

## بررسی عوامل موثر دمایی در گداخت حجمی دوتریم - تریتم با استفاده از مدل تجمعی

محمد مهدوی درونکلا<sup>۱</sup>؛ محمد صالحی<sup>۲</sup>؛ سعید حسن پور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه مازندران

<sup>۲</sup>دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر

<sup>۳</sup>دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور

### چکیده

پارامترهای موثر همچون سرد سازی ناشی از انبساط بی درو، گرم کردن پلاسما بوسیله ذره آلفا، اتلاف دما ناشی از تابش ترمزی و جذب دوباره تابش ترمزی بر بهره انرژی و درصد مصرف سوخت گداخت حجمی دوتریم- تریتم مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط بهینه در طراحی ساچمه سوخت به ازاء انرژی لیزر قابل دستیابی، محاسبه شده است که با توجه به محاسبات برای سیستم سوخت D-T، بهره همجوشی  $G = 230.6$ ، دمای اولیه  $T_0 = 3579.6$  و در صد مصرف سوخت  $D = 28.4$  به دست آمده است.

### مقدمه:

پیشرفت اجتماعی و تکنولوژیک بشر موجب افزایش استفاده از انرژی می شود که این دستیابی به منابع جدید انرژی را ضروری می سازد. انتظار می رود کمبود انرژی با سوخت های هسته ای تامین شود. بیش از نیم قرن است که راکتورهای شکافت هسته ای بکار افتاده اند اما فراوانی عناصر سبک که می توانند از طریق همجوشی انرژی تولید نمایند، دانشمندان را به سمت ساخت راکتور همجوشی سوق داده است. مزیت اصلی راکتور همجوشی نسبت به راکتور شکافت این است که هسته های سبک بسیار فراوان و به آسانی قابل دستیابی هستند و محصولات نهایی همجوشی بر خلاف شکافت، معمولاً "هسته های سبک پایدارند نه هسته های سنگین پرتوزا بنابراین آلودگی های زیست محیطی و خطرات بیولوژیکی راکتورهای همجوشی هنگام حوادث طبیعی بمراتب کمتر از راکتورهای شکافت است [1-3].

### تئوری:

تولید انرژی همجوشی در مقیاس بزرگ و اقتصادی بر اساس واکنش همجوشی هسته ای ایزوتوپ های هیدروژن (دوترون- تریتم) به صورت زیر انجام پذیر می باشد [4,5].



با اعمال انرژی ورودی  $E_0$ ، مخلوطی از پلاسمای **D-T** به عنوان سوختی با چگالی یکنواخت  $n_0$  و حجم کروی  $V$  به دمای  $T$  می‌رسد به طوری که تراکم و انبساط پلاسمای بی‌دررو است. برای اعمال اثر دوباره گرم کردن پلاسمای بوسیله ذرات باردار حاصل از همجوشی از مدل تجمعی و در جذب دوباره تابش ترمزی، از مدل برخورد کلاسیک استفاده شده است. بهره انرژی سیستم را می‌توان از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$G = \frac{\mathcal{E}}{E_0} \int dt \int dV \frac{n_i^2}{A} \langle \sigma v \rangle \quad (2)$$

که در آن  $\mathcal{E}$  انرژی آزاد شده در هر همجوشی هسته‌ای،  $n_i$  چگالی یونی،  $\langle \sigma v \rangle$  میانگین سطح مقطع همجوشی برای سرعت‌های مختلف و در سیستم‌های دوگانه  $A = 4$  می‌باشد.  $\langle \sigma v \rangle$  میانگین سطح مقطع همجوشی هسته‌ای برای پلاسمای در دمای تعادل  $T$  و با میانگین جرم هسته‌ای  $m_i$  از رابطه زیر به دست می‌آید.

