



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

### شکل دهیتفروودبیر بهره انرژی هدف های گروهی با سوخت پیشرفته $D_2$ جامد در همجوشی باریکه یونی سنگین

سهیل خوشبین فر؛ سیدعلی تقوی

دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان

#### چکیده:

دستیابی به بهره انرژی بالا در همجوشی هسته ای از چالش های اساسی است. انتظار می رود، استفاده از سوخت های پیشرفته نظیر دوتریوم خالص، نامزد نسل بعدی راکتور های گداخت با روش همجوشی محصور شده لختی باریکه یونی سنگین باشد. در این پژوهش در یک سامانه ۲MJ، شرایط دستیابی به بهره انرژی بالا با کمک شکل دهی تپ فرودی و بهره گیری از سوخت پیشرفته دوتریوم جامد با افزونده مرکزی دوتریوم-تریتیوم مطالعه گردید. نشان داده شد که با چنین پیکربندی هدف-باریکه، پارامتر محصور سازی بالغ بر ۲۲٪ و بهره انرژی ایده آل ۴٪ رشد یابد.

#### ۱. مقدمه

بحران انرژی چالش دهه های آینده بشر بر روی زمین است. از اواسط قرن گذشته میلادی، با توجه به درک اهمیت و کاربرد انرژی هسته ای در تحقیقات، صنعت و زندگی بشر، پژوهش های سازمان یافته ای در این خصوص شکل گرفته است. از اوایل دهه هشتاد میلادی قرن گذشته، تحقیقات در حوزه گداخت هسته ای با استفاده از روش محصورشدگی لختی تلاش دارد تا بتواند به کمک راه انداز یونی و در دو دهه اخیر با کمک راه اندازهای لیزری، شرایط کنترل شده در راکتور های گداخت هسته ای را کاوش نماید [۱]. در این راستا، سوخت ترکیبی ایزوتوپ هیدروژن، دوتریوم-تریتیوم، به عنوان نامزد اصلی سوخت راکتور های گداخت آینده مد نظر است و تمرکز تحقیقات از آغاز تا به امروز بر روی آن معطوف بوده است. از دلایل اصلی اقبال عمومی به آن می توان به سطح مقطع گداخت بزرگتر و همچنین کسر مصرف سوخت بالاتر نسبت به رقبا در شرایط دمایی مشابه نام برد. با این وجود، این موضوع بدین معنی نمی باشد که استفاده از سوخت های پیشرفته نظیر  $D_2$ ،  $D^3He$  و  $p^{11}B$  مردود است. از عمده دلایل اینکه در مقایسه با سوخت DT کمتر به چنین ترکیباتی توجه شده است، دمای کاری بالاتر آنها می باشد. برای نمونه شرایط افروزش مناسب سوخت دوتریوم خالص در محدوده دمایی فراتر از ۱۰۰ keV رخ می دهد [۲]. بنابراین تابش مستقیم باریکه خارجی بر روی



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

هدفی با سوخت دوتریوم خالص به سختی شرایط افروزش و اشتعال سراسری را مهیا می کند. امید است با گسترش فناوری باریکه های لیزری یا یونی در سالهای آینده، بتوان به چنین محدوده دمایی در شرایط کنترل شده دست یافت. البته باید متذکر این نکته شد که از چالش ها و ایراد های مطرح به ترکیب DT می توان به پرتوزا بودن تریتیوم و تولید آن در غلاف بیرونی قلب اشاره نمود که بر این اساس هنوز با مفهوم انرژی سبز فاصله زیادی دارد [۳].

