

تأثیر کاهش تریتیوم در تعیین بهره همجوشی واکنش D-T، با در نظر گرفتن احتراق گر

سریع

*سیده نسرين حسینی مطلق^۱، شیلان صید محمدی^۱، لیلا منتظران^۱، هاجر کاظمی فرد^۱

^۱دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده

یکی از اهداف های کنونی ما بررسی بهره سوخت DT با انتخاب درصد کسر بسیار ناچیز سوخت تریتیوم، f_T ، در دستاوردهای جدید ICF ، از طریق مفهوم احتراق گره‌های سریع است. این محاسبات قطعاً فرض امکان استفاده از احتراق گره‌های سریع در سطح صنعتی را مشخص می‌کند. قطعاً هرچه میزان تریتیوم مصرفی کمتر باشد این طرح از نظر اقتصادی مقرون به صرفه تر است. البته این میزان نباید به قدری کم باشد که بهره مطلوب برای همجوشی را تحت تأثیر خود قرار دهد.

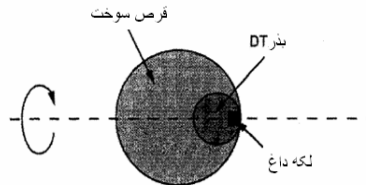
واژه های کلیدی: احتراق، همجوشی، تریتیوم، غلظت، سوخت.

مقدمه

احتراق سریع نوعی از همجوشی است که در آن مرحله احتراق و مرحله فشردگی سوخت از هم مجزا هستند. سوخت هایی که به طور غالب شامل دوتریوم با مقدار جزئی تریتیوم هستند و از طریق مفهوم احتراق گره‌های سریع همجوشی می‌کنند، در آن ها انرژی محرک توسط پروتون های پر انرژی تولید می‌شود. این طرح سوخت ابتدا تا چگالی فوق العاده بالا در زمانی که نزدیک به ماکزیمم زمان فشردگی است، توسط منبع خارجی با تمرکز زیاد، فشرده می‌شود و لکه داغ احتراقی با توان بسیار بالا با استفاده از الکترون های داغ که از پرتو لیزر پر توان تولید می‌شوند، به وجود می‌آید. احتراق گره‌های سریع تحت استانداردهای ICF ، دارای مزایایی هستند از جمله این که در آن ها احتراق به وسیله یک نقطه داغ شروع می‌شود که لکه داغ نیز به نوبه خود از تخریب پوسته انفجاری تولید می‌شود. به علاوه احتراق گره‌های سریع اساساً تقارن انفجار و پایداری تجهیزات را کاهش داده و بهره بالاتری را با انرژی محرک کمتری بدست می‌دهند [1,2]. و همچنین در آنها از ساختار سوخت هم چگال، *isocoric*، که تهیه آن آسان است استفاده می‌شود. ساختار سوخت های با تریتیوم جزئی، شامل دوتریوم تقریباً خالص است که با بذر DT سوزانده می‌شود، که با این طراحی مقدار مصرف تریتیوم و نیاز برای تولید تریتیوم کاهش یافته و تخریب ناشی از نوترون های با انرژی $14.1MeV$ کاهش می‌یابد [3]. به علاوه هدف ها نیز خود قادر به زایش تریتیوم خالص داخلی با نسبت زایش تریتیوم $B_T > 1$ (در اینجا B_T به صورت کسر تعداد اتم های تریتیوم حاضر در هدف به تعداد اتم های تریتیوم اولیه

*hosseinimotlagh@iust.ac.ir

موجود در هدف تعریف می شود) می باشند [4]. در شکل (۱) چگونگی طراحی سوخت های با تریتیوم جزئی آورده شده است.



