



بررسی رفتار مگنتوهیدرودینامیکی پلازما در ساچمه‌های ICF در روش اشتعال سریع با حضور میدان مغناطیسی خارجی

اکبر پروازیان - هادی داوری*

دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده فیزیک

چکیده

اشتعال سریع یکی از روش‌های همجوشی در محصورسازی به روش لختی (ICF) است که در اثر برهمکنش باریکه پر انرژی یونی یا لیزری با فلز تعبیه شده در داخل ساچمه سوخت دوتریم-تریتیم، الکترون‌های نسبیتی (پروتون‌های پرانرژی) با انرژی چندین مگا الکترون‌ولت (MeV) تولید می‌شوند. سپس الکترون‌ها به سرعت درون سوخت فوق چگال نفوذ می‌کنند و با جایگذاری انرژی خود در ناحیه کوچکی از ساچمه باعث گرم شدن آن تا دمای 10 keV می‌شوند که در نهایت باعث اشتعال در ساچمه می‌گردد.

با استفاده از ساچمه‌های استوانه‌ای و اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی می‌توان جریان پلازما را بیشتر در مرکز ساچمه و روی محور استوانه متمرکز کرد تا اتلاف گرمایی ناشی از برخورد ذرات پلازما با دیواره‌های ساچمه به کمترین مقدار خود برسد و در نهایت باعث افزایش بهره انرژی شود. این روش به عنوان همجوشی در هدف‌های مغناطیسه (MTF)^۱ شناخته می‌شود. ما با مقایسه حالت حضور میدان مغناطیسی با شدت ۵ تسلا و حالت بدون حضور میدان مغناطیسی تفاوت دو حالت را به وسیله کد MHD2D بررسی کردیم و افزایش نسبی دما و چگالی را در حالت وجود میدان مغناطیسی نسبت به حالت دوم در مرکز منطقه داغ^۲ را نشان دادیم.

واژه‌های کلیدی: همجوشی، ساچمه، روش لختی، اشتعال سریع D-T، هدف‌های مغناطیسه MTF، معادلات MHD

مقدمه

استفاده از انرژی همجوشی هسته‌ای به روش لختی (ICF) یکی از بخش‌های مهم فیزیک گرما هسته‌ای طی چند دهه اخیر را به خود اختصاص داده است [۱، ۲]. محصورسازی به روش لختی خود دارای انواع مختلف است که در شیوه متداول آن یک ساچمه که حاوی مخلوط (D-T سوخت) می‌باشد را طی چهار مرحله‌ی پرتودهی، تراکم، اشتعال و انفجار قرار می‌دهند. در بیشینه تراکم، شعاع سوخت از مرتبه یک میلی‌متر به یک ده‌م

^۱Magnetized Target Fusion

^۲Hot-Spot



میلی متر می رسد و باعث چگال شدن سوخت تا مرتبه $10^{29} - 10^{30} \text{ ion/m}^3$ یعنی در حدود ۵۰۰ الی ۱۰۰۰ برابر سوخت جامد می گردد و دمای سوخت نیز به بیش از ۱۰ keV می رسد و سوخت به صورت یونیده در می آید که به آن پلاسما گفته می شود. کل این فرآیند در فاصله زمانی $10^{-10} - 10^{-9}$ ثانیه انجام می گیرد و نرخ برهم کنش همجوشی هسته ای افزایش می یابد [۴۳].

واکنش اصلی همجوشی به صورت زیر است:



اشتعال سریع (Fast Ignition) :

