



## مقایسه عددی و تحلیلی بین روش های همجوشی محصورشدگی لختی و محصورشدگی لختی - تنگش کروی

### چکیده:

در این مقاله، با بیان قوانین مقیاس بندی در ایده همجوشی محصورشدگی لختی- تنگش کروی، دو معیار دما و چگالی برای شرایط آستانه همجوشی مخلوط دوتریوم- تریتیوم در این ایده را ارائه نمودیم. هم چنین با مقایسه عددی و تحلیلی بین دو ایده همجوشی لختی و همجوشی لختی- تنگش کروی بر اساس چگالی، فشار، دما، زمان محصورشدگی و تعداد کل نوترونهای گسیلی و شار نوترونی ایجاد شده از واکنش مخلوط دوتریوم- تریتیوم، برتری و مزایای ایده همجوشی محصورشدگی لختی- تنگش کروی نسبت به ایده کلاسیکی همجوشی محصورشدگی لختی را نشان داده ایم.

### واژه های کلیدی :

همجوشی محصورشدگی لختی، تنگش کروی، امواج ضربه ای، قوانین مقیاس بندی تنگش کروی.

### مقدمه:

ایده همجوشی محصورشدگی لختی- تنگش کروی، ترکیبی از دو روش همجوشی محصورشدگی مغناطیسی و همجوشی محصورشدگی لختی (اینرسی) می باشد و در واقع ایده ای برای بهبود مدل همجوشی محصورشدگی لختی است. در این ایده، ابتدا پلاسمای سوخت داغ از طریق روش همجوشی محصورشدگی مغناطیسی، در مرکز یک کره تولید می شود و سپس این پلازما توسط امواج ضربه ای ایجاد شده توسط یک باریکه لیزری یا باریکه یونی، اعمال شده بر روی محفظه کروی سوخت همانند روش همجوشی محصورشدگی لختی فشرده می شود. پلاسمای مرکزی سوخت در فرآیند تنگش کروی، نقش مشابه پلاسمای فشرده شده با باریکه لیزری یا باریکه ذره ای در روش همجوشی محصورشدگی لختی را دارد. با این تفاوت که در این ایده، پلاسمای فشرده شده از ابتدا درون ساچمه سوخت وجود دارد و ناشی از تابش باریکه لیزری یا ذره ای اعمال شده به ساچمه بوجود نیامده است.

روش کار:

### ۱- اصول فیزیکی محصورشدگی لختی - تنگش کروی

در ایده تنگش کروی، ابتدا پلاسمای داغ سوخت قرار گرفته در یک محفظه کروی، توسط تابش و برخورد امواج ضربه‌ای پرتاب شده به سطح آن فشرده می‌شود. سپس پلاسمای مرکزی توسط میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود و با توجه به اینکه فشار اعمال شده ناشی از میدان مغناطیسی بر پلاسمای عمود بر این میدان است، می‌توان از میدان مغناطیسی جهت محصورسازی پلاسمای استفاده کرد [۱]. وقتی یک جریان الکتریکی در امتداد محور پلاسمای استوانه‌ای وجود داشته باشد، میدان مغناطیسی در جهت سمتی القا خواهد شد. این میدان می‌تواند بر پلاسمای فشار وارد کند و دما و چگالی آن را افزایش دهد که این پدیده، اثر تنگشی نامیده می‌شود. اگر ستون پلاسمای به شکل استوانه قائمی باشد، در قاعده با دیواره‌ها در تماس است. در پلاسمای چنبره‌ای، الف- میدان مغناطیسی سمتی ایجاد شده توسط جریان محوری باعث تنگش پلاسمای می‌شود (تنگش Z) [۲] و ب- میدان مغناطیسی محوری، در اثر جریان سمتی پلاسمای فشرده خواهد کرد. (تنگش تتا).

پلاسمای مرکزی سوخت در فرآیند تنگش کروی، نقش مشابه پلاسمای فشرده شده با باریکه لیزری یا باریکه ذره‌ای در روش ICF را دارد. با این تفاوت که در این ایده، پلاسمای فشرده شده از ابتدا درون ساچمه سوخت وجود دارد و در نتیجه تابش باریکه لیزری یا ذره‌ای اعمال شده به ساچمه بوجود نیامده است [۳].