شکل (۱) سوخت های دوتریوم دار با مقدار تریتیوم جزئی. بذر احتراق می تواند شامل سوخت DT هم چگال یا دیگر ترکیبات آن مانند $D_{80}T_{20}$ باشد و سوخت اصلی شامل دوتریوم خالص با تریتیوم جزئی مانند $(D_{1-y}T_y)$ با $y \ll 0.5$ باشد

روش کار

کسر مصرفی سوخت در ترکیبات با تریتیوم جزئی

در واکنش دوتریوم تریتیوم یکی از جنبه های مهم محاسبه میزان مصرف مواد همجوشی کننده در خلال همجوشی است، حال برای نیل به این هدف معادلات توازن را حل می کنیم: [5]

$$\frac{dn_D}{dt} = -n_D(t)n_T(t) \langle \sigma v \rangle_{DT} \quad (1)$$

$$\frac{dn_T}{dt} = -n_D(t)n_T(t) \langle \sigma v \rangle_{DT} \quad (2)$$

از جمع روابط (۱) و (۲) داریم: $\frac{d}{dt}(n_D + n_T) = -2n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{DT}$. که در آن n_D و n_T به ترتیب چگالی دوتریوم و تریتیوم می باشند و $\langle \sigma v \rangle_{DT}$ سطح مقطع همجوشی واکنش DT است. اگر f_D و f_T به ترتیب کسر دوتریوم و کسر تریتیوم بکار رفته در قرص سوخت DT باشند، در این صورت برای چگالی های دوتریوم و تریتیوم خواهیم داشت: $n_D = f_D n_i$, $n_T = f_T n_i$. که f_D و f_T بین صفر و یک تغییر می کنند و $f_D + f_T = 1$ می باشد. با فرض یکسان نبودن چگالی دوتریوم و تریتیوم برای معادله توازن خواهیم داشت:

$$\frac{dn_i}{dt} = -2f_D f_T n_i^2 \langle \sigma v \rangle_{DT} \quad (3)$$

با حل این انتگرال برای چگالی یونی بر حسب تغیریات زمان داریم:

$$n_i(t) = \frac{1}{\frac{1}{n_0} - 2f_D f_T \langle \sigma v \rangle_{DT} t} \quad (4)$$

که در آن $n_{i,0}$ چگالی اولیه سوخت می باشد. ماکزیمم زمان محصورسازی پلازما $\tau = \frac{R}{C_s}$ می باشد، که R شعاع قرص سوخت و $C_s = \left(\frac{3kT_i}{m_i}\right)^{1/2}$ سرعت صوتی پلازما می باشد. کسر مصرفی سوخت به صورت

$$\phi = \frac{n_{i,0} - n_i(t)}{n_{i,0}}$$

تعریف می شود و با کمی ساده سازی و استفاده از رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$\phi = \frac{\rho R}{\rho R + H_B} \quad (5)$$

که در آن H_B پارامتر سوخت نامیده می شود و عبارت است از: $H_B = \frac{2}{f_D f_T} \frac{m_i C_s}{\langle \sigma v \rangle_{DT}}$

پارامترهای مهم در احتراق سوخت های با تریتیوم جزئی

از بحث های گفته شده در مورد سوخت های با تریتیوم جزئی می توان گفت (الف) یک بذر DT برای احتراق بایستی فراهم باشد. ب) چگالی های بالا و جرم های بزرگ برای سوخت DT هم مول برای سوختن موثر لازم است (برای نمونه، $m \approx 10mg$ و $\rho \approx 1000g/cm^3$). ج) بهره سوخت های با تریتیوم جزئی در هر صورت به طور قطع کمتر از بهره DT هم مول است و بالا بردن بهره نیاز به پارامتر سوخت، H_B ، بزرگتر دارد و خود این موضوع مستلزم فشردگی و چگالش زیاد سوخت DT دارد.

