

شبیه‌سازی پارامترهای هیدرودینامیکی هدف همجوشی یون سنگین

لیلا غلامزاده^{1*}، سمیه باغستانی²، مهدی شریفیان²

¹بخش هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

²بخش اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

دریافت: 1396/06/09 ویرایش نهائی: 1397/11/29 پذیرش: 1397/12/25

چکیده

همجوشی یون سنگین، یکی از راه‌های تولید انرژی هسته‌ای است. در این روش، هدف به‌وسیلهٔ باریکه‌های یون سنگین به‌طور مستقیم متراکم می‌گردد. باریکه‌های یونی به‌دلیل دارا بودن بازده، آهنگ تکرار و قابلیت کارایی بالا از مزایای بیشتری نسبت به لیزرها برخوردار هستند. طراحی شکل پالس و لایه‌های هدف از پارامترهای مهم در محاسبه مقدار بهره هستند. در این مقاله، پارامترهای هیدرودینامیکی هدفی که با باریکه یون بیسموت با انرژی 10 GeV و طول پالس 21 ns راه اندازی شده با روش تفاضل محدود در حوزه زمان شبیه‌سازی شده است. بهره محاسبه شده برای یک هدف دلخواه 222 به‌دست آمده است. نتایج مقادیر شبیه‌سازی با نتایج کدهای DEIRA و MEDUSA مقایسه شده است.

کلیدواژگان: همجوشی یون سنگین، شکل پالس، بهره، روش تفاضل محدود در حوزه زمان

مقدمه

در فرآیند همجوشی برای دست‌یابی به دما، فشار و چگالی بالا، هدف مورد نظر باید به‌اندازه کافی متراکم شود. متراکم‌سازی در همجوشی محصورشدگی لختی به‌دو صورت، متراکم‌سازی مستقیم³ و متراکم‌سازی غیرمستقیم⁴ انجام می‌شود. در همجوشی که به‌صورت مستقیم راه‌اندازی شده هدف مستقیماً با باریکه‌های یونی یا لیزری تحت تابش قرار می‌گیرد، اما در راه‌اندازی غیرمستقیم، ابتدا هدف که استوانه‌ای از جنس طلا که هوهرام⁵ گفته می‌شود با باریکه‌های لیزری مورد مورد تابش قرار گرفته و در اثر برخورد با آن پرتو ایکس تولید شده و نسبت به‌روش اول تابش یکنواختی بر روی هدف تأیید می‌شود و از ناپایداری روی سطح هدف که یکی از دلایل آن تابش غیریکنواخت است جلوگیری می‌کند [3-5].

امروزه کشورهای زیادی در تلاش برای رسیدن به منبع جدیدی برای تولید انرژی می‌باشند، که از تحقیقات در زمینه همجوشی هسته‌ای حمایت می‌کنند. اهمیت انجام این گونه تحقیقات با بحرانی شدن انرژی، بیشتر مشخص می‌گردد. همجوشی به دو روش محصورشدگی مغناطیسی (MCF¹) و محصورشدگی لختی (ICF²) صورت می‌گیرد. در روش MCF، پلاسما در چگالی‌های پایین برای زمان نسبتاً طولانی در حد چند ثانیه نگه داشته می‌شود در حالی که در ICF پلاسما باید به‌چگالی‌های بسیار بزرگ در زمان خیلی کوتاه برسد. همجوشی محصورشدگی لختی با استفاده از باریکه‌های لیزری و یا یونی راه اندازی می‌شود [1-2].

* نویسنده مسئول: gholamzadeh@yazd.ac.ir

¹ Magnetic Confinement Fusion

² Inertial Confinement Fusion

³ Direct Compression

⁴ Indirect Compression

⁵ Hohlraum

توسط باسکو برای شبیه‌سازی همجوشی هدف راه‌اندازی شده به وسیله باریکه‌های یونی در یک هدف همجوشی نوشته شده است [10]. همچنین مطالعاتی در باره تابش غیر یکنواخت باریکه یونی و نهشت انرژی روی هدف کروی شکل انجام شده است [15-11]. کاسکی⁵ و همکاران در سال 2013 ساختار هدف کروی شکل و پالس ورودی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها انفجار سیال را به طور دو بعدی⁶ شبیه‌سازی کرده و بهره‌ای در حدود 223 به دست آوردند [16].

