

محاسبه بهره انرژی جوش و گداخت سوخت پیشرفته هیدروژن بور با استفاده از مدل حجمی محصور سازی لختی

رسول خدابخش

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده :

از آنجائیکه امروزه منابع تولید انرژی فسیلی و تجدیدپذیر تکافوی مصرف مورد نیاز جهان را نمی کند و شکاف موجود بین تولید منابع فسیلی و مصرف تنها با بکارگیری انرژی هسته ای امکان پذیر شده است ، استفاده از انرژی هسته ای نه تنها برای جبران کمبود منابع سوختی مورد نیاز بشر می باشد بلکه شرایط زیست محیطی و جلوگیری از گسیل گازهای گلخانه ای و از بین رفتن لایه اوزون را نیز دنبال داشته است . از طرفی بدلیل محدود بودن منابع سوختهای هسته ای از نوع شکافت و روند افزایش مصرف انرژی در جهان ، استفاده از انرژی هسته ای از نوع همجوشی بمنظور دستیابی به یک منبع انرژی تقریباً "پایان ناپذیر اجتناب ناپذیر شده است .

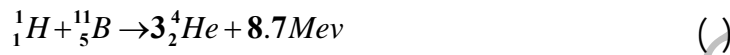
از طرفی چون همجوشی ساچمه های $D-T$ با لیزر یا پرتابه یونی برای نیروگاهها $1000MW$ از نظر محاسبات فیزیکی روش کاملاً عملی می باشد ، بنابراین محاسبات زیادی برای بدست آوردن شرایط بهینه سوخت و گداخت ساچمه های $D-T$ با استفاده از مدل محصورسازی لختی (ICF) انجام گرفته است. در اینجا با استفاده از مدل گداخت حجمی ، شرایط فشردگی، بهره انرژی و رفتار دمائی ساچمه های سوختی $H-^{11}B$ مورد بررسی قرار می گیرد . محاسبات ما نشان می دهد اگر فشردگی حدود ۱۰۰ برابر فشردگی ایجاد شده در حال حاضر و دما پلاسما به ۱۵ برابر حالت $D-T$ برسد ، ساچمه سوختی $H-^{11}B$ تمیزترین سوخت برای تولید انرژی می باشد . این شرایط را می توان با طراحی ساچمه های سوختی ترکیبی بدست آورد .

:

باتوجه به لزوم استفاده از نیروگاههای همجوشی هسته ای، بررسی امکان بکارگیری سوخت های پیشرفته برای این نیروگاهها از اولویت خاصی برخوردار است. تلاش می شود تا امکان استفاده انواع مختلف سوخت های هسته ای بررسی و عملی و غیرعملی بودن آن ها مشخص شود^(۱). هم از نظر تئوری و هم از نظر تجربی جوش و گداخت سوخت D-T توسط محققان زیادی بررسی شده است.

همچنین عملی بودن و مزیت ها و معایب و مشکلات سوخت های D-D و $D-^3He$ توسط محققان مختلف محاسبه شده و نتایج آن ها اعلام شده است^(۲و۳). حال زمان بررسی و تحقیق سوخت های کاملاً عاری از آلودگی محیط مانند $H-^{11}B$ فرا رسیده است.

به منظور اجتناب از تریتیوم رادیواکتیو و نوترون های واکنش زا که ایجاد مواد رادیواکتیو می کند یک واکنش ایده آل بدون تشعشع زایی و کاملاً تمیز عبارتند از^(۴):



در این واکنش، واکنش های جانبی (مثل DD, TT, He^3He) همانطوریکه در D-T و یا در $D-^3He$ اتفاق می افتد وجود ندارد. رادیواکتیویته تولید شده در این واکنش خیلی کمتر از رادیواکتیویته ایجاد شده بوسیله سوختن زغال سنگ می باشد. اتلاف انرژی در این سوخت شدت کاهش می یابد زیرا در این واکنش ذرات آلفا حاصل می شوند که انرژی آن ها سریعاً به پلاسما منتقل می شود^(۵).

