



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## بررسی اشتعال و تکثیر سوختگی در یک قرص پیش متراکم ICF حاوی سوخت دوتریوم

کوه‌رخ، طه<sup>۱\*</sup>؛ آزاديفر، ربابه<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان،

<sup>۲</sup>دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرگان، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، گرگان، ایران

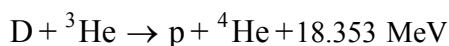
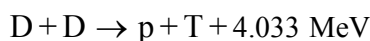
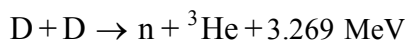
چکیده:

شرط اشتعال به عنوان معیاری که توانایی اشتعال یک قرص سوخت همجوشی توسط محصورسازی اینرسی را نشان می‌دهد، از طریق تحولات دینامیکی یک قرص سوخت پیش متراکم دوتریومی مورد بررسی قرار گرفته است. تکثیر سوختگی مرحله‌ای بعد از اشتعال است که در آن سوخت با رسیدن به دماهای بالاتر می‌تواند به بهره‌های انرژی بالاتر دست پیدا کند. نتایج نشان می‌دهند که یک قرص سوخت ICF حاوی دوتریوم خالص به دلیل زایش همزمان تریتیوم و هلیوم-۳ در یک مدت زمان کوتاه ( $t \approx 1.5 \text{ ps}$ )، زیر دمای اشتعال پیش‌بینی شده نیز می‌تواند به شرایط اشتعال دست پیدا کند.

**کلمه کلیدی:** شرط اشتعال، تکثیر سوختگی، محصورسازی اینرسی، دوتریوم

### ۱- مقدمه

در نیروگاه‌های همجوشی هسته‌ای از سوخت دوتریوم-تریتیوم به‌علت دارا بودن بیشترین آهنگ واکنش همجوشی، به‌عنوان سوخت اصلی استفاده می‌شود. با این وجود استفاده از این واکنش مشکلاتی از قبیل تولید مصنوعی تریتیوم و همچنین تولید نوترون‌های پُرانرژی (14.1 MeV) را به همراه دارد. از طرف دیگر استفاده از سوخت دوتریوم خالص این مشکلات را مرتفع می‌کند اما یکی از مشکلات استفاده از آن دمای اشتعال ( $T_{ig} > 35 \text{ keV}$ ) بالاست [۱]. محاسبات نشان می‌دهند که افزودن همزمان مقدار اندکی تریتیوم و هلیوم-۳ به دوتریوم در یک قرص سوخت همجوشی توسط محصورسازی اینرسی<sup>۱</sup> ICF باعث می‌شود که دمای اشتعال کاهش و بهره آن افزایش یابد [۲]. واکنش‌های همجوشی اصلی عبارتند از:



(۱)

<sup>۱</sup> Inertial Confinement Fusion



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

ملاحظه می شود که واکنش همجوشی دوتریوم-دوتریوم سبب تولید تریتیوم و هلیوم-۳ می شود، از این رو سوخت دوتریوم یک سوخت زاینده به شمار می آید. محاسبات دینامیکی نشان می دهند که قرص سوخت دوتریوم که در ابتدا توانایی اشتعال را ندارد، بعد از گذشت زمانی اندک به دلیل زایش داخلی یون های تریتیوم و هلیوم-۳ می تواند به شرایط اشتعال دست پیدا کرده و سپس بسوزد.

### ۲- معادلات حاکم بر تحولات زمانی قرص سوخت

یک قرص سوخت ICF را در نظر می گیریم که تمام مراحل فشرده سازی و آماده سازی جهت اشتعال را پشت سر گذاشته شده و آماده اشتعال و سوختن است. فرض می شود در این زمان چگالی قلب قرص (لکه داغ) بطور یکنواخت به چگالی  $\rho_0 = 5000 \text{ gcm}^{-3}$  رسیده و دمای اولیه  $T_0$  و چگالی سطحی اولیه آن  $\rho_0 R_0$  است (شکل (۱)). در این مرحله واکنش های همجوشی شکل می گیرند و دمای قرص را افزایش می دهند. معادلات حاکم بر آهنگ تغییرات تعداد ذرات عبارتند از [۳]:

$$\frac{dn_k}{dt} = \sum_j a_k^j n_{j(1)} n_{j(2)} \langle \sigma v \rangle_j \quad (2)$$