معادلات اساسی

هنگامی که هدف با باریکه‌های یون سنگین متراکم می‌شود پارامترهای پالس ورودی شامل توان ورودی، انرژی ورودی و شکل پالس دارای اهمیت هستند [8]. یکی از ویژگی‌های مهم باریکه یونی در همجوشی محصورشدگی لختی، توان توقف باریکه یونی می‌باشد. باریکه یونی در داخل هدف نفوذ می‌کند و انرژی خود را کاملاً درون هدف به نهشت می‌گذارد و یون‌ها در فاصله معینی داخل هدف متوقف می‌شوند و بیشتر انرژی‌شان را در نزدیک انتهای برد یون و کمی قبل از آن به نهشت می‌گذارند که به این پدیده، اصطلاحاً پیک براگ گفته می‌شود.

توان توقف باریکه‌های یونی در یک هدف برابر است با انرژی نهشت یافته در هسته هدف، الکترون‌های مقید و آزاد هدف و همچنین یون‌های هدف است [11 و 18 تا 20]:

$$E_{\text{stp}} = E_{\text{nuc}} + E_{\text{bound}} + E_{\text{free}} + E_{\text{ion}} \quad 1$$

E_{nuc} فرایند توان توقف هسته‌ای است که در انتهای برد توقف مؤثر است و نشان دهنده برخورد‌های کولنی بین یون‌های پرتابه و هسته هدف است، E_{bound} مربوط

در روش متراکم‌سازی مستقیم، سوختی که شامل مخلوطی از دوتریوم-تری‌تیوم و یا ترکیبات مشابه است به صورت چند لایه در یک محفظه کروی شکل قرار داده می‌شود و سطح آن مستقیماً به وسیله باریکه‌های پرتو فرودی مورد تابش قرار می‌گیرد و نهایتاً در اثر نهشت انرژی باریکه‌ها روی هدف، گرمایش لازم و مورد نیاز برای شرایط احتراق ایجاد می‌شود [6-7]. هنگامی که هدف به بیشترین تراکم خود می‌رسد، دما در ناحیه سوخت بالا می‌رود و برهم‌کنش‌های همجوشی آغاز می‌شود.

طاهر¹ و همکارش در سال 1983 شبیه‌سازی عددی در رابطه با ICF انجام دادند. در این شبیه‌سازی هدف را با باریکه یونی بیسموت متراکم نمودند. در این شبیه‌سازی، احتراق، انفجار، سوختن و بهره را با بررسی پارامترهای پالس ورودی مورد مطالعه قرار دادند. پارامترهای پالس ورودی شامل: توان ورودی، انرژی ورودی و شکل پالس می‌باشند. بررسی این هدف و شکل پالس نشان داد که با افزایش توان ورودی دمای هدف افزایش، اما چگالی نهایی سوخت کاهش می‌یابد. هنگامی که توان پالس ورودی بالا باشد، موج شوک قوی در هدف ایجاد می‌شود که این موج شوک باعث افزایش دمای هدف شده و باعث می‌شود هدف زودتر به دمای همجوشی برسد [8]. باسکو² در سال 1992 به بررسی بهره هدف دوتریوم-تری‌تیوم در HIF³ پرداخت. در این شبیه‌سازی از ماده طلا در لایه محافظ و ماده بریلیوم در لایه جاذب استفاده شده است که به وسیله باریکه یونی بیسموت با انرژی 10 GeV متراکم شده است. اگر انرژی ورودی 6 MeV و طول پالس کمتر از 10 ns باشد می‌توان بهره انرژی $G > 400$ را برای هدف مورد نظر به دست آورد [9]. کد دیرا⁴

⁴ DEIRA

⁵ S.Koseki

⁶ Dimension

¹ N.A. Tahir

² M.M Basko

³ Heavy Ion Fusion

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho v \quad 3$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho v v - \nabla \cdot P \quad 4$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla \cdot E v - \nabla \cdot P v + Q \quad 5$$

