توسط راه‌انداز به ساچمه این هدف، موج ضربه‌ای با حداکثر سرعت  $2.14 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  طی  $30.90 \text{ ns}$  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  $247 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  افزایش می‌یابد. به طور مشابه، مطابق شکل ۴ منحنی تغییرات دمای یونی در لایه‌های مختلف سوخت در سه لحظه معین متناظر با  $t=5.20 \text{ ns}$  لحظاتی پیش از رسیدن موج ضربه به مرکز هدف، لحظه  $t=30.90 \text{ ns}$  هنگام تشکیل لکه داغ مرکزی و لحظه  $t=30.96 \text{ ns}$  در پایان بازه انفجار بیرونی ناشی از موج اشتعالی برون‌سو. در مقایسه منحنی مشابه سوخت خالص D<sup>3</sup>He مشاهده می‌شود که در حالت اخیر ابعاد هندسی

سوخت تا  $63/4 \text{ g.cm}^{-3}$  افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۶، برای اولین بار تک‌یاخته اولیه دمای یونی فراتر از  $5 \text{ keV}$  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  $200 \text{ ps}$  امواج اشتعالی به سوخت سرد اطراف لکه داغ با  $200 \text{ g.cm}^{-2}$ ، 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  $50 \text{ keV}$  را تجربه می‌کند. با این وجود، دمای ناحیه مجاور سوخت DT به طور متوسط بالغ بر  $100 \text{ keV}$  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  $20 \text{ keV}$  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  $5 \text{ ns}$  افزایش بیابد. در فرایند افروزش و اشتعال هدف با پیکربندی  $DT+D^3He$ ، حدود  $40\%$  از جرم DT و  $11\%$  از جرم  $D^3He$  سوخته و انرژی گرما- هسته‌ای  $559 \text{ MJ}$ ، 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  $DT+D^3He$  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 $DT+D^3He$

#### 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  $5 \text{ ns}$  به مرز لایه DT می‌رسد. با اتمام انفجار درونی طی مدت  $35/58 \text{ ns}$  و افزایش تدریجی پارامتر  $R$ ، 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+D<sup>3</sup>He.

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

به لحظه مکث موضعی برآورد نمود. در سمت چپ منحنی قطاعی از هدف شامل پیکربندی سوخت DT+D<sup>3</sup>He پیش از تابش باریکه یونی بر سطح آن با رنگ آمیزی مشابه با ماده درون هر لایه در نمودار نیز نمایش داده شده است.

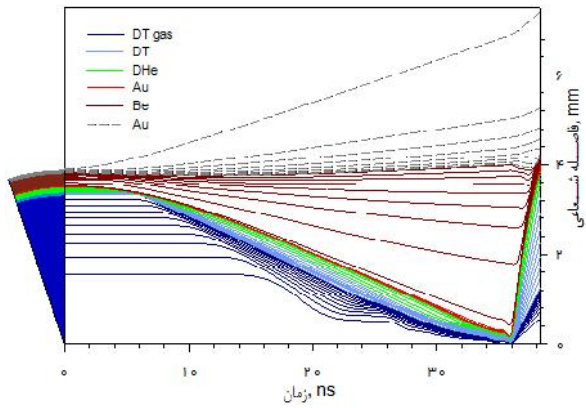
### ۲.۳. تابش باریکه و کنده شدن لایه کوبه

لایه کوبه طلا، مقدار MJ ۰٫۶ انرژی از تابش باریکه یونی دریافت می کند. با افزایش دما، ماهیت این لایه متمایل به پلاسما شده و در برابر عبور تابش شفاف می شود. سپس به لایه جاذب بریلیموم MJ ۰٫۷ انرژی می رسد. انرژی نهستی به واسطه رسانش گرمایی الکترون های پلاسما به لایه های درونی انتقال می یابد، بنابراین یونها توسط برخورد با الکترون ها گرم می شوند. سردتر بودن یونها در لایه هایی درونی را می توان در شکل ۹ (الف) مشاهده نمود. البته این انرژی به طور غیرمستقیم سبب انفجار درونی می شود، بدین صورت که باریکه پرتوان بیسموت با گرمایش ذرات لایه محافظ، باعث کندن ناگهانی آن از سطح هدف می شود. همین امر تکانه ای رو به عقب به لایه بریلیموم اعمال می کند و ضربه موجی در اثر فشار حاصل از کنده شدن به سمت مرکز راهی می شود. در شکل ۹ (الف) مشاهده می شود، که این فشار در  $t=6/0 \text{ ns}$  قله ای با مقدار ۶۸ Mbar دارد. همچنین در این هنگام پوسته ای چگال با ضخامت  $0.05 \text{ mm}$  و چگالی  $45 \text{ g.cm}^{-3}$  در حوزه شعاعی لایه DT مشاهده می شود که با حداکثر سرعت  $0.55 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$