### ۲. فیزیک هدف

امروزه با پیشرفت شتاب دهنده های ذرات باردار از باریکه یون های سنگین به عنوان گزینه ای مناسب برای راه اندازی هدف های همجوشی محصور شده لختی یاد می شود. از جمله مزایای باریکه یون های سنگین در مقایسه با پرتو های لیزر، می توان به ضریب جفت شدگی و آهنگ تکرارپذیری بالای در آن اشاره نمود. برای هدف های همجوشی باریکه یونی، اغلب از یون های سنگین نسبتاً کوتاه برد و باریکه ای با توان چند  $100\text{ TW}$  حاوی یون های پرانرژی (از مرتبه  $10\text{ GeV}$ ) استفاده می شود. در این تحقیق به منظور مطالعه فرایند افروزش و اشتعال هدف کروی لایه ای در روش افروزش مستقیم، از کد یک بعدی اعتبار سنجی شده شبیه سازی Deira استفاده شده است [۴]. این کد برای شبیه سازی فرایند همجوشی محصور شده لختی هدف های تابیده شده با باریکه یونی به کار می رود و در آن سازوکار فرایند های فیزیکی اصلی همجوشی محصور شده گنجانده شده است و شامل حل عددی به روش تفاضل محدود کاملاً نا صریح معادلات هیدرودینامیکی بقای تکانه، انرژی و پیوستگی جرم شامل تک شاره با سه دمای یونی، الکترونی و تابش است. دو کانال واکنش گداخت هسته ای  $DT$ ،  $DD$  و  $D^3He$  واکنش های اصلی فعال گردیده اند و در گرمایش پلاسمای همجوشی سهم ذرات آلفا، شار نوترون های  $14/1\text{ MeV}$  و  $2/5$  و نیز پروتون  $14/7\text{ MeV}$  و  $3/0$  تولیدی حین گداخت در محاسبات گرمایش ناشی از اندرکنش با یون های زمینه پلاسمای سوخت لحاظ می گردد. علاوه بر این، در محاسبات انجام شده دمای فراتر از  $10\text{ keV}$  و  $0/2-0/4\text{ g.cm}^{-2}$  را به عنوان دو مشخصه تشکیل لکه داغ مرکزی در نظر گرفته می شود.



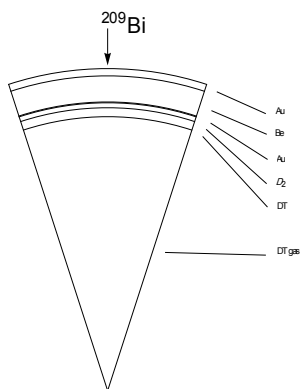
## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

### ۳. ساختار هدف

به علت بالا بودن دمای افروزش سوخت دوتریوم خالص می بایست از مقدار کمی DT به عنوان افروزنده در ناحیه درونی استفاده شود تا بر اثر افروزش و اشتعال آن، دمای افروزش سوخت دوتریوم خالص فراهم گردد. در حال حاضر، این اقتصادی ترین راهبرد افروزش سوخت های پیشرفته محسوب می گردد. با شکل دهی تپ فرودی، می توان روی ضربه موج هایی که از لایه های هدف در طی انفجار درونی عبور می کنند و منجر به تشکیل لکه داغ می شوند، کنترل داشت. در این حالت تپ آغازین، با قدرت فشردگی اندک در فاصله زمانی نسبتاً بلند، شروع شده و با گذشت زمان با آهنگ مورد نظر افزایش می یابد. همین امر موجب عدم رشد ناپایداری ها نظیر رایلی-تیلر شده و منجر به بهره هیدرودینامیکی بالا می شود. از این رو شکل تپ در تراکم بی-دررو از اهمیت خاصی برخوردار است. با رعایت موارد فوق، مشخصات هندسی و طرحواره هدفی که در جدول ۱ مشاهده می شود، بر پایه سند جامع طراحی عمومی هدف های با بهره انرژی بالا (HIBALL) در مقیاس راکتور همجوشی باریکه یونی پیکربندی شده است [۵]. در این هدف، با معرفی سوخت دوتریوم جامد با چگالی ۵ برابر دوتریوم مایع می توان شرایط افروزش و اشتعال را ارتقا بخشید. تحقیقات اخیر نشان می دهد که بهره گیری از دوتریوم جامد چگالی، روزه ای جدید در پژوهش همجوشی محصور شده می گشاید [۶].

جدول ۱: مشخصات هندسی و فیزیک لایه های هدف به همراه طرحواره هدف



ضخامت (mm)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	جرم (mg)	
۰-۳/۳۲۶	۰/۰۰۰۳	۰/۰۴۹	DT gas
۳/۳۲۶-۳/۴۲۸	۰/۲۲۵	۳/۲۸۹	DT
۳/۴۲۸-۳/۴۸۵	۰/۷۶	۶/۵۰۴	DD
۳/۴۸۵-۳/۵۰۲	۱۹/۵	۵۰/۸۴	Au
۳/۵۰۲-۳/۸۲۲	۱/۹	۱۰۲/۵	Be
۳/۸۲۲-۳/۹۱۰	۱۹/۵	۳۲۲/۳	Au