ρ چگالی سیال، v سرعت سیال، P فشار، E انرژی هدف را مشخص می‌کند و Q چشمه انرژی است. این معادلات را با روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD)² [22-23] در مختصات کروی و به صورت یک بعدی حل کرده‌ایم. هنگامی که باریکه به هدف برخورد می‌کند انرژی جنبشی باریکه تبدیل به انرژی حرارتی شده که این عامل باعث تغییر فاز لایه‌های هدف می‌گردد، بنابراین برای هر فاز (جامد، مایع، گاز و پلاسما) نیاز به روابط جدید برای انرژی حرارتی و فشار وجود دارد. تغییرات دما و فشار هدف با حل معادلات حالت³ به دست می‌آیند که Q در رابطه 5 برابر است با [24-26]:

$$Q = S + Q_{\alpha} - Q_{ec} - Q_{br} + Q_n \quad 6$$

S ، Q_{α} ، Q_{ec} ، Q_{br} و Q_n به ترتیب توان توقف باریکه یونی، گرمای حاصل از ذرات آلفا، هدایت گرمایی الکترون، تابش ترمزی و انرژی نوترون هستند [1,2,17,27]. توان توقف باریکه یونی در فاز اول متراکم‌سازی استفاده می‌شود، بعد از اینکه باریکه در هدف متوقف شد و شرایط برای واکنش‌های همجوشی فراهم گردید دیگر چشمه‌ها به برنامه اضافه می‌گردد. در روش FDTD، گام زمانی مهم‌ترین شرطی است که باید برآورده شود تا به نتیجه دقیق برسیم. بنابراین گام زمانی را از روابط زیر به دست می‌آوریم [28]:

به توان توقف الکترون‌های اتمی مقید است، در عبور یون‌ها از داخل ماده، فرآیند اصلی کند شدن، شامل یونش و برانگیزش الکترون‌های اتمی مقید از طریق برهم‌کنش کولنی با یون‌ها است. E_{free} مربوط به برخورد کولنی باریکه یونی با الکترون‌های آزاد هدف است که نقش مهمی را در توان توقف با توجه به افزایش دما ایفا می‌کند و E_{ion} مربوط به توان توقف باریکه یونی به وسیله یون‌های هدف است که در آن برخورد کولنی بین باریکه یونی و یون‌های هدف مورد بررسی قرار می‌گیرد. هرچه عدد اتمی باریکه‌های یونی بیشتر باشد و تعداد لایه‌های هدف را افزایش دهیم توان توقف بیشینه‌ای به دست خواهد آمد [21].

در معادله 2 توان توقف یک ذره از باریکه یونی را می‌توان به دست آورد، درحالی که برای محاسبه توان توقف کل باریکه یونی باید تعداد ذرات و شعاع خروجی ذرات را هم در نظر بگیریم و بنابراین داریم:

$$s = \frac{N}{\pi r_b^2} E_{stop} \quad 2$$

N ، r_b و S به ترتیب تعداد ذرات، شعاع باریکه یونی و توان توقف یک ذره از باریکه یونی می‌باشند.

در این مقاله، هیدرودینامیک هدف راه‌اندازی شده با باریکه‌های بیسموت با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان شبیه‌سازی شده است و برای یک هدف نمونه بهره‌ای در حدود 222 به دست آمده است.

برای بررسی هیدرودینامیکی هدف از معادلات نویر استوکس¹ استفاده می‌کنیم. با حل این معادلات می‌توان تغییرات چگالی، دما و فشار را در طول شعاع هدف به دست آورد. معادلات پیوستگی جرم، نیرو و انرژی به ترتیب عبارتند از:

³Equation of state

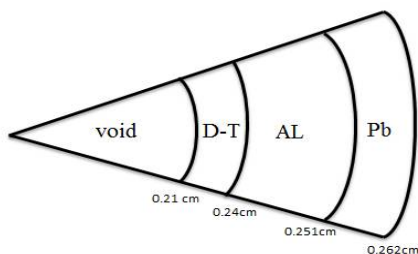
¹ Navier-Stokes equation

² Finite-Difference Time-Domain

سوخت می‌باشند که وابسته به چگالی سوخت در هنگام اشتعال هستند.