که در آن  $n_k$  بیانگر چگالی تعداد یون  $k$ ،  $\langle \sigma v \rangle_j$  واکنش پذیری متوسط ماکسولینی واکنش  $j$  ام و  $a_k^j$  تعداد ذرات نوع  $k$  ام است که در واکنش  $j$  ام تولید یا از بین رفته اند. شش نوع یون استفاده شده در این محاسبه عبارتند از:  $^3\text{He}$ ،  $^4\text{He}$ ،  $p$ ،  $T$ ،  $D$  و  $n$ . در این مقاله از رابطه های دقیق جهت تعیین  $\langle \sigma v \rangle_j$  در دماهای مختلف استفاده شده است [۴]. معادله موازنه ی توان برای یون ها عبارت است از:

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{3}{2} \frac{d}{dt} (n_i T_i) = \sum_j \sum_k (1 - \eta_k^j) f_k^j P_{fk}^j - P_{ie} - P_{mi} \quad (3)$$

معادله موازنه ی توان برای الکترون ها عبارت است از:

$$\frac{dE_e}{dt} = \frac{3}{2} \frac{d}{dt} (n_e T_e) = \sum_j \sum_k (1 - \eta_k^j) (1 - f_k^j) P_{fk}^j + P_{ie} - P_B - P_C - P_e - P_{me} \quad (4)$$

که در آن  $T_i$  دمای یون ها،  $T_e$  دمای الکترون ها و  $f_k^j$  کسری از انرژی محصول  $k$  ام و تولید شده از واکنش  $j$  ام است که به یون های پلاسمای در حال واکنش تزریق می شود و  $\eta_k^j$  احتمال نشت انرژی محصول  $k$  حاصل از واکنش  $j$  است.  $P_{fk}^j$  توان تولید شده توسط واکنش همجوشی  $j$  ام است که توسط یون  $k$  ام حمل می شود،  $P_B$  توان اتلافی ناشی از تابش ترمزی و  $P_C$  توان اتلافی ناشی از پراکندگی کامپتون معکوس و  $P_e$  توان اتلافی ناشی از رسانش حرارتی است.  $P_{me}$  و  $P_{mi}$  به ترتیب توان های اتلافی ناشی از انبساط مکانیکی یون ها و الکترون ها است.



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

در این مدل از آنجایی که برای یون‌ها و الکترون‌ها دو دمای متفاوت در نظر گرفته شده است، بین یون‌ها و الکترون‌ها یک تبادل انرژی وجود دارد.  $P_{ie}$  بیانگر توان مربوط به تبادل انرژی بین یون‌ها و الکترون‌ها است.

### ۳- شرط اشتعال

اشتعال در یک قرص سوخت هنگامی صورت می‌گیرد که توان حاصل از همجوشی بر توان‌های اتلافی در لکه داغ غلبه کرده و سبب افزایش دمای آن شود:

$$\frac{dE}{dt} = P_f - P_B - P_C - P_e - P_m > 0 \quad (5)$$

از آنجایی که در لحظه اشتعال، سوخت در حالت سکون قرار می‌گیرد، توان اتلافی مربوط به کار مکانیکی در آن لحظه صفر می‌شود  $P_m = 0$  [۱]. حل استاتیکی این رابطه، نموداری را در صفحه  $\rho R - T$  نتیجه می‌دهد که به شرط اشتعال معروف است (شکل (۲)). در واقع با استفاده از این نمودار مشخص می‌شود که شرایط اولیه قرص از نظر چگالی  $\rho$ ، دما  $T$  و شعاع  $R$  چقدر باید باشد تا قرص سوخت بتواند مشتعل شود.

یک قرص سوخت را با ترکیب  $DT_x^3He_y$  در نظر می‌گیریم که در آن  $x$  نسبت تریتیوم به دوتریوم و  $y$  نسبت هلیوم-۳ به دوتریوم است. شکل (۲) حل معادله (۵) را به ازای  $x=0$  و  $y=0$  (دوتریوم خالص) نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که یک قرص سوخت حاوی دوتریوم خالص با شرایط اولیه  $T_0 = 29 \text{ keV}$  و  $\rho_0 R_0 = 15 \text{ g cm}^{-2}$  نمی‌تواند مشتعل شود. اکنون این موضوع را با حل همزمان معادلات (۲)، (۳) و (۴) به‌طور دینامیکی بررسی می‌کنیم.