### ۴. نتایج شبیه سازی

در مطالعه ای اخیراً صورت گرفته است، تحت شرایط هم فشارباریکه ای از یون بیسموت (<sup>209</sup>Bi) مطابق شکل ۱.a با توان ۳۶۰ TW و انرژی یونی ۱۰ GeV، به طور کاملاً متقارن به مدت ۵/۷ ns بر



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

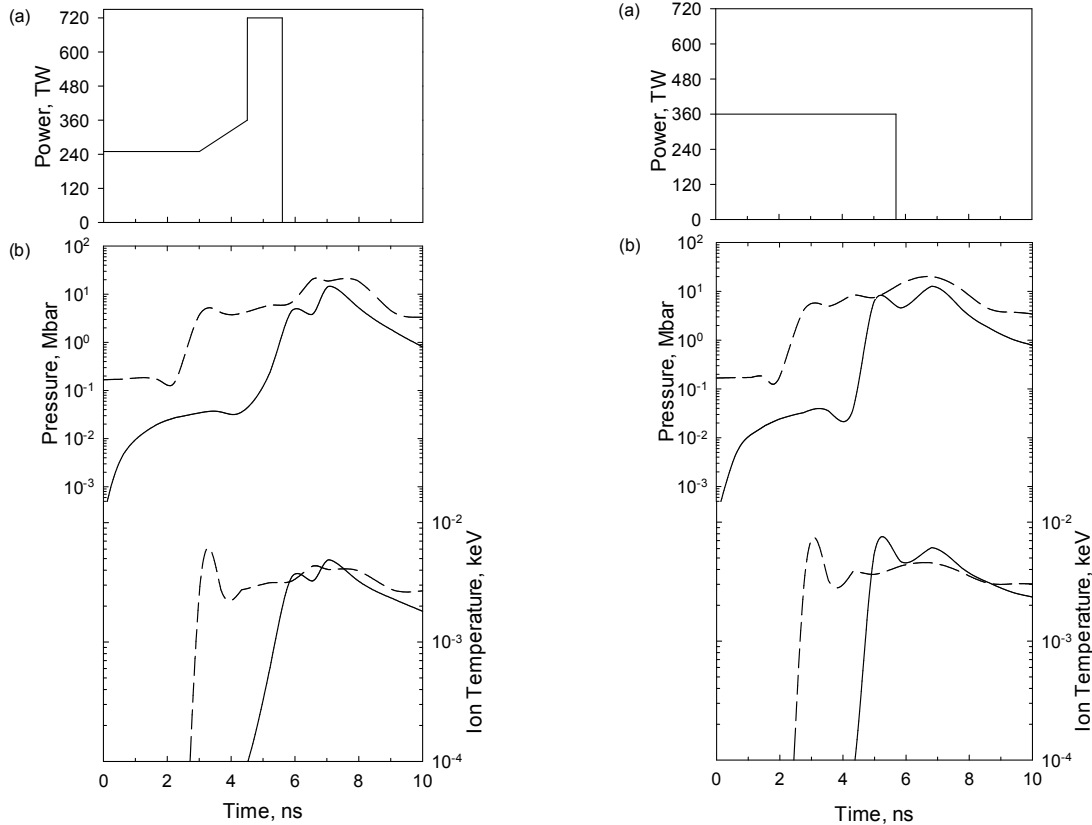
۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

سطح خارجی هدف می‌تابد که انرژی معادل  $2/05 \text{ MJ}$  توسط هدف دریافت می‌شود و تحت شرایط ایده آل از لحاظ دما و چگالی، منجر به تشکیل لکه داغ در مرکز هدف شده و موجب افروزش و سپس سوختن لایه DT و سرایت آن به لایه بیرونی تر DD، انرژی گرما هسته‌ای معادل با  $726 \text{ MJ}$  آزاد می‌گردد. بهره انرژی  $353$  در این حالت بدست آمد. همچنین در شبیه سازی مشابهی با فرض ثابت بودن انرژی خارجی داده شده به هدف، تپی با توان  $720 \text{ TW}$  طی مدت  $2/9 \text{ ns}$  ساچمه هدف را مورد اصابت قرار داده شد. در این مورد انرژی گرما-هسته‌ای  $655 \text{ MJ}$  معادل با بهره انرژی  $313$ ، تولید می‌شود. لازم به ذکر است که به این چنین تپ‌ها، اصطلاحاً تپ‌های جعبه‌ای می‌گویند. به عنوان اولین نتیجه واضح است که برای هدف‌های در محدوده ابعادی  $4 \text{ mm}$  حاوی جرم  $>3 \text{ mg}$  افروزنده DT و  $>6 \text{ mg}$  سوخت  $D_2$  مایع، تاباندن باریکه‌ای با شکل تپ جعبه‌ای حامل توان کم ولی در مدت طولانی‌تر می‌تواند با جلوگیری از رشد ناپایداری‌ها به افزایش بهره هیدرودینامیکی و چگالی انرژی پلاسما کمک کرده و منجر به بهره انرژی بالاتری می‌شود.



