افروزش و سوختن هدف کروی با سوخت پیشرفته p-^{11}B در گداخت لختی با باریکه یونی سنگین

درویش پور حسن کیاده، ساناز- قاسمی زاد، عبّاس - خوشبین فر، سهیل*

دانشگاه گیلان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

یکی از مشکلات اساسی راکتور های گداخت با سوخت دوتریوم-ترتیوم(DT)، تولید نوترون ها است، زیرا این نوترون ها می توانند موجب خطرات زیست محیطی شوند. از این رو، استفاده از سوخت های پیشرفته بی نوترونی می تواند تا حدود زیادی موجب کاهش این صدمات شود. اما فراهم کردن شرایط دستیابی به افروزش و اشتعال سوخت های پیشرفته از جمله پروتون-بور بسیار دشوارتر از سوخت DT است. در این مقاله، با استفاده از بذر مرکزی DT در یک هدف کروی لایه ای، شرایط افروزش و سوختن پروتون-بور با استفاده از کد شبیه سازی یک بعدی Deira-4 بررسی شده است. نشان داده شد که کسر مصرف سوخت پروتون-بور تا فراتر از ۱۰٪ بالغ می گردد و بهره انرژی کل هدف نیز به مقدار ۲٤۲ خواهد رسید.

کلید واژه: *واکنشهای بی نوترونی، سوخت پیشرفته p-^{11}B، بذر DT، باریکه یونی سنگین، بهره انرژی بالا.*

Ignition and Burn Dynamics of Spherical Targets with p-^{11}B Advanced Fuel in Inertial Fusion of Heavy Ion Beam

Darvishpour Hasan Kiadeh,Sanaz-Ghasemizad,Abbas-Khoshbinfar,Soheil*

University of Guilan, Faculty of Science, Department of physics

Abstract:

One of the main problem of fusion reactors with deuterium-tritium (DT) fuel is the production of neutrons. Because these neutrons can cause environmental hazards. Hence, the use of aneutronic advanced fuels can greatly reduce these injuries. But, providing conditions for ignition and burning of advanced fuels, including proton-boron, is much more difficult than DT. In this paper, with the use of a central DT seed in a spherical target, the conditions of proton-boron ignition and burn have been investigated using the Deira-4, a one-dimensional simulation code. It was shown that p-^{11}B fuel burn efficiency will exceed up to 10%, and the total energy gain of target will reach 242.

Keywords: aneutronic reactions, p-^{11}B advanced fuel, DT seed, heavy ion beam, high energy gain

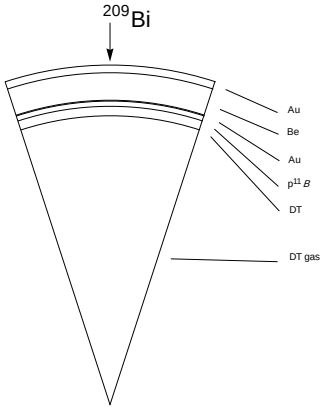
مقدمه :