با این حال ارضاء معیار لوسن به علت سطح مقطع کوچکتر $H-^{11}B$ خیلی مشکلتر می باشد. با محاسبات بعمل آمده طبق رابطه^(۶) (۲) معیار لوسن با سطح مقطع در دمای $10Kev$ ($\langle \sigma v \rangle = 0.29 \times \frac{m^3}{sec} 10^{-27}$) به صورت $n\tau \geq 10^{19} \frac{sec}{cm^3}$ می باشد که در مقایسه با مقدار آن برای D-T، 10^5 برابر بیشتر است^(۷).

$$n\tau \geq \frac{24KT}{\langle \sigma v \rangle E_f - 4.28 \times 10^{-36} T^{1/2}} \quad ()$$

با توجه به تکنولوژی موجود در جهان و روند پیشرفت آن، محاسبات شرایط جوش و گداخت ساچمه های سوختی $H-^{11}B$ نشان می دهد که این منبع سوختی پس از حل مشکلات تکنولوژیکی موجود و پس از سوخت های $D-T$ و $D-^3He$ در چند دهه بعد مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

محاسبات گداخت حجمی سوخت $H-^{11}B$:

روند محاسبات، ما را در جهت رسیدن به شرایط بهتر گداخت سوق می دهد. محاسبات بهره انرژی همجوشی برای ساچمه سوختی $H-^{11}B$ با فشردگی یکنواخت و بی دررو طبق مدل گداخت حجمی با فرض اینکه انرژی E_0 توسط لیزر به پلاسما مخلوطی از پنجاه درصد - پنجاه درصد هیدروژن - بور با چگالی اولیه n_0 و حجم کروی V_0 و با شعاع R_0 منجر به رسیدن پلاسما به دمای T_0 و سرعت انبساط v_0 می شود. نسبت انرژی جوش یا گداخت ایجاد شده به انرژی داده شده به عنوان بهره انرژی در طول انبساط بی دررو تعریف می شود. بنابراین بهره انرژی به صورت ساده عبارتند از^(۲):

$$G = \frac{E_{fusion}}{E_0} = \frac{E_{HB}}{E_0} \int_0^\infty dt \int_{R_0}^\infty dr^3 \frac{n_i^2}{A} \langle \sigma v \rangle$$

که در آن E_{HB} انرژی آزاد شده برای هر همجوش هسته ای، n_i چگالی یونی، $\langle \sigma v \rangle$ میانگین سطح مقطع همجوشی و $A=4$ برای سیستم دو گانه و $A=2$ برای سیستم های تک گانه (مثل DD) می باشد. میانگین سطح مقطع همجوش هسته ای $\langle \sigma v \rangle$ برای پلاسما در دمای تعادل T با میانگین جرم هسته ای یون m_i به صورت زیر داده می شود^(۳):

$$\langle \sigma v \rangle = \frac{\sqrt{m_i}}{\sqrt{\pi(KT)^{3/2}}} \int_0^\infty \frac{m_i}{2} \sigma(v) \exp\left(-\frac{m_i v^2}{KT}\right) dv^2 \quad ()$$

لازم به یادآوری است که در محاسبات انجام شده موارد زیر مورد توجه قرار گرفته است:

- ۱- استفاده از آخرین مقادیر سطح مقطع^(۵۳)
 - ۲- منظور نمودن مقدار سوخت مصرف شده در طول جوش و انبساط ساچمه
 - ۳- دوباره جذب شدن درصدی از تابش ترمزی ایجاد شده توسط خود پلاسما
 - ۴- اثر مجدد گرم شدن پلاسما توسط ذرات آلفا حاصل از واکنش
- مشابه محاسبات قبلی^(۳) تابش اولیه پالس لیزری و یا یونی باعث داغ شدن و تبخیر سطح ساچمه و در نتیجه فشردگی ساچمه به چگالی اولیه n_0 می شود. پالس لیزری یا یونی با انرژی E_0 بعدی، دمای پلاسما فشرده شده را به T_0 می رساند. دمای T_0 حاصل از پالس ثانوی باعث همجوشی و انبساط بی دررو می شود که در طول زمان از لحظه دمای T_0 موارد فوق الذکر ۲ تا ۴ در محاسبات منظور شده است.
- نتیجه محاسبات بیانگر اینست که خود گرمایشی ذرات باردار مقدار بهره انرژی و شرایط جوش و گداخت را به طور قابل ملاحظه ای تغییر می دهد.