یکی از روش های مورد استفاده در محصورسازی لختی، اشتعال سریع است [۵،۶]. در این روش، پرتودهی به ساچمه سوخت در دو مرحله انجام می گیرد؛ مثلاً در HiPER^۳، پرتودهی در مرحله اول با انرژی در حدود ۷۰ kJ به منظور گرم و متراکم ساختن ساچمه و در مرحله دوم با انرژی در حدود ۲۰۰ kJ به منظور ایجاد جرقه اشتعال و در نهایت انجام همجوشی، مورد استفاده قرار می گیرد [۷]. در مرحله دوم پرتودهی، پرتوهای لیزر خود نمی توانند به درون پلاسمای فوق چگال داخل ساچمه نفوذ کنند از این رو با مکانیسم خاصی به عنوان مثال با قرار دادن ورقه نازکی از آلومینیوم در مقابل پرتو لیزر و تولید الکترون های نسبیتهی (با انرژی ۱۰ MeV -) باعث ایجاد جرقه اشتعال درون پلاسما و در نهایت انجام همجوشی می شوند. از مزیت های این روش استفاده از لیزرهایی با پرتوهای کم انرژی تر است به عنوان مثال در لیزرهای مورد استفاده در مرکز تحقیقات همجوشی آمریکا (NIF) که از روش اشتعال مستقیم استفاده می شود به پرتوهایی با انرژی در حدود ۲ MJ نیاز است [۸] این در حالی است که لیزر مورد استفاده در HiPER طبق توضیحاتی که در ابتدا داده شد برای همجوشی به روش اشتعال سریع از پرتوهایی با انرژی بسیار کمتر بهره می برد، همچنین برخورداری از بهره انرژی (Q) بالاتر نسبت به حالت های دیگر و عدم نیاز به تقارن ساچمه (به خصوص برای کم کردن اثر ناپایداری رایلی - تیلور) در مرحله پرتودهی از عوامل موثر دیگری در استفاده از این روش است [۹].

معادلات مگنتوهیدرودینامیکی (MHD) :

به طور کلی پلاسما توسط دو مدل سیالی و نظریه جنبشی توصیف می شود. در مدل سیالی که ساده ترین و معمولی ترین آن MHD است پلاسما بر حسب کمیت های خوش تعریف و هموار نظیر چگالی و سرعت میانگین در حوالی هر مکان توصیف می شود. مدل سیالی تازمانی معتبر است که ذرات پلاسما از لحاظ برخوردی در سطح بالایی باشند به طوری که بتوان توزیع سرعت ها را با تقریب خوبی توسط توزیع ماکسول-بولتزمن در نظر گرفت. در این مدل المان های حجمی سیال مورد بررسی قرار می گیرند.

۱-The High Power laser Energy Research

معادلات MHD مربوط به پلازما عبارتند از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla P + \frac{1}{\mu_0} B \times (\nabla \times B) \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (Uv) = -P \nabla \cdot v \quad (4)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) \quad (5)$$

که به ترتیب روابط حاکم بر چگالی جرم، تکانه، انرژی و میدان مغناطیسی برای پلازما می‌دهد. کمیت‌های موجود در معادله، ρ چگالی جرم سیال، v سرعت سیال، P فشار سیال و B بزرگی میدان مغناطیسی و U چگالی انرژی داخلی سیال که با فشار رابطه $U = \frac{P}{\gamma-1} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P$ دارد می‌باشند.

چون حل تحلیلی معادلات ۲ الی ۵ کار دشواری است می‌توان شرایط ساچمه را در منطقه داغ برای حالت‌های با اندازه میدان مغناطیسی متفاوت به صورت عددی در یک برنامه کامپیوتری محاسبه و تغییرات آن را بررسی نمود و نتایج را با حالت بدون حضور میدان مغناطیسی خارجی مقایسه کرد.

مشخصات ساچمه هدف:

استفاده از ساچمه‌های استوانه‌ای باعث می‌شود تا زمان محصور سازی پلازما در ساچمه‌ها را افزایش دهیم به این ترتیب که با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی جریان پلازما بیشتر در مرکز ساچمه و روی محور استوانه متمرکز می‌گردد و اتلاف انرژی ناشی از برخورد پلازما با دیواره‌های ساچمه نیز به کمترین مقدار خود می‌رسد و در نهایت این کار باعث افزایش بهره انرژی خواهد شد [۱۰ و ۱۱]. این روش که به عنوان همجوشی در هدف‌های مغناطیسه (MTF) شناخته می‌شود، اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۲].