قرص سوخت را با ترکیب اولیه  $DT_{x=0}^3He_{y=0}$  (دوتریوم خالص) و با شرایط اولیه چگالی  $\rho_0 = 5000 \text{ g cm}^{-3}$ ، دما  $T_0 = 29 \text{ keV}$  و چگالی سطحی  $\rho_0 R_0 = 15 \text{ g cm}^{-2}$  در نظر می‌گیریم و معادلات (۲)، (۳) و (۴) را به‌طور عددی حل می‌کنیم. همانطور که از شکل (۳) ملاحظه می‌شود، در ابتدا این قرص سوخت نمی‌تواند مشتعل شود (موافق با پیش‌بینی شکل (۲)) و دمای آن شروع به کم‌شدن می‌کند، اما بعد از گذشت زمانی اندک  $t \approx 1.5 \text{ ps}$ ، توانایی اشتعال را بدست آورده و می‌سوزد. اکنون باید ببینیم که بعد از گذشت این زمان چه اتفاقی برای این قرص سوخت می‌افتد که می‌تواند توانایی اشتعال را بدست آورد. برای این منظور تحول زمانی دمای یون در این قرص سوخت در بازه زمانی  $0 \leq t \leq 3.75 \text{ ps}$  رسم شده است (شکل (۳)). این شکل نشان می‌دهد که اشتعال این قرص سوخت در زمان  $t = 1.5 \text{ ps}$  رخ می‌دهد. در این زمان دمای یون به حدود  $T_i = 25.35 \text{ keV}$  می‌رسد و همچنین چگالی و تعداد یون‌ها نیز تغییر می‌کنند. به‌طور خلاصه، نتیجه محاسبات نشان می‌دهند که در زمان  $t = 1.5 \text{ ps}$  مشخصات قرص سوخت تبدیل می‌شود به:



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

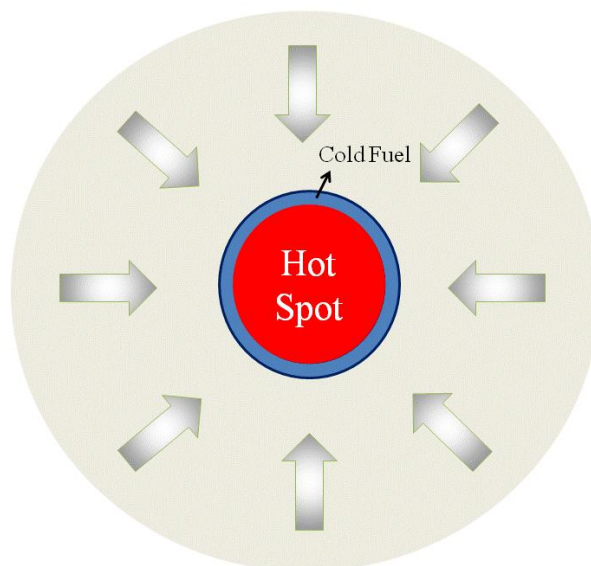
۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$t = 0 \text{ ps} \Rightarrow \begin{cases} T_i = 29 \text{ keV} \\ \rho R = 15 \text{ g cm}^{-2} \\ \rho = 5000 \text{ g cm}^{-3} \\ x = 0, y = 0 \end{cases}, \begin{cases} N_D = 1.656 \times 10^{20} \\ N_T = 0 \\ N_{^3\text{He}} = 0 \end{cases} \Rightarrow DT_{x=0} ^3\text{He}_{y=0} \quad (6)$$

⇓

$$t = 1.5 \text{ ps} \Rightarrow \begin{cases} T_i = 25.35 \text{ keV} \\ \rho R = 14.9 \text{ g cm}^{-2} \\ \rho = 4984 \text{ g cm}^{-3} \\ x = 0.0025, y = 0.0045 \end{cases}, \begin{cases} N_D = 1.65 \times 10^{20} \\ N_T = 4.14 \times 10^{17} \\ N_{^3\text{He}} = 7.50 \times 10^{17} \end{cases} \Rightarrow DT_{x=0.0025} ^3\text{He}_{y=0.0045}$$

یعنی قرص سوخت با ترکیب اولیه  $DT_{x=0} ^3\text{He}_{y=0}$  و با شرایط اولیه  $\rho_0 R_0 = 15 \text{ g cm}^{-2}$ ،  $\rho_0 = 5000 \text{ g cm}^{-3}$  و  $T_0 = 29 \text{ keV}$ ، بعد از گذشت زمان  $t = 1.5 \text{ ps}$  به قرص سوخت با ترکیب  $DT_{x=0.0025} ^3\text{He}_{y=0.0045}$  و با شرایط  $T_i = 25.35 \text{ keV}$  و  $\rho R = 14.9 \text{ g cm}^{-2}$ ،  $\rho = 4984 \text{ g cm}^{-3}$  تبدیل می‌شود. اکنون تحقیق می‌کنیم که آیا این قرص سوخت با این ترکیب و با این شرایط (که اکنون به عنوان شرایط اولیه در نظر می‌گیریم) قابلیت اشتعال را دارد، یا نه. رابطه (۵) را برای این قرص سوخت نیز به کار می‌بریم. شکل (۴) شرایط اشتعال را برای این قرص سوخت نشان می‌دهد، و بر صحت این مطلب تأکید می‌کند که این قرص با ترکیب  $DT_{x=0.0025} ^3\text{He}_{y=0.0045}$  و با شرایط  $\rho_0 R_0 = 14.9 \text{ g cm}^{-2}$ ،  $\rho_0 = 4984 \text{ g cm}^{-3}$  و  $T_0 = 25.35 \text{ keV}$  اکنون توانایی اشتعال را دارد.