### ۲- قوانین مقیاس بندی برای همجوشی محصورشدگی اینرسی

قوانین تحلیلی که در دستیابی به همجوشی کنترل شده اینرسی می‌توانند به صورت کاربردی مورد استفاده قرار گیرند، تحت عنوان قوانین مقیاس بندی نامیده می‌شوند که این قوانین برای انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه بکار می‌رود. همانطور که قبلاً اشاره نمودیم، طرح اصلی و اساسی در همجوشی محصورشدگی اینرسی، پرتاب امواج ضربه‌ای بسیار پر شدت و پر توان در پیرامون یک محفظه کروی در زمانی تحت عنوان زمان محصورشدگی،  $t_c$  است. این زمان متناسب با زمانی است که کسری از امواج ضربه‌ای به پلاسمای داغ محفظه کروی با شعاع R می‌رسند. رابطه مورد استفاده برای زمان محصورشدگی اینرسی در چنین محفظه‌ای عبارتست

$$t_c = \frac{R}{4C_s} \quad \text{از:}$$

که  $C_s$  معادل سرعت امواج صوتی منتشر شده در طول محفظه کروی سوخت در دمای T است.  $(C_s \approx (KT/m)^{1/2})$

با توجه به معیار لائوسون برای شرایط آستانه همجوشی نیز داریم:  $nt_c \geq 10^{14} \text{ sec/cm}^3$

که چگالی حجمی ذرات موجود در محفظه کروی سوخت است و در نتیجه خواهیم داشت:  $\rho R \geq 3 \text{ g/cm}^2$

که  $\rho$  چگالی جرمی نهایی سوخت و  $R$  شعاع پلاسمای سوختی است که بقدر کافی داغ شده تا بتواند تعداد قابل توجهی واکنش همجوشی را انجام دهد.

### ۳- قوانین مقیاس بندی در ایده تنگش کروی

ایده جالبی برای بهبود بهره انرژی روش همجوشی ICF از طریق برخورد امواج ضربه ای کروی به مخلوط سوخت و فشردگی پلاسمای داغ آن در مرکز کره پیشنهاد شده که به این ایده، مدل تنگش کروی اطلاق شده است. [۵۴]

شرایط آستانه همجوشی برای مخلوط دوتریوم - تریتیوم در مدل تنگش کروی عبارتست از:

$$1- \text{ معیار دما: } T \geq 2.58 \text{ KeV } (nt_c \rightarrow \infty)$$

$$2- \text{ معیاری برای چگالی و زمان محصورشدگی: } nt_c \geq 10^{14} \text{ sec/cm}^3$$

### ۴- پارامترهای فیزیکی سیستم همجوشی محصورشدگی لختی - تنگش کروی

در صورتیکه  $P_i$  (فشار اولیه امواج ضربه ای پرتاب شده) و  $P_s$  (فشار اولیه پلاسمای پیرامون) بزرگتر از  $P_c$  (فشار پلاسمای مرکزی) باشد، پلاسمای مرکزی سوخت می تواند تا چگالی نهایی  $\rho_F$  فشرده شود [۵]:

$$\rho_F = \rho_c \left(\frac{P_s}{P_c}\right)^{3/2}$$

در این صورت دمای نهایی پلاسمای سوخت بعد از فشردگی عبارت خواهد بود با:

$$kT_F = 2m_H \left(\frac{P_s}{\rho_F}\right) = 2.09 \times 10^{14} \left(\frac{P_s}{\rho_F}\right)$$

که در این رابطه  $P_s$  بر حسب نیوتن بر متر مربع و  $\rho_F$  بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. بدین

$$VO_F = VO_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_F}\right) \quad \text{ترتیب حجم پلاسمای بعد از فشردگی عبارتست از:}$$

که بدینوسیله می توانیم مقدار میانگین چگالی، دما و حجم بین مقادیر اولیه و نهایی قبل و بعد از فشردگی را بدست آوریم. هم چنین با محاسبه تعداد انرژی کل واکنش همجوشی ایجاد شده در پلاسمای مرکزی سوخت،

$$E_R = P_R t_c = \frac{1}{4} (n_c)_{av}^2 \langle \sigma V \rangle_{av} QVO_{av} t_c = \frac{1}{4} \left(\frac{\rho_{av}}{m_H}\right)^{1/2} \langle \sigma V \rangle_{av} QVO_{av} t_c$$