برای ساچمه استوانه‌ای در شرایط زیر اشتعال انجام می‌گیرد:

$$KT = 5-7 \text{ keV},$$

$$\rho R \geq 0.3-0.6 \text{ g/cm}^2 \quad (6)$$

می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی، مقدار کمینه پارامتر ρR را باز هم از مرتبه ۳۰-۱۰ نیز کوچک‌تر کرد و این یعنی توان لیزر مورد نیاز برای همجوشی در یک دمای ثابت که با رابطه زیر با پارامتر ρR وابسته است مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱۳].

$$P_{\text{لیزر}} \propto \quad (7)$$

$$(\rho R)^2_{\text{زمان اشتعال}}$$

این امر زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات آلفای با انرژی $3/5 \text{ MeV}$ تقریباً مغناطیسه شده باشند به طوری که شعاع لارمور آنها $r_{aL} \approx R$ (شعاع ساچمه است) گردد در نتیجه ذرات آلفا در ساچمه محصور می‌گردند و انرژی

آنها برای بالا نگه داشتن دمای ساچمه و کم کردن اتلاف انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت شرط لازم برای اشتعال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$BR \geq 6 \times 10^5 \text{ Gcm} \quad (8)$$

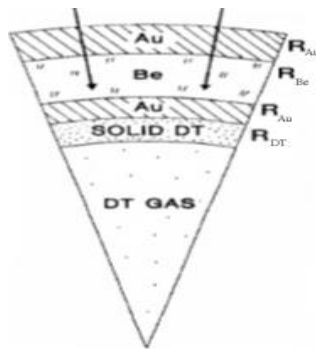
که در آن B شدت میدان مغناطیسی خارجی در حالت فشرده و R شعاع ساچمه استوانه ای است [۱۲]. در بیشینه فشردگی، میدان مغناطیسی در منطقه داغ نیز به همراه سیال فشرده می‌گردد برای اثبات این مطلب کافی است فرض کنیم شار در لحظه قبل از فشردگی برابر $\phi_0 = B_0 \pi R_0^2$ باشد سپس در زمان بیشینه فشردگی شار برابر $\phi_1 = B_1 \pi R_1^2$ می‌گردد، طبق پایستگی شار میدان مغناطیسی خواهیم داشت:

$$B_1 = B_0 \left(\frac{R_0}{R_1} \right)^2 \quad (9)$$

و در صورتی که جمله پخش شدگی میدان را نیز لحاظ کنیم مقدار فشردگی میدان مقداری تفاوت با فشردگی ساچمه خواهد داشت به طوری که طبق نتایجی که به تازگی منتشر شده، برای فشردگی ساچمه در حدود ۴۸۰، فشردگی میدان مغناطیسی در حدود ۵۰۰ برابر به دست آمده است [۱۴].

در اینجا ما میدان مغناطیسی با بزرگی ۵ تسلا را بر روی ساچمه اعمال کرده‌ایم. همچنین از میان پیکربندی‌های مغناطیسی متعددی که میتوان برای ساچمه انتخاب کرد z-pinch مورد توجه ما بوده است. در این دستگاه جهت جریان در راستای محور استوانه و جهت میدان مغناطیسی حول محور استوانه است.

میدان مغناطیسی مورد نیاز برای محصورسازی ذرات آلفا در منطقه داغ ساچمه به شعاع R طبق معادله (۸) بدست می‌آید. همچنین پارامتر β ؛ نسبت فشار سیال به فشار مغناطیسی نیز در این حالت مقدار کوچکی خواهد بود.



شکل ۱: ترتیب چینش لایه‌ها در یک نمونه ساچمه ICF

شبیه‌سازی منطقه داغ به وسیله کد MHD2D:

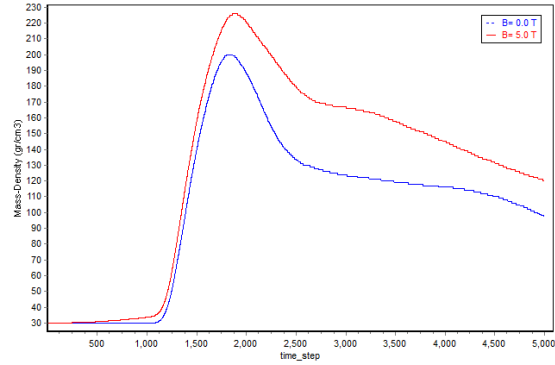
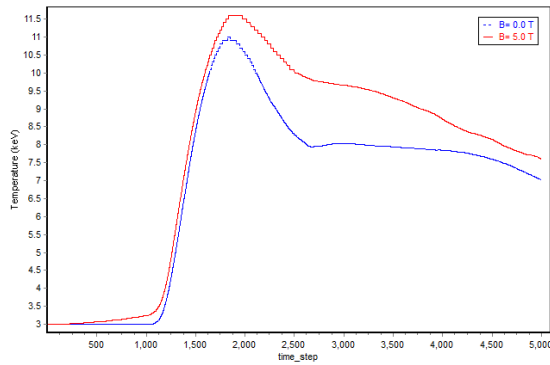
در شبیه‌سازی عددی انجام گرفته منطقه داغ را به صورت یک شبکه سلولی در نظر گرفتیم به طوری که با توجه به ابعاد منطقه داغ $R = 0.12 \text{ cm}$ حجم هر سلول برابر $V = 3 \times 10^{-9} \text{ cm}^3$ به دست می‌آید. شرایط اولیه اعمال شده در منطقه داغ ساچمه در جدول (۱) آمده است. همچنین سرعت اولیه سلول‌ها صفر در نظر