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

برای فشردگی زیاد حدود  $10^4$  برابر چگالی حالت جامد، جذب تابش ترمزی توسط پلاسمای به علت کوچک بودن برد قابل ملاحظه است، بنابراین جذب تابش ترمزی در داخل پلاسمای باعث دوباره گرم شدن پلاسمای می‌شود. قدرت تابش کل برای چرخه سوخت  $D-T$  را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [6]

$$P_b(DT) \cong 2.14 \times 10^{-31} n_D n_T T^{1/2} \frac{\text{Watt}}{\text{Cm}^3} \quad (4)$$

ذرات باردار پر انرژی حاصل از گداخت همچون ذره آلفا، انرژی‌شان را در برخورد به یون‌ها و الکترون‌های پلاسمای هدف منتقل می‌کنند. اتلاف انرژی ذرات آلفا در داخل پلاسمای را به صورت زیر می‌توان به دست آورد [7].

$$-\frac{dE_\alpha}{dt} = \frac{m_e}{m_e} \left( \frac{\pi K^2 Z_\alpha^2 e^4}{E_\alpha} \right) Ne \text{Ln} \left( \left( \frac{m_e}{m_\alpha} \right)^2 \frac{K_B T E_\alpha^2}{\pi n_e K^3 e^6 Z_\alpha^2} \right) \quad (5)$$

که در آن  $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  و  $K_B$  ثابت بولتزمن می‌باشد. طبق این مدل (تجمعی) هر چه دما افزایش می‌یابد برد ذره آلفا کمتر می‌شود یعنی ذرات آلفا می‌توانند در فاصله‌ای کمتر گرمایشان را به ذرات دیگر بدهند که باعث افزایش بهره و کاهش دمای بهینه اولیه می‌شود. با دوباره گرم شدن پلاسمای توسط ذرات آلفای حاصل از همجوشی اولیه شرایط برای گداخت حجمی مهیا می‌شود. در نتیجه ساچمه منفجر می‌شود و در طی فرایند انبساط آزاد بی‌دررو پلاسمای سرد می‌شود.

$$T_{AD} = T_n \left( \left( \frac{r_n}{r_{n+1}} \right)^2 - 1 \right) \quad (6)$$

با توجه به توضیحات بالا در مدل ریاضی چهار عامل تغییر دما،  $T_{AD}$ ، در اثر سرد شدن بی‌دررو حاصل از انبساط پلاسما، تغییر دمای  $T_\alpha$  بر اثر گرم شدن پلاسما توسط ذرات آلفا، تغییر دمای  $T_{BR}$  حاصل از تابش ترمزی و تغییر دمای  $T_{ABR}$  حاصل از جذب شدن تابش ترمزی در نظر گرفته شده اند. بنابراین تغییر دمای پلاسما در فاصله زمانی  $dt$  بصورت زیر محاسبه می‌شود،

$$\Delta T = T_\alpha + T_{ABR} - T_{AD} - T_{BR} \quad (7)$$

که دمای اولیه پلاسما برابر است با:  $T_0 = \frac{E_0}{3 V_0 n_0 k_B}$  و دمای پلاسما در هر لحظه از رابطه  $T_{n+1} = T_n + \Delta T$  به دست می‌آید.

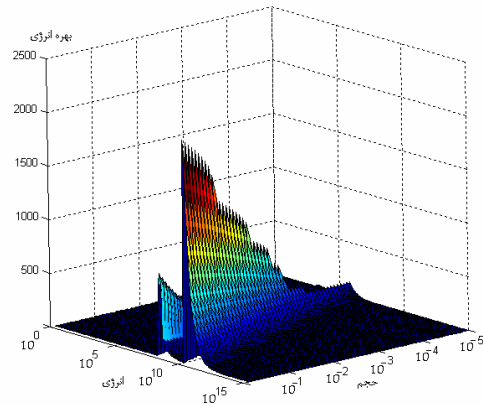
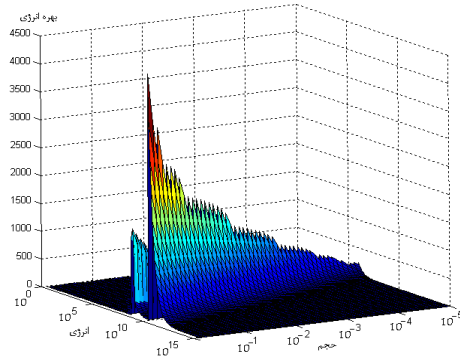
### نتایج:

بستگی بهره انرژی همجوشی واکنش **D-T** به انرژی اولیه و حجم اولیه پلاسما در نمودارهای سه بعدی بهره انرژی به ازاء چگالی های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ برابر چگالی حالت جامد در شکل (۱) و بستگی بهره انرژی به حجم و چگالی به ازاء انرژی معین در شکل (۲) نشان داده شده است. برای تحلیل بهتر این نمودارها مقطعی از بهره انرژی و درصد مصرف سوخت در شکل (۳) ارائه شده است. در این نمودارها بهره انرژی و درصد مصرف سوخت به ازاء چگالی اولیه هزار برابر چگالی حالت جامد و انرژی های اولیه  $10^6$  و  $10^8$  ژول بر حسب حجم سوخت رسم شده اند، منحنی بهره انرژی دو قله دارد. به نظر می‌رسد که در دو حجم مختلف بهره انرژی ماکزیمم می‌شود، اما باید به خاطر داشته باشیم که نباید تنها بهره انرژی را در نظر بگیریم بلکه باید پارامتر مهم دیگر یعنی درصد مصرف سوخت را نیز در نظر گرفت. زیرا هر چه درصد مصرف سوخت بیشتر باشد، سوخت کمتری به هدر رفته است. همانطور که در شکل (۳) می‌بینید در یکی از این دو حجم درصد مصرف سوخت ماکزیمم است. قله اول نمودار بهره انرژی شکل (۳) بیانگر سوختن ساده می‌باشد. در این حالت سوخت گرم می‌شود و همجوشی اتفاق می‌افتد اما اتلاف ناشی از تابش ترمزی بیشتر از اثر دوباره گرم کردن ذره آلفا است در نتیجه سوخت سرد شده و همجوشی متوقف می‌شود به این حالت سوختن ساده می‌گویند. شکل (۴) بستگی زمانی دمای پلاسما برای حالتی که چگالی اولیه پلاسما ۱۰۰۰ برابر چگالی حالت جامد و حجم های اولیه  $10^{-4}$ ،  $10^{-5}$  و  $10^{-6}$  سانتی متر مکعب با انرژی اولیه  $10^6$  ژول داده شده است. دمای اولیه برای این سه حالت به ترتیب  $357/9$ ،  $3579/6$  و  $35796$  الکترون ولت می‌باشد در حالت (الف) حجم حاصل از حجمی که به ازاء آن ماکزیمم بهره انرژی و

درصد مصرف سوخت را داریم بیشتر است در این حالت دما به خاطر تابش ترمزی و انبساط بی دررو به سرعت افت می کند و گداخت صورت نمی گیرد. در حالت (ب) سوخت در اثر دوباره گرم کردن ذرات آلفا شروع به گرم شدن می کند و گداخت پلاسما قبل از انبساط سریع پلاسما و سردسازی بی دررو رخ می دهد در حالت (ج) چون اثر سردسازی تابش ترمزی و انبساط بی درونسبت به دوباره گرم کردن ذرات آلفا زیاد است فقط سوختن ساده اتفاق می افتد و سوخت برای یک مدت زمان بسیار کوتاه در دمای بالا قرار می گیرد. با توجه به محاسبات فوق در شرایط بهینه برای سیستم سوخت **D-T**، بهره همجوشی  $G = 230.6$ ، دمای اولیه  $T_0 = 3579.6$  و در صد مصرف سوخت  $D = 28.4$  به دست آمده است.