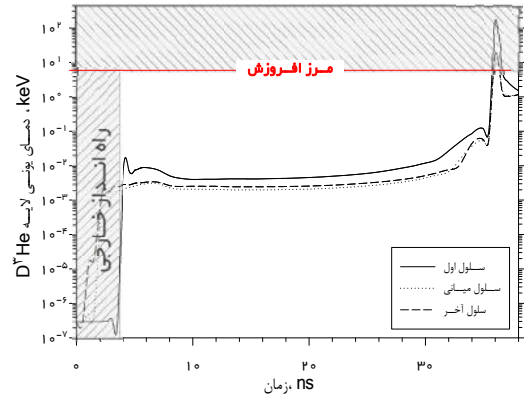
در پیکربندی DT+D<sup>3</sup>He به طور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است.

لازم به ذکر است که مقادیر گزارش شده در جدول ۱، مقادیر بهینه ضخامت و ابعاد هندسی لایه های مختلف هدف می باشد. با توجه به استدلال های اشاره شده در شکل ۶، انتظار داریم که مشارکت لایه سوخت D<sup>3</sup>He در بهره انرژی پیکربندی جدید محدود به نواحی هم جوار با بخش بیرونی لایه سوخت DT باشد. مطابق شکل ۷، مشاهده می شود که بیشینه تفاوت دمایی یاخته اول به میانی در اوج خود بالغ بر ۱۰۰ keV می گردد. نتایج محاسبات نشان می دهد که حدود ۱۰ درصد سوخت D<sup>3</sup>He 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 یاخته ها در صفحه شعاع - زمان رسم نمودیم. در این نمودار، می توان کل فرایند را یک جا رصد کرد و در آن وقوع فرایند انفجار درونی به وضوح آشکار است. همان گونه که مشاهده می شود بخشی از لایه کوبه طلا در اثر جذب انرژی راهانداز یونی جدا شده و هاله پلاسما رقیقی را تا انتهای مرحله انفجار کپسول در اطراف آن احاطه می کند. با کمک این نمودار نیز می توان به راحتی با محاسبه شیب متوسط در هر لایه هدف، سرعت انفجار درونی و بیرونی آنها را نسبت



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

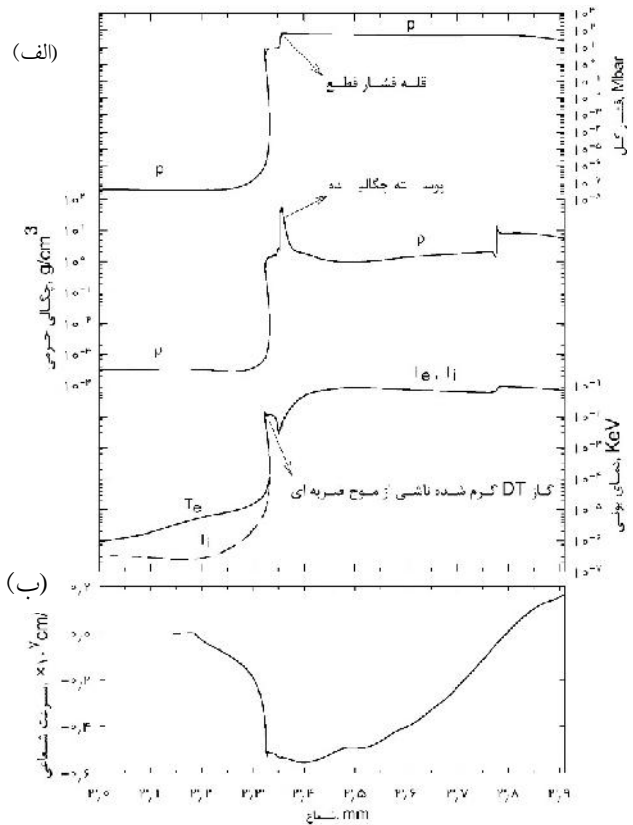


شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تحول دمای یونی یاخته ابتدایی، میانی و انتهایی لایه سوخت D<sup>3</sup>He در پیکربندی DT+D<sup>3</sup>He (نوار قائم در محدوده زمانی ۰ تا ۳٫۶ نانوثانیه، محدوده تابش باریکه خارجی و نوار افقی در بالا نشانگر محدوده دمای افروزش است).