19 th Iranian's Nuclear Conference

گرفته شده و تغییرات چگالی، دما، فشار و میدان مغناطیسی سلول‌ها در منطقه داغ بر حسب زمان بررسی شده است.

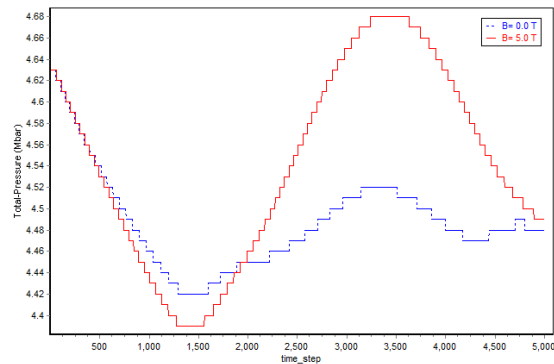
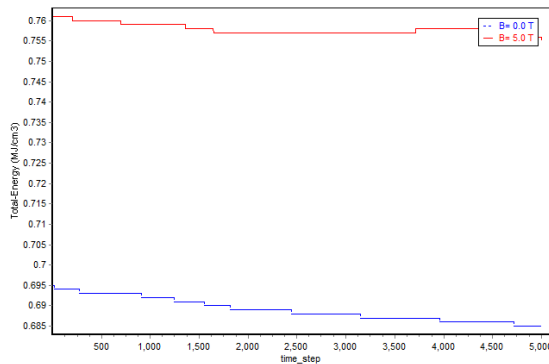
جدول ۱: مقادیر اولیه چگالی جرم، دما، فشار و انرژی کل در منطقه داغ

حالت	ناحیه	میدان مغناطیسی (T)	چگالی (gr/cm ³)	دما (keV)	فشار پلاسما (Mbar)	چگالی انرژی کل (MJ/cm ³)
۱	۱/۴ مساحت داخل	۰	۳۰	۳	۴/۶۳	۰/۶۹۵
	۳/۴ مساحت خارج	۰	۱۰۰	۸		
۲	۱/۴ مساحت داخل	۵	۳۰	۳	۴/۶۳	۰/۷۶۱
	۳/۴ مساحت خارج	۵	۱۰۰	۸		



شکل ۳: نمودار دما بر حسب گام زمانی در مرکز منطقه داغ. در بیشینه تراکم افزایش نسبی در حدود ۶/۴ درصد حالت ۲ نسبت به حالت ۱ است. همچنین بیشینه اختلاف نسبی در گام زمانی ۲۶۵۰ حدود ۲۳ درصد می‌باشد.

شکل ۲: نمودار چگالی بر حسب گام زمانی در مرکز منطقه داغ. در بیشینه تراکم افزایش نسبی ۱۳ درصدی حالت ۲ نسبت به حالت ۱ قابل توجه است. بیشینه اختلاف نسبی در گام زمانی ۳۱۰۰ در حدود ۳۵ درصد می‌باشد.



شکل ۵: نمودار چگالی انرژی کل در کل منطقه داغ بر حسب گام زمانی. انرژی کل پلاسما در منطقه داغ پایسته است.

شکل ۴: نمودار فشار پلاسما در کل منطقه داغ بر حسب گام زمانی. فشار کل پلاسما در منطقه داغ تقریباً پایسته است.