نمونه از نتایج محاسبات برای ساچمه های سوختی $H-^{11}B$ در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین شکل ۱ تغییرات دمای پلاسما T با زمان را برای شرایط اولیه با چگالی 10^5 برابر چگالی حالت جامد ساچمه $H-^{11}B$ و حجم اولیه 10^{-5} سانتیمتر مکعب را نشان می دهد. سه حالت نشان داده شده در شکل ۱ به ترتیب مربوط به انرژیهای ورودی $E_a = 2.6 \times 10^3 MJ$ و $E_b = 1.86 \times 10^3 MJ$ و $E_c = 6.39 \times 10^3 MJ$ می باشد.

بهره های انرژی G به ترتیب $G_a = 20.1$ و $G_b = 25.2$ و $G_c = 1.88 \times 10^{-4}$ است.

فرایند گداخت را می توان در بیشینه بدست آمده بهره در این نمودار مشاهده نمود. مورد C نمونه ای از سوختن ساده بدون گداخت می باشد. دما بلافاصله با گذشت زمان و انبساط پلاسما افت کرده و افزایش دمایی در ساچمه مورد نظر مشاهده نمی شود. بهره انرژی در این حالت کوچکتر است و انرژی آزاد شده از واکنش کمتر از انرژی ورودی می باشد و دمای اولیه اعمال شده به ساچمه توسط لیزر کمتر از دمای مورد نیاز برای گداخت می باشد. در دو حالت a و b که گداخت با بهره بالا و گداخت با بهره پایین می باشد با گذشت زمان دما بطور ناگهانی افزایش می یابد افزایش دما به علت خود گرمایشی ذرات آلفا و دوباره جذب درصدی از تابش

قرمزی می باشد^(۳). البته حالت a با افزایش انرژی ورودی بعلاوه انبساط سریعتر نسبت به حالت b گرم شدن توسط ذرات باردار آلفا و پرتو تابش ترمزی کمتر محسوس است و در نتیجه بهره کمتر است. کاهش ناگهانی دما در هر دو حالت نیز به علت انبساط بیش از حد پلاسما می باشد. مورد b دارای بیشترین بهره انرژی و کمترین انرژی ورودی و طولانی ترین زمان نسبت به مورد a می باشد و یا به عبارتی بهترین حالت گداخت برای این چگالی و حجم می باشد.

قدم بعدی طبق شکل (c)، بدست آوردن منحنی های بهره های بهینه شده می باشد. این منحنی ها با به هم پیوستن بیشینه بهره ها برای هر چگالی بدست می آید. روشن است که با افزایش چگالی بر خلاف سایر سوخت ها رفتار افتی در بهره مشاهده می شود. این رفتار به اتلاف انرژی و برد ذرات آلفا مربوط می شود. اتلاف انرژی و برد ذرات آلفا طبق مدل تجمعی با روابط زیر محاسبه می شود^(۸۷):

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi m_a Z^2 e^4}{m_e E_a} n_e \log\left(\frac{KT m_e^2 E_a^2}{\pi n_e Z^2 m_a^2 e^6}\right) \quad ()$$

$$R_a = \int \frac{dE}{(-dE/dx)} = \frac{e^2}{2KT} \frac{M}{m_e} E_i (\ln(\lambda E_o^2)) \quad ()$$

در روابط بالا E_a انرژی ذرات آلفای با سرعت v در یک پلاسما با دمای T و چگالی الکترونی n_e با جرم m_e ، بار e و بار Z آلفای برخورد کننده و پارامتر برخورد کمینه b_{min} و بیشینه b_{max} است و $E_i[x]$ انتیگرال لگاریتم می باشد^(۸)

$$\lambda = \left(\frac{m_e}{M}\right)^2 \left(\frac{KT}{\pi n_e Z^2 e^6}\right), \quad E_i(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt \quad ()$$