سوخت اصلی راکتور های گداخت هسته ای به روش محصور شدگی لختی ICF، ترکیب دوتریوم-تریتیوم (DT) می باشد که به سبب بیشتر بودن پارامتر واکنش پذیری، نسبت به سایر واکنش های همجوشی اغلب مورد توجه بوده است. انرژی آزاد شده ۱۷/٦ MeV، حاصل از این واکنش به نسبت عکس جرم بین ذرات محصول (نوترون و آلفا) تقسیم می شود که در این میان نوترون با ۱٤/۱MeV بیشترین سهم از انرژی را دارد. با این وجود، نوترون ها به دلیل بدون بار بودن، سریعا از محیط پلاسما خارج شده و کمترین سهم را در گرمایش هدف به عهده دارند. خروج نوترون از محیط پلاسما علاوه بر ایجاد سرمایش پلاسما، موجب تخریب شدید مواد ساختار راکتور و خطرات قابل زیست محیطی می شود. برای غلبه بر این چالش، ایده استفاده از واکنش هایی در گداخت هسته ای که در آنها نوترون تولید نمی شود یا کمتر از یک درصد از کل انرژی آزاد شده توسط نوترون ها حمل می شود و به واکنش های بی نوترونی (aneutronic) معروف هستند مورد توجه می باشد. سوخت این واکنش ها، زیر مجموعه نسل دوم سوخت های همجوشی با عنوان سوخت های پیشرفته است و معروف ترین آنها واکنش های شامل $D-^{3}He$، $p-^{7}Li$، $p-^{11}B$ می باشد. در این میان، واکنش هسته ای پروتون-بور اولین بار در سال ۱۹۳۰ به وسیله Oliphant و Rutherford مطالعه شد[۱]. محاسبات نشان می دهند که این واکنش به دمای افروزشی معادل با ۱۰ برابر گداخت DT نیازمند است و موفقیت فرایند گداخت در آن، منوط به برقراری معیار لاوسون برابر با $٤٥n\tau_{DT}$ است. در برخی آزمایشات گداخت برخوردی با سوخت $p-^{11}B$، تلاش می گردد تا با برقراری شرایط گداخت در نزدیکی قله تشدیدی $p-^{11}B$ واقع در انرژی ۱٤۸ keV و سطح مقطع ۰/۱b، آهنگ واکنش آن در رقابت با سوخت های پیشرفته دیگر افزایش چشمگیری یابد[۲-۳]. در این مقاله تلاش بر آن است که به منظور تامین دمای آغازین مورد نیاز در واکنش $p-^{11}B$، به روش ICF با استفاده از راه انداز یونی سنگین در یک هدف کروی چند لایه، از DT به عنوان سوخت و بذر مرکزی استفاده شود. هدف این کار، رسیدن به بهره انرژی مناسب و گامی در جهت تولید کمتر نوترون به منظور کم کردن خطرات ناشی از آنهاست.

ساختار و پیکربندی هدف :

برای هدف هایی با مقیاس راکتور های گداخت هسته ای حاوی سوخت پیشرفته، عواملی مانند ساچمه هدف، چینش لایه های مواد و ضخامت هر یک از لایه ها، در بهره انرژی مطلوب موثر می باشند[٤]. طراحی هدف در همجوشی باریکه یونی سنگین به جز سوخت اصلی، شامل سه لایه دیگر نیز می باشد که به ترتیب از بیرونی ترین بخش به سمت درون هدف شامل لایه محافظ، جاذب و هل دهنده می باشد. لایه محافظ

منتخب باید ماده ای با عدد اتمی بالا با توانایی جلوگیری از هم گسیختگی سوخت در حین انفجار درونی و همچنین دارای بیشترین جفت شدگی میان باریکه و هدف باشد. لایه جاذب، ماده ای با عدد اتمی پایین است که وظیفه جذب انرژی لایه محافظ و تبدیل آن به تکانه را به عهده دارد و در نهایت لایه هل دهنده در افزایش بازده انفجار درونی لایه ها و افزایش بهره هیدرودینامیکی هدف نقش مهمی دارد[۵]. پیکربندی هدف مطابق شکل۱، شامل افروزنده DT و سوخت $p\text{-}^{11}B$ است.



شکل۱: پیکربندی لایه های هدف حاوی افروزنده DT و سوخت $p\text{-}^{11}B$.

ضخامت و مشخصات فیزیکی لایه های ساچمه هدف و راه انداز مورد نظر، در جدول(۱) ارائه شده است.