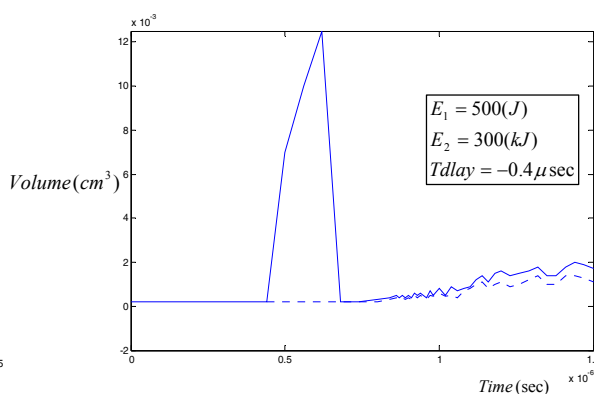
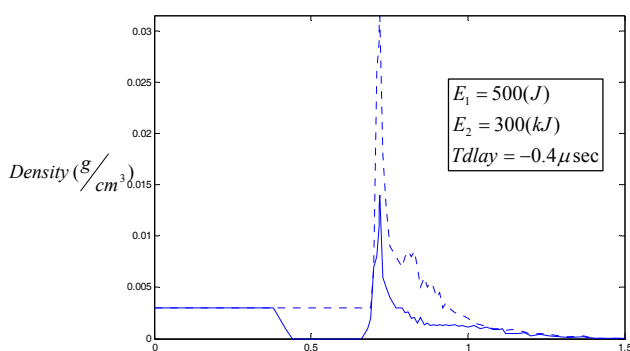
که در رابطه فوق،  $P_R$  چگالی توان واکنش همجوشی،  $(n_c)_{av}$  مقدار میانگین چگالی ذرات،  $\langle \sigma V \rangle_{av}$  سطح مقطع میانگین ماکسولی و  $Q$  مقدار انرژی حاصل از هر واکنش همجوشی می باشد. در نهایت، تعداد نوترونهای

$$N = \frac{E_R}{2.26 \times 10^{-2}} \quad \text{گسیلی از پلاسمای واکنش دوتریوم - تریتیوم عبارت خواهد بود با:}$$

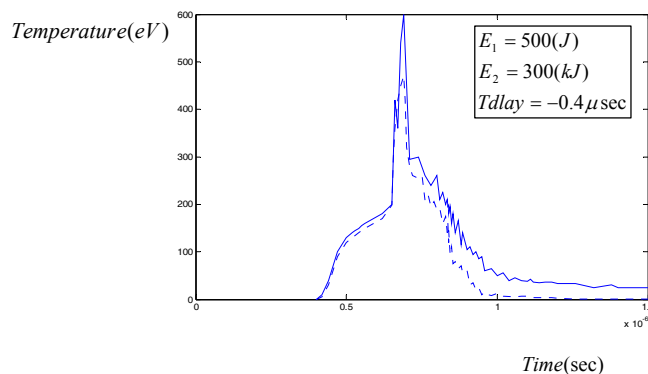
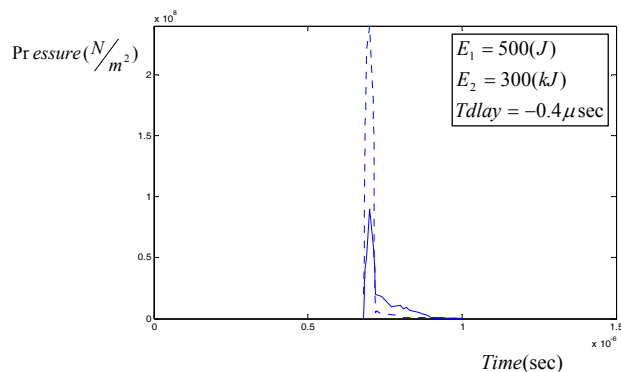
### ۵- نتایج محاسبات عددی انجام شده در ایده های ICF و ICF-SP