طبق رابطه (۶) برد ذرات آلفا با دمای پلاسما تا حدود چند کیلو الکترون ولت کاهش یافته دوباره با افزایش دمای پلاسما افزایش خواهد یافت. با افزایش فشردگی طبق رابطه (۸) که از محاسبات عددی بدست می آید دمای پلاسما افزایش می یابد. با افزایش دما برد ذرات آلفا افزایش یافته و انرژی منتقل شده به پلاسما کاهش خواهد یافت. در نتیجه خود گرمایشی کم شده و بهره انرژی کمتر از حالت قبل خواهد بود.

$$T = (Kev) \geq 0.09843 \frac{n}{n_s} \quad ()$$

با توجه به نتایج بدست آمده از محاسبات بهره انرژی ساچمه های $H-^{11}B$ که جدول و نمودارها برخی از آنها را نشان می دهد اگرچه $H-^{11}B$ تمیزترین سوخت می باشد ولی امکان بکارگیری این سوخت در نیروگاههای همجوشی تجارتي برای چند دهه ممکن نمی باشد. براساس تکنولوژی امروزه و روند پیشرفت آن اولین نوع سوخت پیشرفته ساچمه های $D-T$ می باشد. با حل مشکلات تکنولوژیکی استفاده از سوخت های $D-^3He$ در نوبت دوم قرار خواهد گرفت در این مرحله امکان استفاده از ساچمه های $D-D$ نیز فراهم خواهد شد. اما استفاده از ساچمه های $H-^{11}B$ پس از همه سوخت های ذکر شده قرار خواهد گرفت. به نظر می رسد

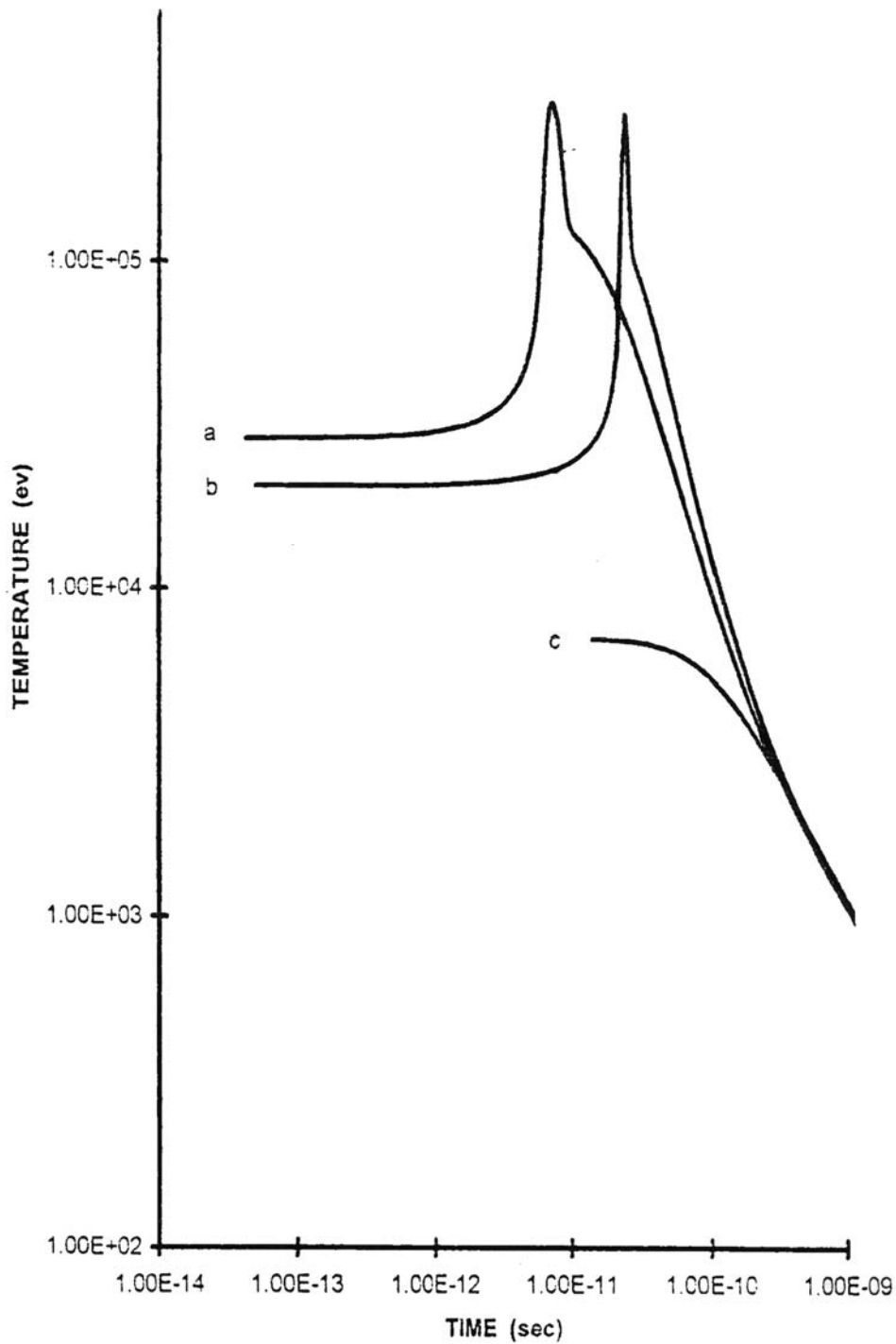
یک راه ممکن در جهت به جلو انداختن زمان استفاده از سوختهای $H-^{11}B$ ، بکارگیری ساچمه های ترکیبی D-T با $H-^{11}B$ است. همچنان که در بمب های هیدروژنی جهت فراهم نمودن انرژی لازم برای همجوشی از انرژی شکافت هسته ای استفاده می شود، در سوخت های ترکیبی نیز مانند (شکل ۳) همجوشی D-T و انرژی حاصل از آن می تواند شرایط را برای همجوشی و گداخت $H-^{11}B$ فراهم نماید.