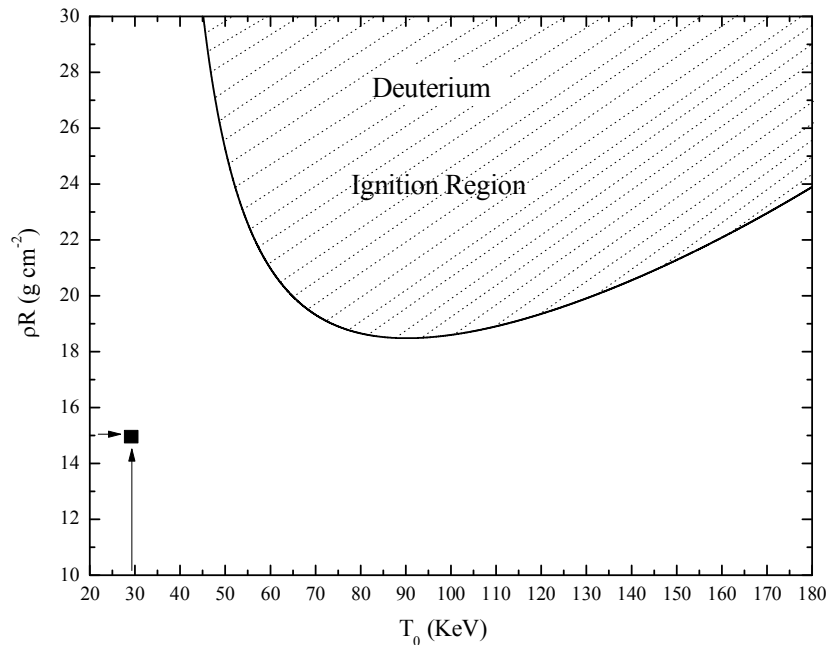
شکل (۱): سوخت پیش‌متراکم ICF که در مرکز آن یک لکه داغ تشکیل شده است.



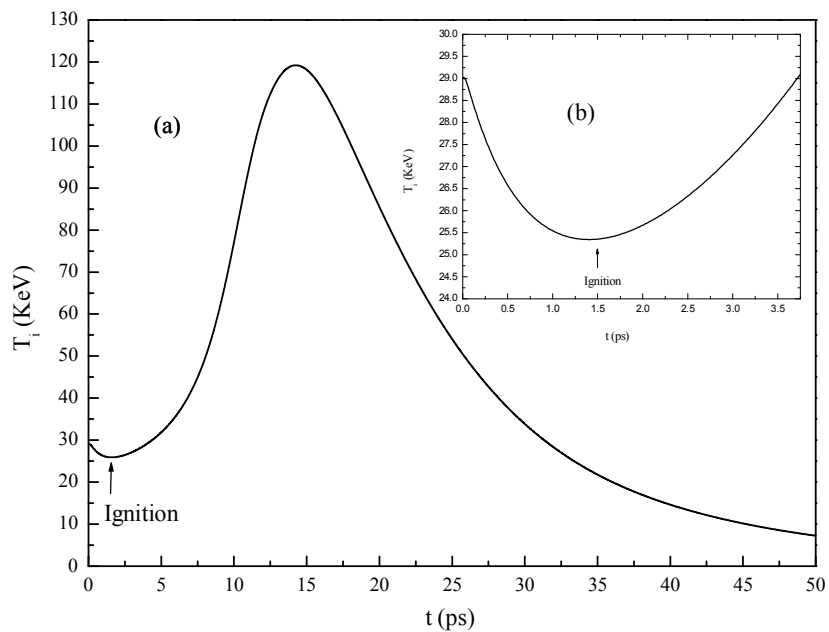
# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

از آنجایی که اشتعال در مرکز سوخت انجام می‌شود به این طرح، اشتعال مرکزی می‌گویند.



شکل (۲): نمودار شرط اشتعال (حل معادله (۵)) برای قرص سوخت  $DT_{x=0} {}^3He_{y=0}$  به ازای شرایط اولیه  $\rho_0 = 5000 \text{ gcm}^{-3}$ ،  $T_0 = 29 \text{ keV}$  و  $\rho_0 R_0 = 15 \text{ g cm}^{-2}$ .