بهره انرژی در همجوشی سوخت DT

حال به تعیین بهره سوخت های با تقارن کروی و جرم m ، که دارای شعاع R هستند و تا چگالی ρ فشرده شده اند، و با یک پالس با انرژی E_{dc} با بازده کوپل شدگی، η_c ، بمباران می شوند، می پردازیم. در این زمان لکه داغ توسط پالس دوم که دارای انرژی E_{dig} و بازده کوپل شدگی η_{ig} می باشد، تولید می شود. که در این صورت انرژی کل ورودی عبارت است از: $E_d = E_{dc} + E_{dig}$. از طرفی انرژی سوخت در همجوشی عبارت است از: $E_F = E_c + E_{ig}$ ، که در آن $E_c = \eta_c E_{dc}$ و $E_{ig} = \eta_{ig} E_{dig}$ می باشند. بهره انرژی همجوشی به صورت $G = E_{fus} / E_d$ تعریف می شود. از طرفی بهره سوخت در همجوشی به صورت نسبت انرژی خروجی همجوشی، E_{fus} ، به انرژی سوخت در همجوشی، E_F ، تعریف می شود که عبارت است از: $G_F = E_{fus} / E_F$ و $G = \eta_c G_F$ با رابطه زیر با یکدیگر در ارتباط هستند:

$$G = \tilde{\eta} G_F = \left(\eta_c \frac{E_{dc}}{E_d} + \eta_{ig} \frac{E_{dig}}{E_d}\right) G_F \quad (6)$$

چنانچه $\eta_c \approx \eta_{ig}$ یا $E_{dc} \ll E_{dig}$ باشد، $G = \eta_c G_F$ می باشد. و در آن صورت برای بهره سوخت داریم:

$$G_F = \frac{Ym\phi}{E_c + E_{ig}}$$

که در آن Y بهره بر همکنش است و مقدار ثابتی است که در ذیل توضیح داده شده

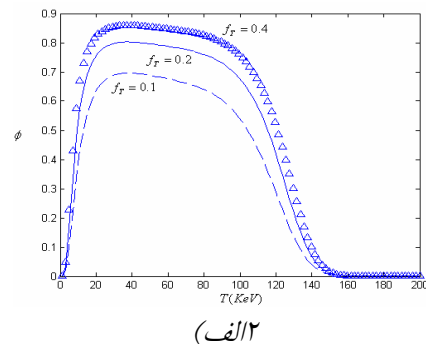
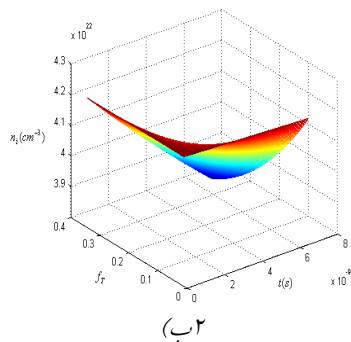
است. انرژی سوخت فشرده شده $E_c = m\varepsilon_c$ می باشد که در آن انرژی ویژه است که از حاصلضرب پارامتر همسانگرد α در انرژی ویژه ماده تبهگن، $\varepsilon_d = C_d \rho^{2/3}$ ، بدست می آید، $\varepsilon_c = \alpha C_d \rho^{2/3}$ و C_d ثابتی است که تنها به نوع مواد بستگی دارد، از این رو انرژی سوخت فشرده شده E_c ، عبارت است از: $E_c = \alpha C_d \rho^{2/3}$ [6,7]. از طرفی برای E_{ig} از مقدار تقریبی آن $E_{igDT} = 140 \rho_{100}^{-1.85} (KJ)$ استفاده می کنی که از روش فیت کردن نمودار با داده های آزمایشگاهی *Roth* و گروهش بدست آمده است [8]. حال با جای‌گذاری تمام فرضیات بیان شده در رابطه اصلی بهره سوخت در همجوشی برای G_F ، خواهی‌م داشت:

$$G_F = \frac{Ym\phi \times 10^3 (MJ)}{m\alpha C_d \rho^{2/3} (MJ) + 0.14 \rho_{100}^{-1.85} (MJ)} \quad (7)$$

که برای سوخت دوتریوم-تریوم $Y = 335 GJ/g$ و $C_d = 0.32 MJ.g^{-1} (g/cm^3)^{-2/3}$ می باشند.