نتایج شبیه‌سازی

هدفی شامل لایه‌های سرب، آلومینیوم، سوخت جامد دوتریوم-تری‌تیوم و خلأ می‌باشد که در شکل 1 نشان داده شده است. هدف مورد نظر را به وسیله باریکه یونی بیسموت با انرژی 10 GeV به‌طور مستقیم متراکم نموده‌ایم. باریکه یونی شامل دو پالس ضعیف و قوی می‌باشد، پالس ضعیف تا زمان 10 ns با توان ورودی 2 TW و پالس قوی از زمان 14 ns تا 21 ns با توان ورودی 700 TW می‌باشند، کل انرژی که پالس باریکه یون بیسموت به‌هدف منتقل می‌کند برابر با 6/3 MJ است.



شکل 1- هدف مورد نظر در همجوشی.

در محاسبه توان توقف باریکه یونی، مشخصات باریکه یونی، ضرایب تصحیح، روابطی از یونش هدف و پتانسیل میانگین یونیزاسیون را باید در نظر بگیریم. دلتا، ضرایب تصحیح لایه‌ای است. ضرایب تصحیح لایه، این فرض را که سرعت یون، خیلی بزرگ‌تر از سرعت الکترون‌های هدف باشد، تصحیح می‌کنند. این ضرایب معمولاً با محاسبه دقیق برهم‌کنش‌های ذره با هر مدار الکترونی در عناصر مختلف، محاسبه می‌شود. همین‌طور که سرعت ذره از انرژی‌های نسبیته کاهش می‌یابد، باید برخوردهای ذره با الکترون را به‌طور دقیق برای انرژی بستگی هر الکترون هدف تعیین کنیم، تا بتوان توقف واقعی برسیم. ضرایب تصحیحات لایه،

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} \leq A_1 \min \frac{\Gamma_{i+1}^n - \Gamma_i^n}{\Delta v_{i+\frac{1}{2}}^n} \quad 7$$

$$\Delta v_{i+\frac{1}{2}}^n = \frac{1}{2} (\Delta v_{i+1}^n + \Delta v_i^n) \quad 8$$

Δv شارش خالص سیال، Γ مکان، i شماره سلول‌ها و A_1 یک مقدار ثابت بین صفر و یک است. گام زمانی در هر مرحله مقدارش تغییر می‌کند و معمولاً در حد میکوثانیه انتخاب می‌شود.

تا زمانی که تعداد ذرات داخل پلاسما ثابت باشد، معادله پیوستگی جرم برقرار است. ولی از زمانی که برهم‌کنش همجوشی آغاز می‌شود (هنگامی که باریکه یونی کاملاً متوقف شد) دیگر معادله پیوستگی برقرار نیست. در این حالت تعدادی از ذرات در برهم‌کنش همجوشی شرکت می‌کنند که باعث می‌شود مقداری از جرم سوخت از بین برود. بنابراین شکل معادله پایستگی با وجود کاهش جرم به‌صورت زیر خواهد بود [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho \mathbf{v} - \frac{1}{8} \frac{\rho^2}{m^2} \langle \sigma v \rangle \quad 9$$

ρ چگالی سیال، v سرعت سیال، m جرم سیال، $\langle \sigma v \rangle$ سطح مقطع آهنگ واکنش است.