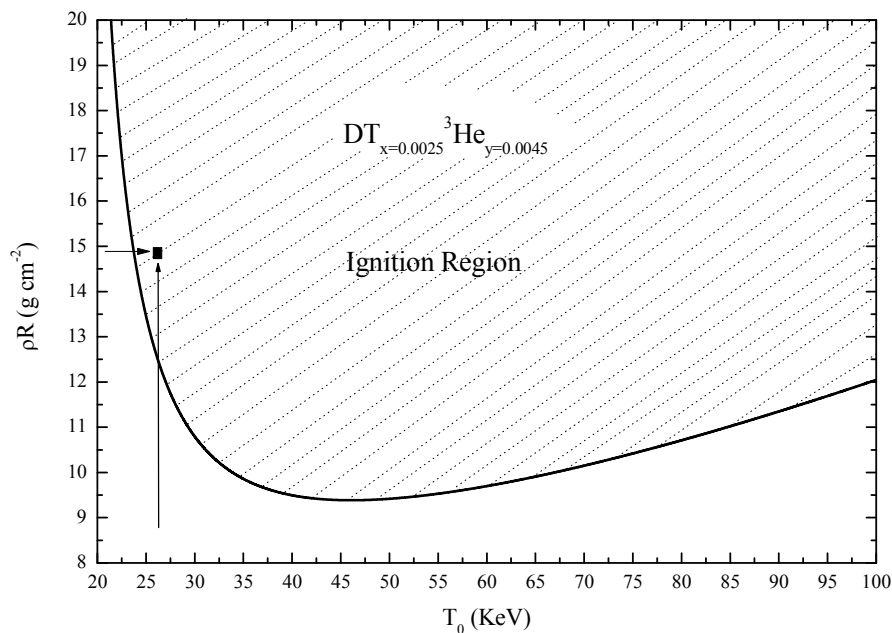


شکل (۳): تغییرات دمای یون برحسب زمان در قرص سوخت  $DT_{x=0} {}^3He_{y=0}$  به ازای شرایط اولیه  $\rho_0 = 5000 \text{ gcm}^{-3}$ ،  $T_0 = 29 \text{ keV}$  و  $\rho_0 R_0 = 15 \text{ g cm}^{-2}$  در بازه زمانی  $0 \leq t \leq 50 \text{ ps}$  (a) و  $0 \leq t \leq 3.75 \text{ ps}$  (b).



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل (۴): نمودار شرط اشتعال در قرص سوخت با ترکیب  $DT_{x=0.0025}^3He_{y=0.0045}$ . ملاحظه می شود که قرص سوخت با این ترکیب و با شرایط اولیه  $\rho_0 R_0 = 14.9 \text{ g cm}^{-2}$ ،  $\rho_0 = 4984 \text{ g cm}^{-3}$  و  $T_0 = 25.35 \text{ keV}$  در ناحیه اشتعال قرار می گیرد و بنابراین می تواند مشتعل شده و بسوزد.

## ۴- نتیجه گیری

شرط اشتعال یک قرص سوخت ICF با استفاده از معادلات دینامیکی مربوط به توازن توان مورد بازبینی قرار گرفته است. ملاحظه می شود که قرص سوخت دوتریوم که در ابتدا توانایی اشتعال را ندارد، بعد از گذشت زمانی اندک به دلیل زایش داخلی یون های تریتیوم و هلیوم-۳ می تواند به شرایط اشتعال دست پیدا کند و در نهایت می سوزد. با توجه به اینکه آهنگ همجوشی واکنش های دوتریوم-تریتیوم و دوتریوم-هلیوم-۳ تقریباً به اندازه دومرتبه بزرگی از آهنگ همجوشی واکنش دوتریوم-دوتریوم بزرگ تر است، این امر محقق می شود. بنابراین شرط اشتعال یک قرص سوخت ICF شرطی است که باید با استفاده از ملاحظات دینامیکی مورد بررسی قرار گیرد.

## مرجع ها

- [1] S. Atzeni and J. Meyer-Ter-Zehn "The Physics of Inertial Fusion" (Oxford: Clarendon, 2004).
- [2] M. Mahdavi and T. Koohrokhi, *Pramana- journal of Physics*, 74, 377-390, 2010.



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- [3] S. Eliezer, Z. Henis, J. M. Martinez-Val and M. Piera, Phys. Lett. A 243311, 1998.
- [4] H. S. Bosch and G. M. Hale, *Nucl. Fusion* 32, 611, 1992.