جدول۱: ویژگی های هدف و راه انداز

ویژگی های هدف			ویژگی های راه انداز ^{209}Bi	
لایه	ضخامت(mm)	چگالی($g.cm^{-3}$)		W_{in}(TW)	۷۲۰
گاز DT	۰-۴٫۲۸۰	۰٫۰۰۰۳		E_{in}(MJ)	۶٫۱۲
جامد DT	۴٫۲۸۰-۴٫۴۵۰	۰٫۲۲۵		T_{in}(ns)	۸٫۵
$p\text{-}^{11}B$	۴٫۴۵۰-۴٫۵۰۰	۲		E_{ion}(GeV)	۱۰
Au	۴٫۵۰۰-۴٫۵۲۵	۱۹٫۵			
Be	۴٫۵۲۵-۴٫۸۲۲	۱٫۹			
Au	۴٫۸۲۲-۴٫۹۱۲	۱۹٫۵			

ساچمه کروی مورد نظر در این مقاله شامل شش لایه می باشد. مرکز ساچمه حاوی گاز DT رقیقی است که سوخت DT هم مولار آن را در بر گرفته است و اطراف آن سوخت پروتون-بور هم مولار قرار دارد. طلا و بریلیوم و طلا موادی هستند که به ترتیب به عنوان محافظ، جاذب و هل دهنده برای این هدف انتخاب شده است. باریکه یون سنگین مورد استفاده بیسموت(^{209}Bi) با توان ۷۲۰TW و انرژی یونی ۱۰GeV به طور کاملا

متقارن به مدت زمان ۸٫۵ns به سطح خارجی هدف می تابد که در واقع راه انداز یونی انرژی معادل ۶٫۱۲MJ به هدف وارد می کند. این انرژی باعث فشرده شدن لایه های ساچمه هدف شده و منجر به تشکیل لکه داغ در مرکز ساچمه می شود. سوخت DT در دمای حدود ۵ keV می تواند فرآیند افروزش خود را آغاز کند و رساندن آن به شرایط افروزش و اشتعال نسبت به پروتون-بور که برای شروع افروزش به دمای نزدیک به keV ۲۰۰ نیاز دارد آسان تر است[۶]. از این رو، از سوخت DT به عنوان بذر مرکزی استفاده کردیم که پس از اشتعال و رسیدن به دمای مطلوب و گسترش این دما به لایه های بیرونی آغازگر واکنش افروزش پروتون-بور باشد. برای شبیه سازی فرآیند افروزش و اشتعال هدف، از یک آزمایشگاه مجازی با عنوان کد اعتبارسنجی شده Deira4 استفاده شده است، که یک کد یک بعدی و سه دمایی با روش حل تفاضل محدود کاملا ناصریح است[۷].

نتایج شبیه سازی:

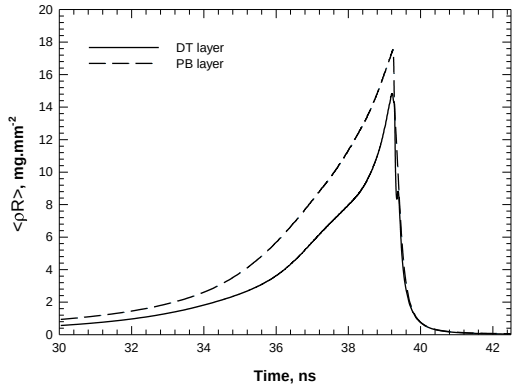
با توجه به وجود لایه های مختلف و جنس آنها باید اثرات گرمایشی ناشی از ترابرد محصولات گداخت درون لایه های هدف را در نظر گرفت. بنابراین گرمایش ناشی از ذرات آلفای محصول، پروتون های ۱۴٫۷MeV و ۳MeV و همچنین شار نوترون های ۱۴٫۱MeV و۲٫۴۵MeV در شبیه سازی لحاظ شده است. پس از شبیه سازی، ویژگی های هدف در لحظه تشکیل لکه داغ و بهره انرژی هدف در جدول(۲) آمده است.