مراجع:

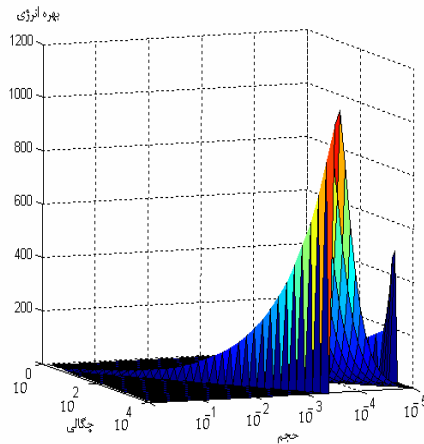
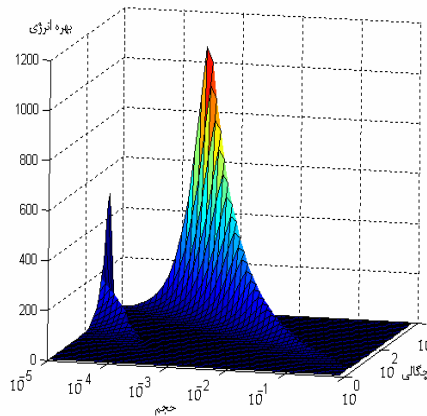
- 1- S. Eliezer and Z. Henis, Fusion Tech., 26 (1994).
- 2- D. R. Cohen, J. Fusion Energy, 13, 27 (1994).
- 3- H. B. Chen et al., J. Fusion Energy, 13, 45 (1994)
- 4- S. Eliezer et al., Phys. Letters A, 243, 311 (1998).
- 5- S. Eliezer et al., Nucl. Fusion, 40, 195 (2000).
- 6- J. Kesner et al., Nucl. Fusion 44, 193 (2004).
- 7- P. T. Leon et al., Phys. Letters A, 343, 181 (2005).