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<sup>-۳</sup> 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.

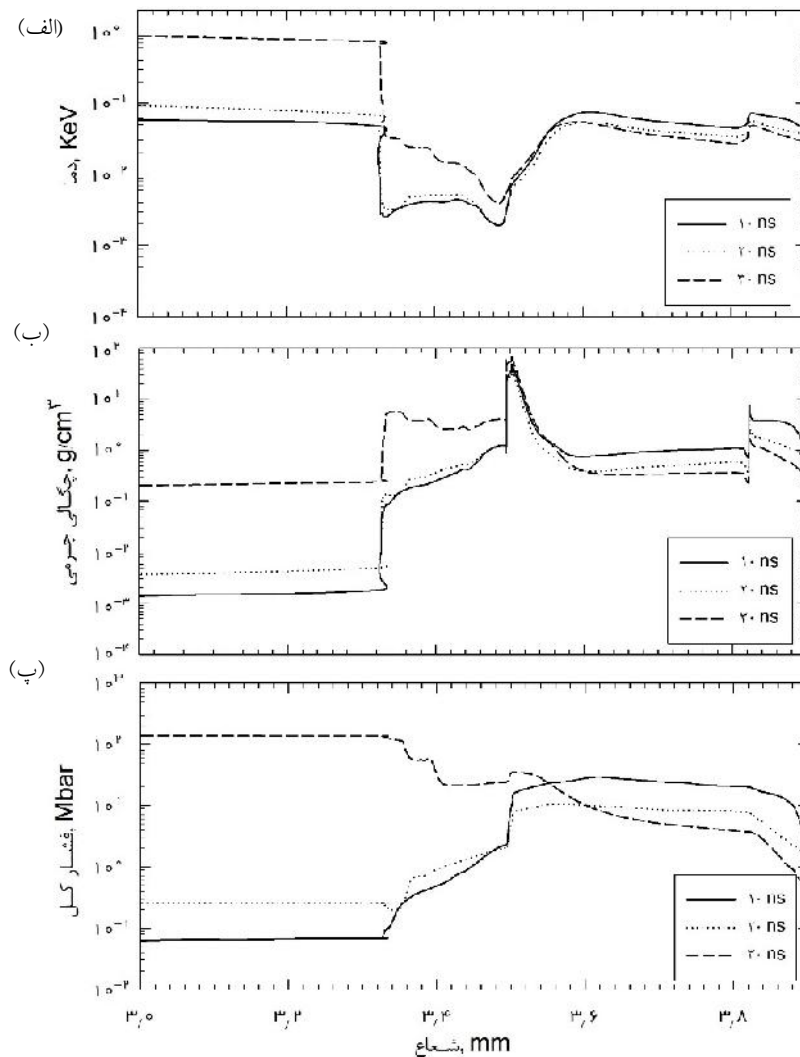
### ۳.۳. تشکیل لکه داغ

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.