جدول۲: ویژگی های هدف در لحظه تشکیل لکه داغ و بهره انرژی هدف

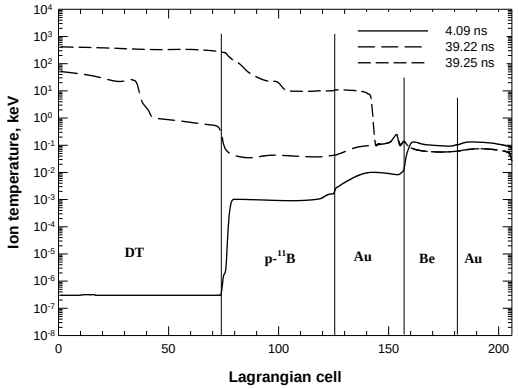
ویژگی های هدف در قله اول $\langle \rho R \rangle$			
DT		$p\text{-}^{11}B$	
بیشینه ρR (g/cm²)	۱٫۴۸	بیشینه ρR (g/cm²)	۱٫۷۵
زمان بیشینه ρR (ns)	۳۹٫۲۲	زمان بیشینه ρR (ns)	۳۹٫۲۴
بیشینه دمای الکترونی(keV)	۳۸٫۸	بیشینه دمای الکترونی(keV)	۶۱٫۹
بیشینه دمای یونی(keV)	۴۱٫۱	بیشینه دمای یونی(keV)	۵۱٫۶
بیشینه دمای تابشی(keV)	۲٫۱۹	بیشینه دمای تابشی(keV)	۵٫۲۱
بهره هیدرودینامیکی		۰٫۲۳	
بهره هدف		۲۴۱٫۸	

با تابش متقارن باریکه یونی، موج ایجاد شده برای فشرده کردن لایه های هدف با بیشینه سرعت 19×10^{7}cm/s به سمت مرکز حرکت می کند که این مقدار نسبت به مقیاس کوچک هدف بسیار زیاد است. در نهایت با تبدیل

این انرژی جنبشی به انرژی درونی، موجب افزایش چگالی و دما و تشکیل لکه داغ می شود و بهره انرژی هدف به مقدار ۲٤۱٫۸ می رسد. مطابق شکل(۲) در لحظه ۳۹٫۲۲ns بیشینه $<\rho R>_{DT}$ به مقدار $1.48\ g/cm^2$ و بیشینه $<\rho R>_{pB}$ در لحظه ۳۹٫۲٤ns به مقدار $1.75\ g/cm^2$ اتفاق می افتد. همچنین شکل(۳) امکان بررسی بهتر دمای یونی کل هدف را در این زمان ها فراهم میکند. مطابق این شکل مشاهده می شود در لحظات آغاز افروزش در زمان ۳۹٫۲۲ns دمای لایه پروتون-بور از مرتبه 10^{-2}keV بوده است. اشتعال سوخت DT و گسترش آن به لایه $p\text{-}^{11}B$ در زمان ۳۹٫۲۵ns که لحظات اولیه انفجار درونی است، دمای سلول های $p\text{-}^{11}B$ مجاور سوخت DT را تا بیش از ۲۰۰keV افزایش داده است. همچنین این شکل نشان می دهد که لایه مرکزی DT اولین بار ضربه موج روبه درون را بعد از زمان ٤/۰۹ns تجربه می کند.