یکی از موارد مهم در همجوشی یون سنگین، محاسبه بهره است. نسبت انرژی خروجی از هدف به انرژی که به وسیله باریکه یونی به‌هدف منتقل می‌شود را بهره می‌نامند. برای به‌دست آوردن بهره از روابط زیر استفاده می‌کنیم [1]:

$$G = \frac{\eta_c \eta_H f_b E_{DT}}{E_f} \quad 10$$

η_H بهره‌وری هیدرودینامیکی و η_C ضریب جفت شدگی، f_b کسر سوختن سوخت است که به وسیله چگالی، شعاع و دمای سوخت در هنگام اشتعال تعیین می‌گردد. E_{DT} انرژی همجوشی ویژه برای سوخت دوتریوم-تری‌تیوم و E_f انرژی حاصل از سوختن

$$\langle U_i \rangle = \begin{cases} 19 \text{ eV} & Z=1 \\ 11.2+11.7 Z \text{ eV} & 2 \leq Z \leq 13 \\ 52.8+8.71 Z \text{ eV} & Z > 13 \end{cases} \quad 14$$

هدف به‌طور مستقیم به‌وسیلهٔ باریکهٔ یونی بیسموت تا زمان 21ns متراکم می‌گردد و باریکهٔ یونی انرژی خود را در هدف به‌نهشت می‌گذارد. بعد از 21ns شرایط برای واکنش‌های همجوشی آغاز می‌گردد ذرات آلفا و نوترون‌ها موجب گرم شدن سوخت در ناحیهٔ لکهٔ داغ می‌شوند. با بالا رفتن دما در کرهٔ داغ، فشار نیز بالا می‌رود که موجب انبساط سلول‌های لایه‌های سوخت می‌شود. افزایش فشار در ناحیهٔ کرهٔ داغ سلول‌های این ناحیه را منبسط می‌نماید و در نتیجه سلول‌های سوخت متراکم می‌شوند و این امر موجب چگالتر شدن لایه‌های سوخت می‌گردد. با افزایش دما در مرکز هدف، پلاسما ایجاد می‌شود. پلاسما حاوی یون‌ها و الکترون‌ها است. الکترون‌ها دارای سرعت و انرژی زیادی هستند، لذا گرمای داخل ساچمه را به‌سرعت خارج می‌کنند. این امر موجب سرد شدن پلاسما می‌شود و دمای آن به‌سرعت پایین می‌آید. تابش ترمزی نیز یکی از عوامل مهم در سرد شدن محیط پلاسمای داخل هدف است. لازم به‌ذکر است که در نمودارهایی که رسم شده فقط محدودهٔ سوخت در گام‌های زمانی مختلف در نظر گرفته شده است چون می‌خواهیم پارامترها را در ناحیهٔ سوخت بررسی کنیم.

شکل 2 تغییرات چگالی سوخت بعد از متراکم شدن هدف به‌وسیلهٔ باریکهٔ یونی را برحسب گام زمانی و سلول‌های سوخت را نشان می‌دهد. با توجه به‌شکل 2 چگالی سوخت با گذشت زمان به‌تدریج افزایش می‌یابد تا در 253 ps بعد از زمان تراکم، چگالی بعضی از نواحی به 200 gr/cm^3 می‌رسد و بعد از این زمان

سهم بزرگی در توان توقف‌های پروتون در گسترهٔ انرژی 1-100 MeV دارند که بیشینهٔ تصحیح آن 6% است. ضرایب تصحیح را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [29-30]:

$$\delta = a_0 + a_1 \ln E + a_2 (\ln E)^2 + a_3 (\ln E)^3 + a_4 (\ln E)^4 \quad 11$$

$$E = \frac{10^6 E_b}{A_b} \quad 12$$

E_b و A_b به‌ترتیب انرژی و جرم اتمی باریکهٔ یونی می‌باشند. ضرایب تصحیحات لایه [18] در جدول 1 با استفاده از کد شبیه‌سازی OKI آورده شده است. Z_t وابستگی دمای یونش هدف است که با حل معادلهٔ حالت (EOS)¹ بر مبنای مدل فرمی-توماس و با استفاده از درون یابی این مقادیر با داده‌های تجربی به‌دست آمده برای یک چگالی حالت جامد، محاسبه می‌شود [31-32]:

$$Z_t = \begin{cases} \frac{108 T}{8012 + T} & : \text{H} \\ \frac{13.2 T}{259.6 + T} & : \text{Al} \\ \frac{1275.6 T}{18310.4 + 231 T} & : \text{Pb} \end{cases} \quad 13$$