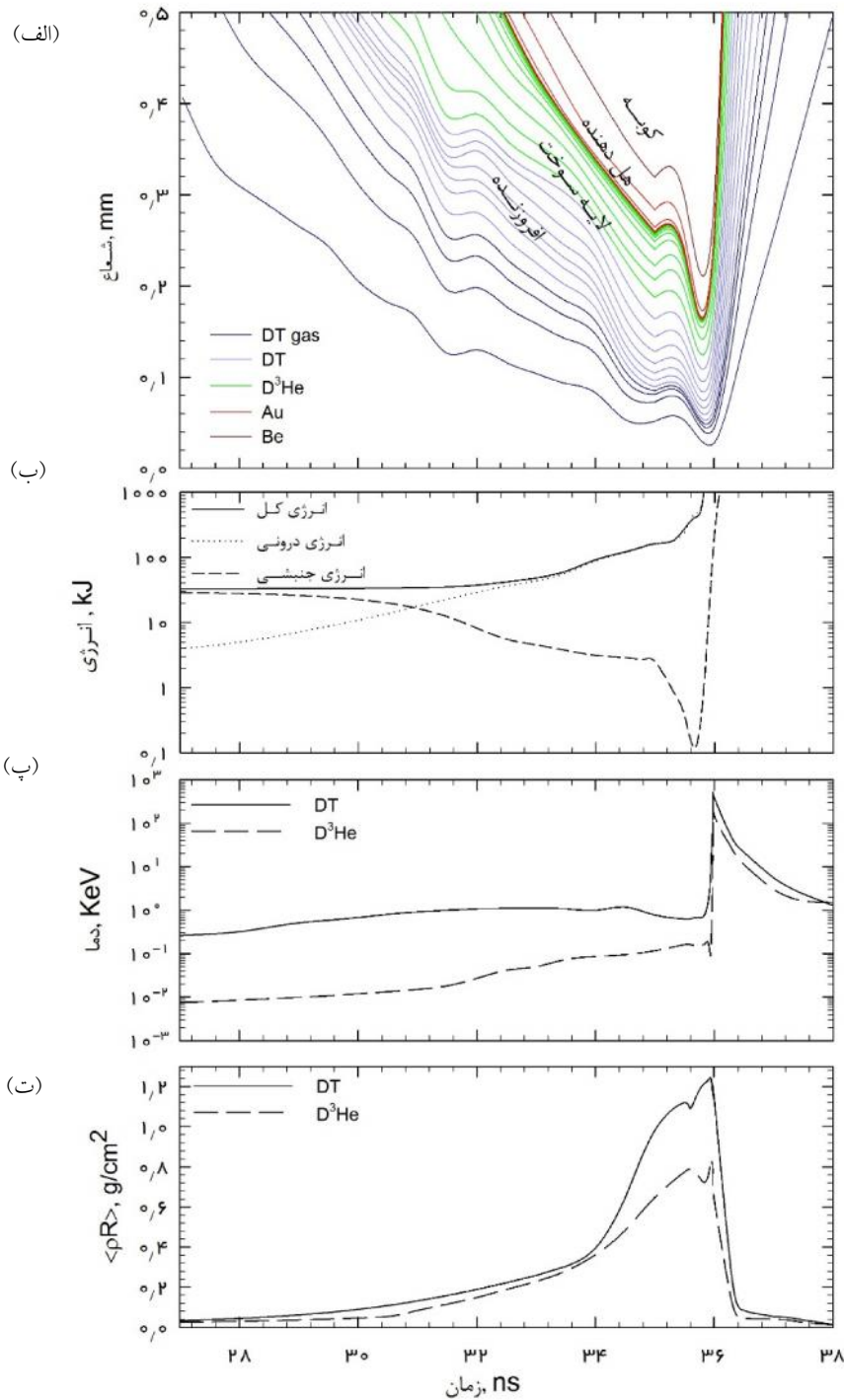
به سوی نمایش گذاشته است که مطابق آن، مثبت بودن سرعت لایه



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 D<sup>3</sup>He را به نمایش گذاشته است، و در ۳۵٫۹۸ ns مقدار بیشینه ۳۸۸ keV برای DT و ۱۵۲ keV برای D<sup>3</sup>He 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 انفورزش 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 انفورزش 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 انفورزش را تجربه می کند و پارامتر محصورسازی  $\langle r \dots \rangle$  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+D<sup>3</sup>He در زمان تشکیل لکه داغ مرکزی، (الف) شعاع، (ب) انرژی، (پ) دما و (ت) پارامتر محصورسازی  $\langle r \rangle_{fuel}$ .

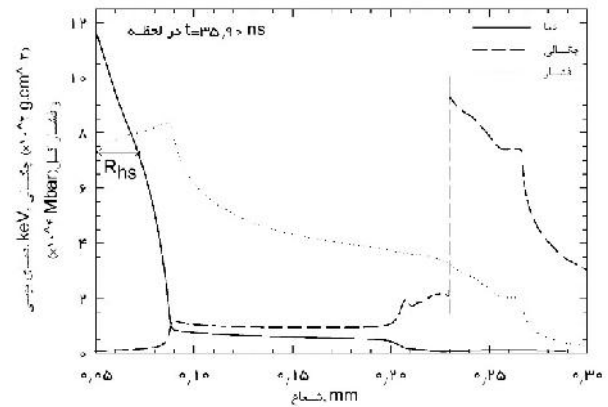
دقت شود که فشار در نواحی لکه داغ و سوخت چگال تغییرات چندانی ندارد، از این حیث می‌توان ساختار افروزش هم فشار را برای این هدف در نظر گرفت. تفاوت در آنروپی از ویژگی‌های