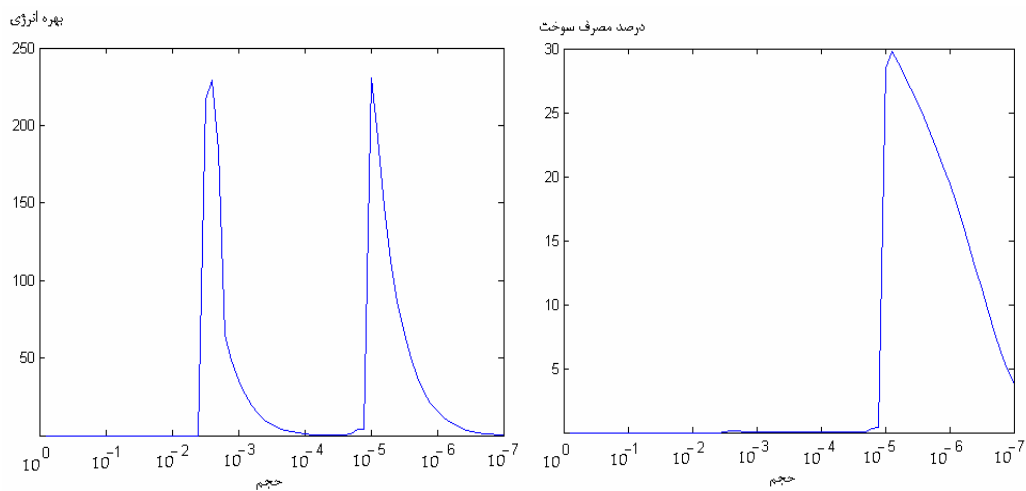
ب

الف

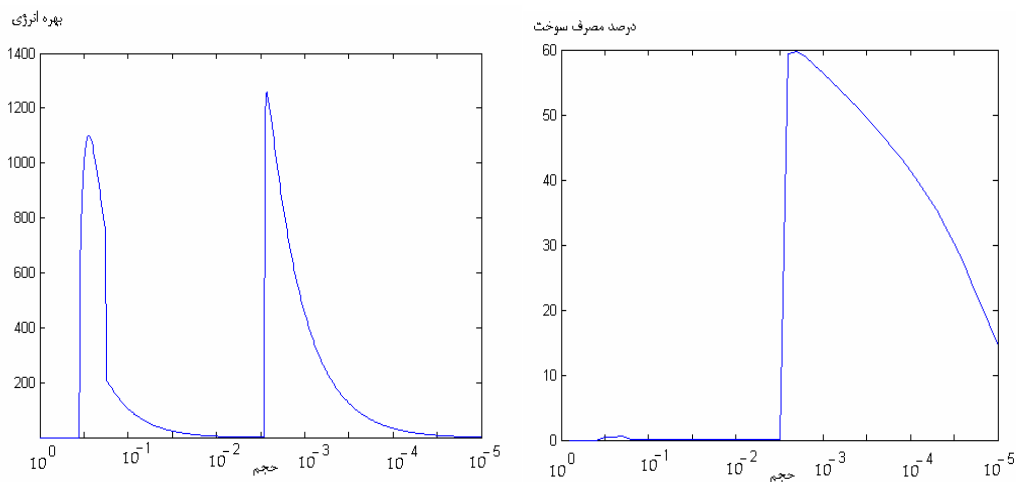
شکل (۱): بستگی بهره انرژی به انرژی و حجم اولیه پلازما برای چگالی اولیه الف (۵۰۰ و ب) ۱۰۰۰ برابر چگالی حالت جامد ( $n_s = 5.82 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ) انرژی اولیه بر حسب ژول و حجم اولیه سوخت بر حسب سانتی متر مکعب می باشند.



شکل (۲): بستگی بهره انرژی به حجم و چگالی اولیه پلازما را برای انرژی های اولیه  $10^6$  ژول از دو نما. حجم اولیه سوخت بر حسب سانتی متر مکعب و چگالی اولیه بر حسب چگالی حالت جامد می باشد.

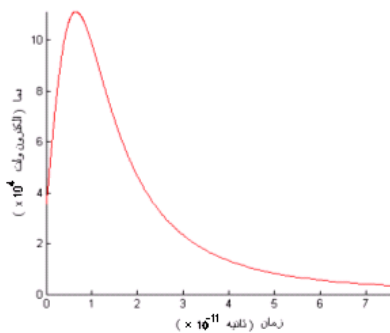


## الف

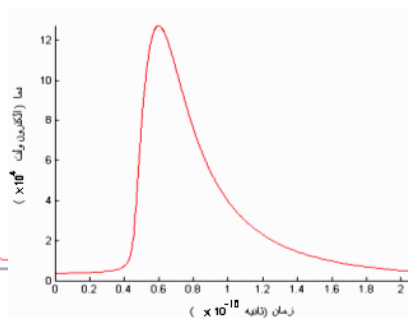


## ب

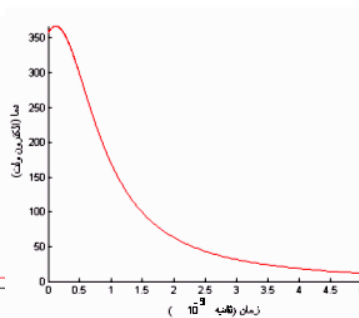
شکل (۳): بستگی بهره انرژی و درصد مصرف سوخت به حجم برای چگالی اولیه ۱۰۰۰ برابر چگالی حالت جامد و انرژی‌های اولیه الف ( $10^6$  ژول و ب) ( $10^8$  ژول).



ج



ب



الف

شکل (۴): وابستگی دمای پلاسما به زمان برای چگالی اولیه ۱۰۰۰ برابر چگالی حالت جامد و انرژی اولیه  $10^6$  ژول و حجم های اولیه الف)  $10^{-4}$  سانتی متر مکعب، ب)  $10^{-5}$  سانتی متر مکعب و ج)  $10^{-6}$  سانتی متر مکعب.