جدول 2. ضرایب تصحیحات لایه برای هدف

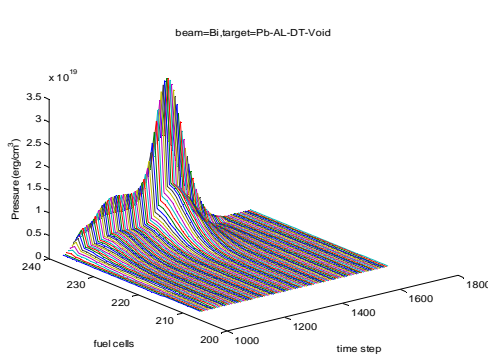
نوع هدف	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Pb	-19.48	6.857	-0.8678	0.04747	-0.0009548
Al	-6.061	2.46	-0.3535	0.02173	-0.0004871
H	-5.052	2.049	-0.3044	0.01966	-0.0004659

پتانسیل میانگین یونیزاسیون را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد [31]:

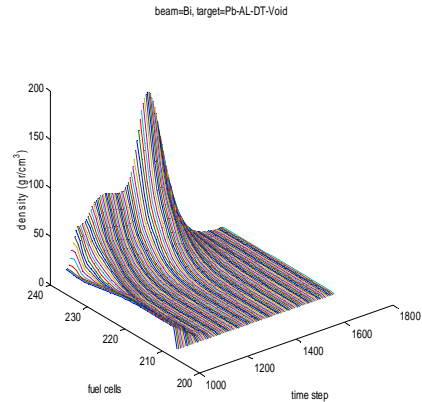
¹ Equation Of State

مقدار خود $3/5 \times 10^{19}$ (erg/cm³) می‌رسد و با گذشت زمان فشار نیز کاهش می‌یابد.

چگالی سوخت به شدت کاهش می‌یابد و به کمترین مقدار خود می‌رسد.



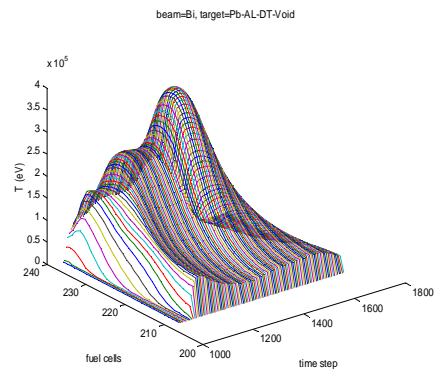
شکل 4. تغییرات فشار لایه‌های سوخت از زمان 21ns تا 21,357ns.



شکل 2- تغییرات چگالی لایه‌های سوخت از زمان 21ns تا 21,357ns.

همچنین مقایسه نتایج مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی ما کدهای مدوزا² [32] و دیرا³ [9] در جدول 2 نشان داده شده است. در همجوشی محصورشدگی لختی بعد از حالت گاز ایده‌آل باید از روابط مربوط به حالت پلاسما استفاده شود که برای به دست آوردن روابط باید از معادلات فرمی-توماس استفاده کرد. به دلیل پیچیدگی معادلات در حالت پلاسما می‌توان از معادلات گاز ایده‌آل یا از اطلاعات تجربی که اغلب از جدول‌های معروف سزامی⁴ می‌باشند، استفاده کرد. ما در محاسبات انرژی از معادله حالت پلاسما استفاده نکرده‌ایم بلکه پلاسما را به صورت گاز ایده‌آل در نظر گرفته‌ایم که برای بهبود نتایج نیاز به این تصحیح داریم.

شکل 3 تغییرات دمای سوخت را نشان می‌دهد، درجه حرارت ناحیه سوخت در 253 ps بعد از زمان متراکم شدن هدف به بیشترین مقدار خود در حدود 400 keV می‌رسد و بعد از این زمان دمای هدف نیز کاهش می‌یابد تا به کمترین مقدار خود برسد که پایان انفجار هدف می‌باشد.



شکل 3. تغییرات دمای لایه‌های سوخت از زمان 21ns تا 21,357ns.