در این مقاله، محاسبات عددی خود را برای ساچمه سوخت کروی شامل دوتریوم - تریتیوم با شعاع 2.5 cm در چگالی اولیه  $3 \times 10^{-3} \frac{g}{cm^3}$  انجام داده ایم. در هر دو ایده ICF و SP، 300 kJ ( $E_2 = 3 \times 10^5 kJ$ ) انرژی در پیرامون محفظه کروی در مدت زمان 0.5  $\mu sec$  به نهشت گذاشته می شود که زمان نهشت انرژی بصورت مجذور سینوسی تغییر می کند. با توجه به این موضوع، در ایده ICF، نهشت انرژی در مرکز ساچمه سوخت صفر است ( $E_1 = 0$ ). در حالیکه در ایده SP،  $E_1 = 500 J$  انرژی در پلاسمای مرکزی در مدت زمان 0.5  $\mu sec$  به نهشت گذاشته می شود که مشابه حالت قبلی، بصورت سینوسی تغییر می کند. محاسبات عددی را برای هنگامی انجام می دهیم که دو موج ضربه ای در هنگامیکه پلاسمای مرکزی سوخت به بیشینه دما برسد، برخورد کنند و به همین دلیل محاسبات در مقادیر متفاوت پارامتری تحت عنوان زمان Tdlay انجام شده است. این پارامتر، بیان کننده تفاوت زمانی بین انرژی به نهشت گذاشته شده در مرکز ساچمه سوخت و پیرامون محفظه کروی سوخت در ایده تنگش کروی را بیان می کند. اگر پارامتر Tdlay، صفر باشد بدین معنی است که انرژیهای مرکز و پیرامون محفظه کروی سوخت به طور مشابه به نهشت گذاشته شده است. بهمین ترتیب اگر در طراحی انجام شده، پارامتر Tdlay، مثبت باشد بدین معنی است که ابتدا انرژی در مرکز محفظه کروی و سپس در پیرامون محفظه کروی به نهشت گذاشته شده است و اگر ترم Tdlay منفی باشد، بدین معنی است که ابتدا انرژی در پیرامون محفظه کروی و سپس در مرکز محفظه کروی سوخت به نهشت گذاشته شده است.

در شکل های (۱) تا (۴) نمودارهای پارامترهای فیزیکی ایده ICF-SP محاسبه شده در این کار تحقیقاتی را ارائه نموده ایم.



شکل (۲): نمودار تغییرات حجم پلاسمای مرکزی سوخت بر حسب زمان  
 شکل (۱): نمودار تغییرات چگالی سوخت بر حسب زمان  
 در شرایط فیزیکی  $r = 2.5\text{cm}$  و  $r_c = 0.034\text{cm}$  (خط چین: ICF، خط راست: ICF-SP)



شکل (۳): نمودار تغییرات فشار پلاسمای مرکزی سوخت بر حسب زمان

شکل (۴): نمودار تغییرات دمای پلاسمای مرکزی سوخت بر حسب زمان

در شرایط فیزیکی  $r = 2.5\text{cm}$  و  $r_c = 0.034\text{cm}$  (خط چین: ICF، خط راست: ICF-SP)

## ۶- بحث و نتیجه گیری:

از شکل (۱) شکل مشخص است بیشینه چگالی برای ساچمه سوخت در ایده ICF-SP، در ناحیه مرکزی رخ نمی دهد زیرا میزان تخلیه انرژی در مرکز کمتر از چگالی ناحیه مرکزی می باشد. این موضوع بخوبی بیان کننده این مطلب است که چگالی پلاسمای مرکزی در ایده ICF بیشتر از این مقدار در ایده ICF-SP می باشد.

از شکل (۲) می توانیم نتیجه بگیریم که در ایده ICF-SP حجم پلاسمای مرکزی به دلیل تخلیه انرژی در مرکز محفظه کروی سوخت، افزایش و در ایده ICF، حجم پلاسمای مرکزی به دلیل فشردگی از طریق امواج ضربه ای پیرامون، کاهش می یابد.

همانطوریکه از شکل (۳) مشخص است به دلیل تخلیه انرژی در مرکز ساچمه سوخت، فشار پلاسمای مرکزی در ایده ICF-SP کمتر از این فشار در ایده ICF می باشد.

هم چنین از شکل (۴) می توان نتیجه گرفت که تغییر و تبدیل تخلیه انرژی مرکزی سوخت، موجب طولانی شدن زمان نگهداری دما و در نتیجه به مراتب بزرگ شدن آن می گردد که این موضوع، نکته ای بسیار اساسی در ایده تنگش کروی می باشد.



دانشگاه اصفهان



## مراجع

1. H. R. Strauss, D.W. Longcope, "An Adaptive Finite Element Method for Magneto- Hydrodynamics," *J. Comput. Phys.* 147, 318 (1998).
2. R. J. Leper et al., *IAEA-CN-69/OV3/4 Report* (1998).
3. J. G. Cordey, R. J. Goldston, and R. R. Parker , "Progress Toward a Tokamak Fusion Reactor", *Phys. Today*, January (1992).
4. D.P. Singh et al., "Interaction of Imploding Shock Waves with Expanding Central Plasma In Spherical Pinch Experiments: Simulation Analysis", *J. Fusion Energy*, Vol.9, No. 4 (1990).
5. E. Panarella, P. Savic, "Scaling laws for Spherical Pinch experiments", *J. Fusion Energy* 3, 199 (1983).