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

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

### نتیجه‌گیری

سوخت‌های پیشرفته نظیر D<sup>3</sup>He 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 <sup>209</sup>Bi با توان ۳۶۰ TW و به مدت ۳٫۶ ns، به صورت متقارن بر سطح خارجی هدف کروی با سوخت خالص D<sup>3</sup>He 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  $10^7 \times 3-1 \text{ cm.s}^{-1}$  است. با اطلاعات به دست آمده از دو مطالعه مجزای نخست، در گام پایانی طراحی هدف با پیکربندی سوخت

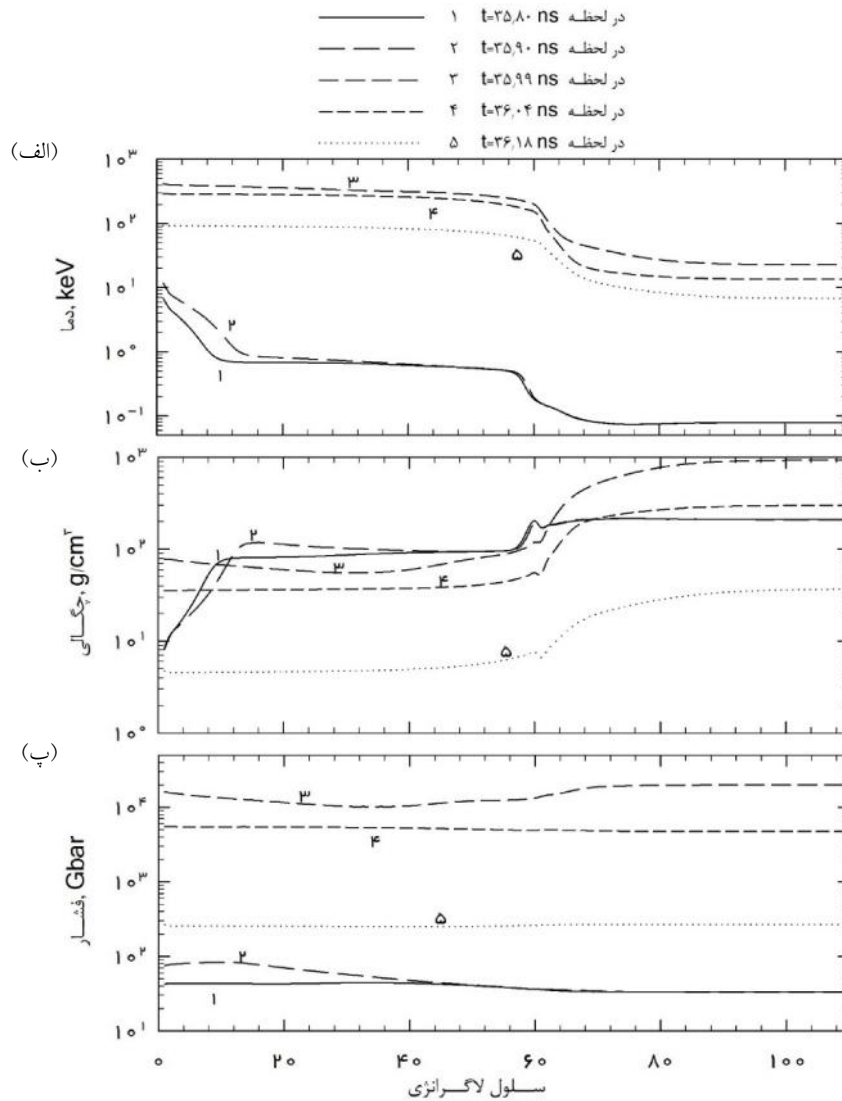


شکل ۱۲. تغییرات شعاعی دما، چگالی و فشار در لحظه تشکیل لکه داغ مرکزی.

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 D<sup>3</sup>He 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 D<sup>3</sup>He 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 D<sup>3</sup>He 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<sup>3</sup>He 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 می نمایند.

DT+D<sup>3</sup>He بهینه سازی شد. در این حالت بهره انرژی بالغ بر ۴۳۱ گردید و افزایشی در حدود ۲۲ درصد را نشان می دهد. با مقایسه منحنی تحول دمای یونی برای پیکربندی جدید به وضوح نقش مضاعف لایه D<sup>3</sup>He در حفاظ گذاری تابشی و ذره و به عنوان لایه سوختی آن مشاهده می شود. 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.