شکل 4 تغییرات فشار سوخت را به وضوح نشان می‌دهد. فشار همچنین بعد از زمان 253 ps به بیشترین

⁴Sesame

² MEDUSA

³ DEIRA

جدول 3. مقایسه کد MEDUSA و DEIRA با شبیه‌سازی که ما انجام داده‌ایم.

شبیه‌سازی که ما انجام داده‌ایم.	کد DEIRA	با استفاده از کد MEDUSA	با استفاده از کد MEDUSA
بیسموت	بیسموت	بیسموت	باریکه یونی
10GeV	10GeV	10GeV	انرژی باریکه یونی
6,3MJ	6,12MJ	6,12MJ	انرژی کل ورودی
700TW	720TW	500TW	توان اصلی
سرب- آلومینیوم- سوخت D-T - خلأ	طلا-پرلیوم- جامد D-T- سوخت گازی	سرب- لیتیم و سرب- سوخت D-T - خلأ	هدف
400KeV	770KeV	184,4KeV	حداکثر دما
200 gr/cm ³	255gr/cm ³	758 gr/cm ³	حداکثر چگالی
3,5×10 ¹⁹ erg/cm ³	—	2,14×10 ¹⁹ erg/cm ³	حداکثر فشار
222	418	179	بهره

برای بهبود بهره یکی از پیشنهادهای که می‌توان در طراحی هدف اعمال کرد این است که لایه اول هدف از جنس خود باریکه انتخاب شود یعنی به جای سرب از بیسموت استفاده شود تا در برخورد باریکه به هدف بیشترین انتقال انرژی صورت بگیرد.

مرجع‌ها

[1] S. Pfalzner, *An Introduction to Inertial Confinement Fusion*, Taylor & Francis, CRC Press, (2006).

[2] S. Atzeni, *The physics of inertial fusion*, CRC Press, (2004).

[3] D.A.Callahan, M.C. Herrmann, M. Tabak. Progress in heavy ion target capsule and hohlraum design, *Laser and Particle Beams* 20 3 (2002), 405-410.

[4] G.O. Allshouse, and et al. Deposition and drive symmetry for light ion ICF targets. *Nuclear Fusion* 39 7 (1999) 893.

[5] J. Lindl, Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain, *Physics of Plasma* 2 (1995) 3933-4024.

[6] م. اسکندری، اصول همجوشی هسته‌ای، انتشارات دانشگاه شیراز، (1374).

[6] M. Skandari, *Principle of Nuclear Fusion*, Shiraz university Publications, (1995)

[7] N.A.Tahir, K.A. Long, Numerical simulation and theoretical analysis of implosion, ignition and burn of heavy-ion-beam reactor-size ICF targets. *Nuclear Fusion* 23 (1983), 887-889.

[8] M. Basko. High gain DT targets for heavy ion beam fusion, *Nuclear fusion* 32 (1992, 1515-1529.

[9] M.M. Basko. DEIRA. A1-D 3-T Hydrodynamic Code for Simulating ICF Targets Driven by Fast Ion Beam, Version 4. *Institute for*

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی به‌روش تفاضل محدود در حوزه زمان، در زمان 21ns مقادیر چگالی، دما و فشار لایه‌های سوخت به ترتیب $0,09\text{gr/cm}^3$ ، $1,2\text{keV}$ و $1,1 \times 10^{16} \text{ (erg/cm}^3\text{)}$ می‌باشد. بنابراین شرایط برای واکنش‌های همجوشی در لایه‌های سوخت فراهم شده است. در حدود 253ps بعد از زمان تراکم هدف، مقادیر چگالی، دما و فشار به شدت افزایش می‌یابند و پیشروی اشتعال را خواهیم داشت و در زمان $21,357\text{ns}$ این مقادیر به کمترین مقدار خود خواهند رسید که این زمان پایان انفجار هدف می‌باشد. بهره‌ای را که برای این هدف به دست آورده‌ایم، برابر با 222 است.

Methods In Physics Research Sextion A **577** (2007) 327-331.

[20] A.I. Ogoyski, T. Someya, S. Kawata, Code OK1 Simulation of multi-beam irradiation on a spherical target in heavy ion fusion, *Computer Physics Communications*, **157** (2004)160-172.