در مدل گداخت جرقه ای ساچمه دولایه ترکیبی D-T لایه درونی و D-D و یا $D-^3He$ لایه بیرونی را تشکیل می دهد مورد آزمایش و محاسبه قرار گرفته اند^(۹۱). هدف از محاسبات پیدا کردن شعاع لایه ها، چگالی، انرژی ورودی برای دستیابی به بهره انرژی مورد نیاز در نیروگاههای تجارتمی می باشد. تا بحال محاسبات مشابه با استفاده از مدل گداخت حجمی برای ساچمه های ترکیبی انجام نشده است. انجام یک چنین محاسباتی با استفاده از مدل گداخت حجمی نیاز به بررسی سه نوع طراحی ساچمه دارد: ساچمه مرکب از دولایه که D-T لایه درونی و $H-^{11}B$ لایه بیرونی و یا D-T لایه بیرونی و $H-^{11}B$ لایه درونی و همچنین مخلوط همگنی D و T و B. طرح محاسبات گداخت حجمی برای ساچمه های ترکیبی در دست اقدام است و بدین منظور کد های کامپیوتری موجود را براساس فرایندهای فیزیکی که اتفاق می افتد در حال تغییر دادن هستیم. محاسبات برای ساچمه های ترکیبی که از نظر تکنولوژی هم امکان ساخت باشد انجام خواهد گرفت. در شکل ۳ چند طرح مختلف برای دستیابی به جوش و گداخت $H-^{11}B$ آورده شده است که قطائی از کره متقارن می باشد.