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۱: (a) شکل تپ جعبه ای با توان ۳۶۰ TW. (b) تحول فشار و دمای یونی در مرز DD و DT-DD هل دهنده با تپ جعبه ای. شکل ۲: (a) تغییر شکل تپ با زمان. (b) تحول فشار و دمای یونیمرز لایه DT-DD و DD-هل دهنده با تپ شکل دهی شده.

اولین گام در فرآیند همجوشی باریکه یونی، تابش باریکه به ساچمه سوخت به منظور کنده شدن لایه محافظ و انتقال انرژی به لایه جاذب می باشد. در این زمان انفجار درونی آغاز می شود. بدین معنی که توقف باریکه در حجم ماده به فرم موج های ضربه ای موجب فرو ریزش مواد در مرکز می شود. در اینجا به مقایسه لحظه آغاز انفجار درونی در دو حالت تپ جعبه ای و شکل تپ متغیر می پردازیم. شکل ۱.b تحول فشار و دمای یونی را در حالت تپ جعبه ای در ۱۰ ns ابتدایی واکنش به نمایش گذاشته است. مشاهده می شود که اولین ضربه موج در لحظه ۳ ns به مرز لایه سوخت دوتریوم و لایه هل دهنده می رسد و فشار ۵/۵ Mbar و دمای ۷ eV برای این مرز به ثبت رسیده است. در حالی که با توجه به شکل ۲.b این ضربه موج در حالت شکل تپ متغیر با مقادیر مشابه فشار و دما به این مرز می رسد. اندکی بعد در لحظه ۵ ns ضربه موج از مرز لایه سوخت و افروزنده عبور کرده و بدون تغییر در دما، فشار را تا ۱۲ Mbar افزایش می دهد. در حالی که این رخداد در مرز مشترک لایه سوخت و



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

افروزنده برای شکل تپ متغیر، منجر به افزایش فشار تا ۱۴Mbar می شود ولی در این حالت دمای ۴eV در شکل ۲.b مشاهده می شود. پس از اتمام انفجار درونی در لحظه بیشینه تراکم، قبل از انهدام هدف شاهد مکث لحظه ای در روند فشردن مواد هستیم. در این لحظه در صورت مساعد بودن شرایط دما و چگالی پلاسما، لکه داغ مرکزی تشکیل می شود و سپس در مدت زمان اندک محصورسازی امواج اِستعالی به لایه سوخت سرایت می کند. قطر لکه داغی که در اثر تابش تپ جعبه ای با توان ۳۶۰TW ایجاد می شود، حدود ۰/۲۳mm است و در مقابل، لکه داغ تشکیل شده در اثر تابش تپ با شکل متغیر دارای ضخامت ۰/۲۶mm می باشد. در واقع تپ ۳۶۰TW در متراکم کردن مواد بهتر عمل کرده است. در جدول ۲ برخی از پارامترهای فرایند همجوشی باریکه یونی برای سه حالت تپ جعبه ای با توان ۳۶۰TW، تپ جعبه ای با توان ۷۲۰TW و تپ شکل دهی شده آمده است. با توجه به جدول ۲ حداکثر دمای یونی لایه افروزنده DT برای حالت تپ جعبه ای ۳۶۰TW، از دمای یونی حالت تپ با شکل متغیر حدود ۱۵۰ واحد بیشتر است. و این در حالی است که پارامتر محصورسازی  $\rho R$  این لایه ۲/۵ واحد از حالت تپ با شکل متغیر کمتر است.

جدول ۲: مقایسه اطلاعات فیزیکی فرایند در سه حالت تپ جعبه ای ۳۶۰TW، تپ جعبه ای ۷۲۰TW و تپ شکل دهی شده.