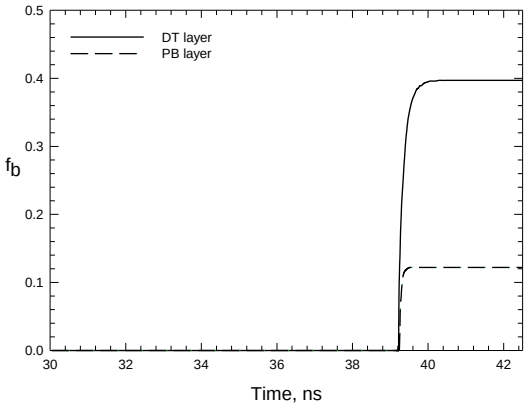


شکل۲: تحول پارامتر<ρR> لایه های سوخت DT و $p\text{-}^{11}B$

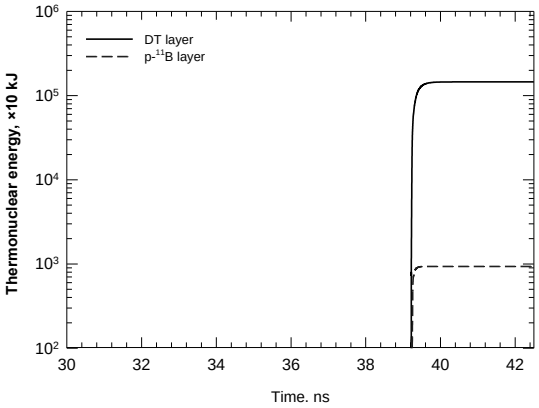


شکل۳: تغییرات دمای یونی لایه ها بر حسب سلول در سه زمان متفاوت

در شکل(٤)، کسر مصرف سوخت $p\text{-}^{11}B$ و DT را نشان داده ایم. ملاحظه می شود با وجود اینکه فراهم کردن شرایط سوختن پروتون-بور دشوار است اما این روش توانسته است بیش از ده درصد از سوخت پروتون-بور را بسوزاند و مطابق شکل(۵)، حدود 10^4 kJ انرژی گرما هسته ای آزاد کند.



شکل٤: کسر مصرف سوخت DT و $p\text{-}^{11}B$ بر حسب زمان.



شکل۵: انرژی گرما هسته ای سوخت DT و $p\text{-}^{11}B$.

نتیجه گیری:

در این پژوهش، با کمک ایده بذر مرکزی DT و با تلاش های مکرر برای انتخاب توان و زمان تابش باریکه یونی فرودی و تغییرات ضخامت لایه های هدف هنگام شبیه سازی، توانستیم شرایط سوختن سوخت پیشرفته پروتون-بور را فراهم کنیم و کسری از آن را سوزانده و به بهره انرژی ۲٤۱٫۸ دست یابیم تا با این روش از خصوصیت بی نوترونی سوخت پیشرفته پروتون-بور بهره جسته و با تولید کمتر نوترون از خطرات زیست محیطی و بیولوژیکی ناشی از آن بکاهیم.

مراجع:

[1] M.L.E.Oliphant and L.Rutherford, "Experiments on the Transmutation of Elements by Protons"; *Proceedings the Royal of Society* A **141** (1933) 259.
[2] H.Hora, et al., "Fusion Energy without Radioactivity: Laser Ignition of Solid Hydrogen–Boron (11) Fuel"; *Energy and Environmental Science* **3** (2010) 479.
[3] C.Baccou, *et al.*, "New scheme to produce aneutronic fusion reactions by laser-accelerated ions"; *Laser and Particle Beams* **33** (2015) 6.
[4] T. C. Sangster, V.N. Goncharov, P.B. Radha et.al.; "High-Areal-Density Feul Assembly in Direct-Drive Cryogenic Implosions"; *Physical Review Letters* **100** (2008) 185006.
[5] T. Shiba, H. Nakashima, Y. Yoshioka and Y. Kanda, "Burn characteristics of D-T ignited D-D and D-3He fuel pellets for inertial confinement fusion reactors"; *Nuclear Fusion* **28** (1998) 699.
[6] S. Eliezer and J.M. Martinez-Val, "Proton-Boron-11 Fusion Reaction induced by Heat-Detonation Burning Waves"; *Laser and Particle Beams* **16** (1998) 598.
[7] M. Basko, "DEIRA. A 1-D, 3-T Hydrodynamic Code for Simulating ICF Target Driven by Fast Ion Beam Version4/Institute for Theoretical and Experimental Physics", Moscow, 2001.