نتایج

شکل (۲) چگونگی تغییرات چگالی یونی را بر حسب تغییرات کسر مصرفی سوخت تریوم با گذشت زمان در دمای ثابت $T_i = 100 KeV$ و چگالی اولیه $n_{i,0} = 4.22 \times 10^{-22} cm^{-3}$ نشان می دهد. همان طور که از نمودار شکل (۲) دیده می شود با افزایش کسر مصرف سوخت تریوم، f_T ، با گذشت زمان چگالی یونی نیز افزایش می یابد. همچنین در شکل (۳) نمودار تغییرات کسر مصرفی سوخت بر حسب تغییرات دما در $\rho R = 0.6 g/cm^2$ ، و جرم یونی ثابت $m_i = 4.1 \times 10^{-24} g$ ، برای کسرهای مختلف مصرفی تریوم، $f_T = 0.1$ ، $f_T = 0.2$ و $f_T = 0.4$ را محاسبه کرده و آورده ایم. همان طور که دیده می شود کسر مصرفی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می یابد که این به دلیل تفاوت در سطح مقطع همجوشی در دماهای مختلف می باشد. همان طور که دیده می شود هرچه بتوانیم کسر مصرفی تریوم را افزایش دهیم کسر سوخت نیز افزایش می یابد. در جدول (۱) برای مقادیر متفاوت کسر مصرفی سوخت تریوم، پارامتر سوخت و کسر مصرفی سوخت را در $\rho R = 0.6 g/cm^2$ و دمای ثابت $T = 100 KeV$ ، برای سوخت DT محاسبه شده و آورده شده است. همان طور که از مقادیر جدول (۱) دیده می شود با افزایش کسر مصرفی سوخت تریوم، پارامتر سوخت کاهش می یابد در حالی که مرتباً کسر سوخت در حال افزایش است. در شکل (۴) برای مقادیر متفاوت f_T ، بهره همجوشی را با فرض $\eta_c = 0.3$ بر حسب تغییرات چگالی رسم کرده و آورده ایم. همان طور که دیده می شود با انتخاب مقادیر بالاتر کسر غلظت سوخت تریوم بهره بالاتری از سیستم بدست می آید.

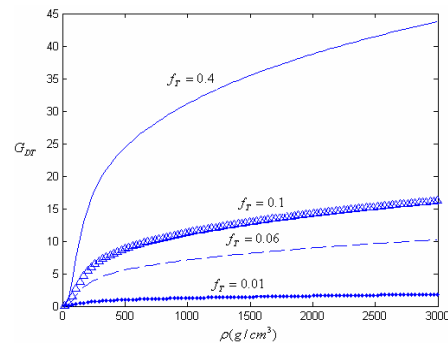


شکل (۲ الف) نمودار تغییرات چگالی یونی بر حسب تغییرات کسر مصرفی سوخت تریتیوم با گذشت زمان در دمای ثابت $T_i = 100 \text{ KeV}$ و چگالی اولیه $n_{i,0} = 4.22 \times 10^{-22} \text{ cm}^{-3}$. شکل (۲-ب) نمودار تغییرات کسر مصرفی سوخت بر حسب تغییرات دما در $\rho R = 0.6 \text{ g/cm}^2$ برای کسرهای مختلف مصرفی $f_T = 0.1$ ، $f_T = 0.2$ و $f_T = 0.4$.

جدول (۱) پارامتر سوخت H_B و کسر مصرفی سوخت ϕ ، برای مقادیر متفاوت کسر مصرفی سوخت تریتیوم، f_T ، در $T_i = 100 \text{ KeV}$ و $\rho R = 0.6 \text{ g/cm}^2$ در همجوشی سوخت DT .

f_T	۰.۱	۰.۲	۰.۳	۰.۴	۰.۵
f_D	۰.۹	۰.۸	۰.۷	۰.۶	۰.۵
H_B	۵۱.۰۷	۲۸.۷۲	۲۱.۸۸	۱۹.۱۵	۱۸.۳۸
ϕ	۰.۰۱۱	۰.۰۲۰	۰.۰۲۶	۰.۰۳۰	۰.۰۳۱