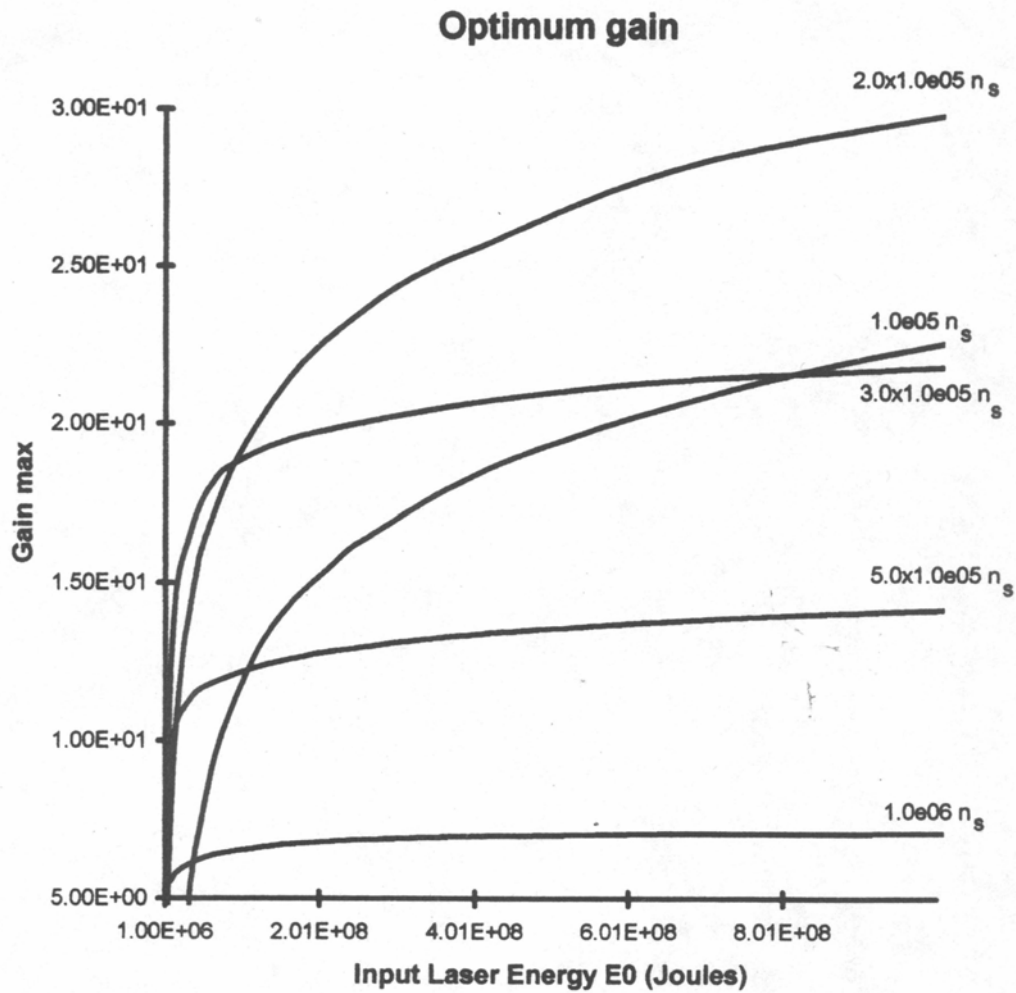
همچنانکه قبلاً اشاره شد، ساچمه سوختی بصورت کره کاملاً متقارن می باشد که توسط پالسهای لیزری و یا یونی کاملاً متقارن تحت تابش قرار می گیرد. بنابراین در طول فشردگی، همجوشی و انبساط بی دررو، هندسه ساچمه کره متقارن می باشد و برای حالت متقارن و جهت اجتناب از پیچیدگی محاسبات، ناپایداری ریلی - تیلور در محاسبات منظور نشده است.

استفاده از این طرح ها، انرژی ورودی مورد نیاز به گداخت $H-^{11}B$ را به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. چون انرژی حاصل از جوش احتراق دهنده داخلی D-T یا $D-^3He$ باعث جوش و گداخت سوخت اصلی خواهد شد. در این نوع ساچمه ها ارضاء معیار لوسن نسبت به سوخت همگن $H-^{11}B$ بدون احتراق دهنده داخلی آسانتر می باشد. همچنین مشکل نیاز به پوشش زایشی تریتیوم نیز برطرف خواهد شد. در شکل (۳- b) تریتیوم مورد نیاز در قسمت داخلی توسط لایه خارجی D-D تامین می شود. به منظور اجتناب از تریتیوم رادیواکتیو و تولید نوترون از ساچمه (۳- c) استفاده می شود. از ساچمه (۳- d) خلاء مرکزی به منظور تراکم بیشتر در مرکز استفاده می شود.