	تپ جعبه ای ۷۲۰TW	تپ جعبه ای ۳۶۰TW	تپ شکل دهی شده
انرژی تپ (MJ)	۲/۰۵	۲/۰۸	۱/۹۵
بیشینه توان تپ (TW)	۳۶۰	۷۲۰	۷۲۰
بیشینه دمای یونی (keV)	DT	۴۳۴	۴۳۲
	DD	۱۶۵	۱۴۳
بیشینه $\rho R$ (mg.mm <sup>-2</sup> )	DT	۱۲/۵	۱۱
	DD	۹/۵	۹/۵
ضریب جفت شدگی	٪۱۹	٪۱۸/۲	٪۱۹/۲
بهره هیدرودینامیکی	۰/۲۶۲	۰/۲۵۸	۰/۲۶۸
کسر مصرف سوخت	۰/۶۱۵	۰/۵۶۸	۰/۶۲۰
بهره انرژی	۳۵۳	۳۱۳	۳۶۵

لازم به ذکر است که اگرچه دمای بالا برای اشتعال مناسب لازم است ولی پارامتر  $\rho R$  شرط کافی برای دست یابی به این مهم می باشد. پارامتر  $\rho R$  بیانگر مهلتی است که سوخت محصور شده قبل از فروپاشی، برای اشتعال دارد. زمان محصور سازی برای حالت تپ جعبه ای ۳۶۰TW حدود ۲۰۰ps و برای تپ با شکل متغیر حدود ۲۵۰ps محاسبه شده است. از این رو پارامتر  $\rho R$  بیشتر سبب شده تا سوخت در حالت تپ شکل دار بهتر بسوزد. ضریب جفت شدگی عبارت است از نسبت انرژی درونی



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

سوخت (لایه افروزنده + لایه سوخت) به انرژی باریکه یونی در لحظه بیشینه فشردگی، و همچنین بهره هیدرودینامیکی نیز از نسبت انرژی جنبشی لایه افروزنده، لایه سوخت و لایه هل دهنده به انرژی وارد شده به هدف بدست آمده است. مشاهده می شود که بهترین مقادیر ضریب جفت شدگی  $19/2$  درصد و بهره هیدرودینامیکی  $0/268$  در جدول ۲ مختص به حالت تپ شکل دار می باشد. همچنین واضح است که با تغییر در شکل تپ باریکه می توان، بهره انرژی را تا  $365$  ارتقا دهیم و این در حالی است که متعاقباً انرژی وارد شده به هدف حدود  $8\%$  کاهش داشته است.

## نتیجه گیری

دستیابی به بهره انرژی بالا در همجوشی هسته ای از چالش های اساسی است. در عین حال به دلیل ماهیت پرتوزای سوخت DT، انتظار می رود که با گسترش فناوری های لیزری یا شتاب دهنده های ذرات بتوان از سوخت های پیشرفته در نیل به این هدف استفاده نمود. تحقیقات تجربی جدید حاکی از آن است که استفاده از سوخت چگال دوتریوم خالص، نسبت به ترکیب معمولی، تاثیر مطلوبی بر بهره انرژی نهایی هدف دارد. علاوه بر این استفاده از شکل دهی تپ مناسب موجب کاهش رشد ناپایداری های هیدرودینامیکی و افزایش راندمان فرایند پیش-افروزش می گردد. در این تحقیق با استناد به موارد اخیر، بهره انرژی هدف های همجوشی نسل دوم راکتور های گداخت هسته ای با راه انداز یونی سنگین، با سوخت پیشرفته دوتریوم خالص با چگالی ۵ برابر مقدار معمول و افروزنده دوتریوم-تریوم تحقیق گردیده است. در اینجا نشان داده شده است که با بهینه سازی چین پیکربندی هدف-باریکه، بهره انرژی ایده آل بالغ بر  $365$  گردد.

## مراجع

- [1] S. O. Dean, "Fusion: Pathways to the Future", *Journal of Fusion Energy*, Vol.26, No.3, p.283-292, 2007.
- [2] 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.
- [3] M. Zucchetti, " The zero-waste option for nuclear fusion reactors: Advanced fuel cycles and clearance of radioactive materials", *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 32, No.14, p.1584-1593, 2005.
- [4] M. M. Basko; "Spark and volume ignition of DT and D<sub>2</sub> microspheres", *Nuclear Fusion*, Vol. 30, No.12, p.2443-2452, 1990.
- [5] D. Bohne, et al. "HIBALL—A conceptual design study of a heavy-ion driven inertial confinement fusion power plant", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 73, p. 195-200, 1982.
- [6] P. U. Andersson and L. Holmlid, " Ultra-dense deuterium: A possible nuclear fuel for inertial confinement fusion (ICF)", *Physics Letter A*, Vol 373, p. 3067-3070, 2009.