البته لازم به ذکر است که مقادیر بسیار پایین بهره این نکته را تاکید می کند که هنوز این بهره چون کمتر از ۲۰۰ است از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست و برای صنعتی کردن و استفاده در راکتورها هنوز این طرح عملی نیست. از طرفی برای بیشتر روشن شدن این موضوع در جدول (۲) برای دو مقدار متفاوت راندمان هیدرودینامیکی و چگالی سوخت بهره انرژی همجوشی نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود با افزایش چگالی و راندمان هیدرودینامیکی سیستم بهره مرتباً در حال افزایش است، ولی این مقدار افزایش هنوز برای استفاده صنعتی از این طرح در راکتورها کافی نیست و چون بهره انرژی به پارامترهای گوناگونی بستگی دارد یکی از کارهای بعدی ما بایستی یافتن بهینه شرایطی باشد که بهره تا حد امکان افزایش یابد این خود مستلزم تحقیقات گسترده تر پیرامون این پارامترها و دیگر پارامترهای حاکم بر مساله است.



شکل (۴) نمودار تغییرات بهره همجوشی برای مقادیر متفاوت f_T ، بر حسب تغییرات چگالی.

جدول (۲) بهره انرژی همجوشی در ازاء انتخاب دمای $T = 100KeV$ و $\alpha = 1.5$ و $R = 2 \times 10^{-4} cm$

f_T	η_1	$\rho_1 (g/cm^3)$	G_1	$\rho_2 (g/cm^3)$	η_2	G_2
۰.۰۱	۰.۲	۱۰۰۰	۱.۲	۰.۴	۳۰۰۰	۲.۴
۰.۰۶	۰.۲	۱۰۰۰	۶.۸	۰.۴	۳۰۰۰	۱۳.۶
۰.۱	۰.۲	۱۰۰۰	۱۰.۷	۰.۴	۳۰۰۰	۲۱.۶
۰.۲	۰.۲	۱۰۰۰	۱۸.۹	۰.۴	۳۰۰۰	۳۷.۲۹
۰.۳	۰.۲	۱۰۰۰	۲۴.۶	۰.۴	۳۰۰۰	۴۳.۹

بحث و نتیجه گیری

با استفاده از محاسبات در دو بعد ما بهره و کارایی سوخت های دوتریوم تریتیوم جزئی در احتراق گره های سریع را مورد بحث و بررسی قرار دادیم. و وابستگی بهره انرژی سوخت به انرژی ورودی و جرم و چگالی و میزان تریتیوم را مطالعه کردیم. و منحنی های بهره محدود برای مقادیر ثابت پارامترهای همسانگرد با تغییر میزان تریتیوم را رسم کردیم. این محاسبات قطعاً فرض امکان استفاده از احتراق گره های سریع و به خصوص امکان وجود یک تحریک کننده مناسب را مشخص می نمود و به خوبی جفت شدگی کافی پالس در ماده فشرده شده را توصیف کرد هر چه غلظت تریتیوم کمتر باشد از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است البته در این خلال این میزان نباید به قدری این غلظت کم باشد که بهره مطلوب برای همجوشی را تحت تاثیر خود قرار دهد.



مراجع

- [1] J.M. DAWSON, Fusion, Vol. 1, Part B (TELLER, E., Ed.), Academic Press, New York 453 (1981).
- [2]" Shock Convergence and Mix Dynamics in Inertial Confinement Fusion"byJames Ryan Rygg, M.S., Electrical Engineering, Stanford University (2001).
- [3] G. H. Miller, E. I. Moses, and C. R. Wuest, Nucl. Fusion 44, S228 (2004).
- [4] S.N. HOSSEINI MOTLAGH · Sh.S.MOHAMADY, Nuclear Science and Techniques, Vol.18, No.3 494–683 (2007).
- [5] K.Krushelnick, E.L.Clark,M.Zepf,et al., Phys.Plasma 7. 2055(1999).
- [6] S.Eliezer, J.M.Martinez-Val, Laser Particle Beams 16581(2001).
- [7] B. Grant Logan, Roger O. Bangerter, Debra A. Callahan, Max Tabak, Markus Roth, L. John Perkins, George Caporaso, "Assessment of Potential for Ion Driven Fast Ignition", UCRL-JRNL-208443 LBNL January18,(2005).
- [8] M. Roth, et al., Phys. Rev. Lett. 86, 436 (2001).