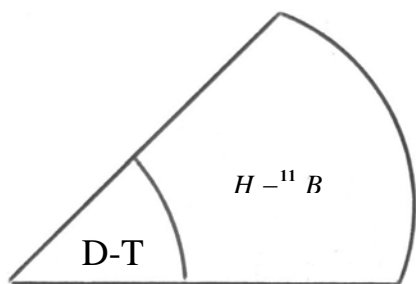
انتخاب یکی و یا بیشتر از انواع طراحی اشاره شده در شکل ۳ منوط به داشتن نتایج محاسبات پیچیده سوخت ترکیبی است. قبلاً کد کامپیوتری برای محاسبه ساچمه های سوختی ترکیبی همگن برای T-T, D-D و D-T^(۳) و $D-^3He$ ^(۱۱) نوشته شده و اینبار درصدد بسط که به حالت غیرهمگن می باشیم. فرض ها و شرایط محاسبه برای $H-^{11}B$ ساده و ترکیبی مشابه شرایط محاسبه برای D-T می باشد^(۱۱و۱۲و۳).



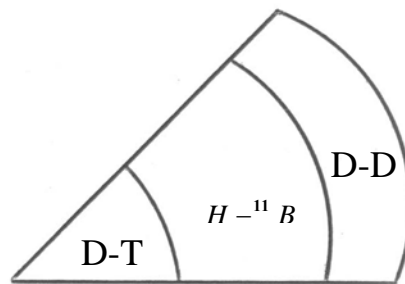
شکل (۱) بستگی دمای ساچمه $H^{-11} B$ به زمان با فشردگی $n = 10^5 n_s$ و $V_0 = 10^{-5}$ با انرژی های ورودی: $E_A = 2/6 \times 10^3$ MJ و $E_B = 1/86 \times 10^3$ MJ و $E_C = 6/39 \times 10^2$ MJ و بهره های: $G_A = 20/1$ و $G_B = 25/2$ و $G_C = 1/88 \times 10^{-2}$ و کسر مصرفی سوخت: $\eta_a = \% 80/59$ و $\eta_b = \% 72/3$ و $\eta_c = \% 0/06$



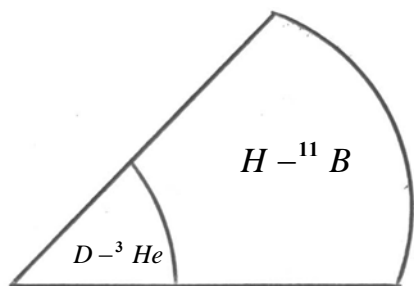
شکل (۲) منحنی تغییرات بهره انرژی بهینه با انرژی ورودی برای ساچمه با چگالی های مختلف



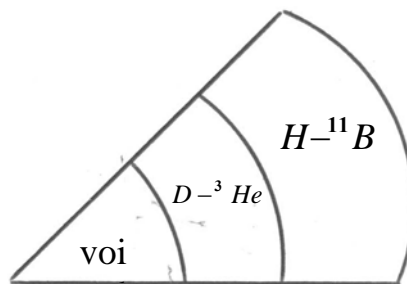
a



b



c



d

شکل (۳) طراحی های مختلف ساچمه برای گداخت سوخت اصلی $H-^{11}B$ بصورت قطائی از کره متقارن

References:

1. Khoda – Bakhsh R.; *2 nd International conference on Nuclear Science and Technology in Iran, April 27-30, (2004).*
2. Hora. H.; *Plasmas at High Temperature and Density; Springer, Heidelberg (1991).*
3. Khoda – Bakhsh. R.; *Nucl.Instrum, Methods.ResA330, 268 (1993).*
4. Scheffel CHR.et al. ; *Laser and Particle Beams, 15, (4) 565 (1997).*
5. Pieruschka. P. and Khoda – Bakhsh. R.,et al., *Laser and Particle Beams, 10 ,(1) 145 (1992) .*
6. Niu. K. ; *Nuclear Fusion , Cambridge University Press (1989) .*
7. Myerhof. W.E., *Elements of Nuclear Physics, New York; Mc Graw Hill(1967) .*
8. Hora. H. and Ray. P. S. ; *Z. Natureforsch , 890 (1978).*
9. Shiba. T.,et al. ; *Nuclear Fusion, 27 (4) , 589 (1987).*
10. Shiba. T.,et al. ; *Nuclear Fusion, 28,(4), 699 (1988) .*
11. Khoda – Bakhsh. R. , Hora. H. and Miley. G. H. , *Fusion Technology, 24, 28 (1993) .*
12. Khoda – Bakhsh. R., *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena, AIP 289 (1996).*

Archive of SID