نتیجه گیری:

با بررسی چگالی سلول مرکزی مشاهده می‌کنیم تفاوت نسبی چگالی در حالت ۱ و ۲ در حدود ۱۳ درصد و در گام زمانی ۳۱۰۰ به ۳۵ درصد نیز می‌رسد (شکل ۱). همچنین دما در ماکزیمم فشردگی یعنی گام زمانی ۱۵۰۰ الی ۲۰۰۰ تا ۶/۴ درصد اختلاف نسبی را نشان می‌دهد. بیشترین اختلاف نسبی دما نیز در گام زمانی ۲۶۵۰ مقدار ۲۳ درصد را نشان می‌دهد (شکل ۲). فشار و چگالی انرژی کل نیز با توجه به استفاده از معادلات MHD و صرف نظر کردن از جملات مقاومت سیال و اثر گرانش و یا اثر پخشی میدان مغناطیسی، برحسب زمان تقریباً ثابت هستند (شکل ۳ و ۴).

وجود میدان مغناطیسی ۵ تسلا باعث افزایش همزمان چگالی، دما و انرژی به ترتیب به میزان ۳۵، ۲۳ و ۹ درصد نسبت به حالت بدون میدان در مرکز منطقه داغ در حالت بیشینه شده است که این خود علاوه بر افزایش زمان محصور سازی پلاسما در ساچمه باعث کاهش اتلاف انرژی ذرات و در نهایت افزایش مقدار بهره انرژی (Q) خواهد شد. از فواید دیگر وجود میدان مغناطیسی می‌توان به کنترل اثر ناپایداری رایلی-تیلور بر ساچمه در زمان تشکیل منطقه داغ نیز اشاره کرد. به طور کلی این روش محصورسازی (MTF) پلی بین روش محصور سازی لختی (ICF) و محصور سازی مغناطیسی (MCF) است و امید آن می‌رود که بیشتر مورد توجه دانشمندان و محققان این عرصه قرار گیرد.

مراجع

- [1] R. E. Kidder, Nucl. Fusion **16**, 405 (1976).
- [2] J. Meyer-ter-Vehn, Nucl. Fusion **22**, 561 (1986).
- [3] M. Roth, et al. , "Fast ignition by intense laser-accelareted proton beams", Physical Review Letters **86**, No. 3 (2001) 436-439.
- [4] A.J. Kemp, M.M. Basko and J. Meyer-ter-Vehn , "Implosion and ignition of magnetized cylindrical targets driven by heavy -ion beams". Nuclear fusion **43** (2003)16-24.
- [5] Tabak M, Hammer J, Glinsky M, Kruer WL, Wilks S C, Woodworth J, Campbell EM, Perry MD and Mason R J Phys. Plasmas **1** **1626** (1994).
- [6] Tabak M et al Phys. Plasmas **12** 057305 (2005).
- [7] S. Atzeni, et all., "Fast ignitor target studies for the HiPER project", Physics of Plasmas, Vol. **15**, 056311 (2008).
- [8] "How NIF works", Lawrence Livermore National Laboratory. https://lasers.llnl.gov/about/nif/how_nif_works/index.php(2008).
- [9] "Fast ignition of ICF targets: an overview", J Meyer-ter-Vehn Plasma Phys. Control. Fusion **43** A113 (2001).
- [10] A.J..Kemp, M.M.Basko and J. Meyer-ter-Vehn, Nuclear fusion **45**(2005).
- [11] S. Atzeni ,M.Temporal and J. J. Honrubia , "A First Analysis of Fast Ignition of Precompressed ICF Fuel", Nuclear fusion **42** (2002) L1-L4.
- [12] "Ignition conditions for magnetized target fusion in cylindrical geometry" M.M. Basko et al Nucl. Fusion **40** 59 (2000).
- [13] Kemp, A.J., M. Basko, and J. Meyer-ter-Vehn, "Magnetized cylindrical targets for heavy ion fusion." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **464**(1-3) (2001):192-195.



۲ و ۳ اسفند ماه ۱۳۹۱
دانشگاه فردوسی مشهد



Nuclear society of Iran
19 th Iranian's Nuclear Conference
20-21 February , 2013
Ferdowsi University of Mashhad

19 th Iranian's Nuclear Conference

[14] M. Hohenberger, P.-Y. Chang, G. Fiksel, J. P. Knauer, R. Betti et al., "*Inertial confinement fusion implosions with imposed magnetic field compression using the OMEGA Laser*", Phys. Plasmas **19**, 056306 (2012).