[21] F.F Chen, *Introduction to plasma physics and controlled fusion*. Plenum Press new york and london (1974).

[22] J.P. Boris, and et al., LCPFCT-A flux-corrected transport algorithm for solving generalized continuity equations, *DTIC Document*, (1993).

[23] R.M. More, et al., A new quotidian equation of state (QEOS) for hot dense matter, *Physics of Fluids*, **31**, (1988), 3059-3078.

[24] D.Varentsov. *Energy loss dynamics of intense heavy ion beams interacting with dense matter. PhD thesis*, Technische Universität, Darmstadt (2003).

[25] R.Cranfill, and R. More, *IONEOS: a fast, analytic, ion equation-of-state routine*, Los Alamos Scientific Laboratory, NM USA (1978).

[26] M.M. Basko, On the scaling of the energy gain of ICF targets, *Nuclear Fusion* **35** (1995) 87.

[27] J.P. Christiansen, D.E.T.F. Ashby, K.V. Roberts. MEDUSA a one-dimensional laser fusion code. *Computer Physics Communications* **7 5** (1974) 271-287.

[28] T.A. Mehlhorn, Finite material temperature model for ion energy deposition in ion-driven ICF targets. *Journal of Applied Physics* **52** 11 (1980) 6522- 6532.

[29] J.F. Ziegler. The Stopping of Energetic Light Ions in Elemental Matter, *Journal of Applied Physics* **85** (1999)

[30] A.R. Bell, *Rutherford Laboratory Report*, RL-80-091 (1981)).

Theoretical and Experimental Physics Moscow. (2001).

[10] T. Someya, and et al., Heavy-ion beam illumination on a direct-driven pellet in heavy-ion inertial fusion, *Physical Review Special Topics* **7** (2004), 044701-1, 13.

[11] S. Kawata, and et al., Robust heavy-ion-beam illumination in direct-driven heavy-ion inertial fusion, *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Sextion A* **577** (2007) 327-331.

[12] S. Kawata. DT fuel concentration in an ICF pellet, *AIP Conference Proceedings*.**369** (1996) 339-344.

[13] Y.Iizuka, and, et al. Study on target structure for direct-indirect hybrid implosion mode in heavy ion inertial fusion. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **606** 1-2 (2009) 165-168.

[14] Y.Iizuka, and, et al. Direct-Indirect Hybrid Implosion in Heavy Ion Inertial Fusion. *Journal of Plasma Fusion Research* **8** (2009), 1200-1203.

[15] S. Koseki, and et al. Direct drive fuel target optimization in HIF. *EPJ Web of Conferences* **59** (2013) 09001.

[16] S. Kawata, et al., Direct-indirect mixed implosion mode in heavy ion inertial fusion, *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Sextion A* **24** (2007) 332-336.

[17] A.I. Ogoyski, T. Someya, S. Kawata, Code OK1—Simulation of multi-beam irradiation on a spherical target in heavy ion fusion, *Computer Physics Communications* **157** 2 (2004) 160-17.

[18]. L.Gholamzadeh and A. Ghasemizad, Non-Uniformity of Heavy-Ion Beam Irradiation on a Direct-Driven Pellet in Inertial Confinement Fusion, *Plasma Science and Technology* **13** 44 (2011).

[19] S. Kawata, and et al., Robust heavy-ion-beam illumination in direct-driven heavy-ion inertial fusion, *Nuclear Instruments And*

[31] H. Mazaki, Equations of State of Atoms for the Thomas-Fermi Theory, *Bulletin of the Institute for Chemical Research*, (1974). **52**,681-689.

[32] J. Soltani-Nabipour, D. Sardari, G. Cata-Danil. Sensitivity of the Bragg peak curve to the average ionization potential of the stopping medium. *Romanian Journal of Physics* **54** 3-4 (2009) 321-330.

[334] R. Froehlich, Heavy Ion Beam Driven Inertial Confinement Fusion Target Studies And Reactor Chamber Neutronic Analysis, *Nuclear Engineering and Design* **73** (1982) 201-222.