

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛ شبکه های توجه گرافی (Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین مقاله نویسی IEEE و ISI ویژه فنی و مهندسی

## بررسی تغییرات انرژی پلازما در ساچمه‌های ICF به روش اشتعال سریع در دو حالت با حضور میدان مغناطیسی خارجی و در غیاب آن

پروازیان ، اکبر ؛ داوری ، هادی

دانشکده فیزیک- دانشگاه صنعتی اصفهان

### چکیده

اشتعال سریع یکی از روش‌های همجوشی در محصورسازی به روش لختی (ICF) است. در این روش در اثر برهم‌کنش باریکه پراثری یونی یا لیزری با فلز تعبیه شده در داخل ساچمه سوخت دوتریم-تریتم، الکترون‌های نسبیتی (پروتون‌های پراثری) 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  $10\text{ keV}$  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. ائتلاف گرمایی ناشی از برخورد ذرات پلازما با دیواره‌های ساچمه به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد و در نهایت باعث افزایش بهره انرژی می‌گردد. این روش به عنوان همجوشی در هدف‌های مغناطیسه (MTF) 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 انرژی کل در مرکز منطقه داغ را برای حالت حضور میدان مغناطیسی، بیش از ۸ درصد به دست آوردیم.

## Changes in Energy of Plasma in Fast Ignition ICF pellets with and without applying external magnetic field

Parvazian , Akbar ; Davari , Hadi

Department of Physics, Isfahan University of technology, Isfahan

### Abstract

Fast ignition is a method in inertial confinement fusion (ICF). In this method, irradiation of the target is divided in two steps. The first step of irradiation is used to pre-compressing the target. We use a layer of Aluminum in a special manner in the target. In the second step of irradiation, relativistic electron beams will be generated because of interaction between high energy laser's beams and the metal located in the D-T fuel target. These electrons penetrate in high dense fuel immediately. Then energy deposition of these electrons leads to heat of a small area in the target up to 10 keV and finally this process is leading to ignition.

By using cylindrical pellets and applying an external magnetic field, we can focus plasma current in the center of pellet and on cylindrical axis. This process leads to reduce heat losses of collisions between plasma particles and pellet walls which finally led to increase gain energy of the target. This method is known as Magnetic Target Fusion (MTF). We have simulated magnetohydrodynamics behavior of the target by using MHD2D code for two cases. First case with applying external magnetic field in order of 5 Tesla and the second case without magnetic field. The aims of studying these cases is for understanding the influence of magnetic field in ICF pellets and see the behavior of kinetic, internal and total energy of plasma by using MHD equations. Finally in hot spot simulations, the relative difference for total energy of plasma has been shown more than 8 percent in the center of hot spot.

PACS No. ۲۸

## مقدمه

از مزیت‌های این روش استفاده از لیزرهایی با پرتوهای کم انرژی‌تر است به عنوان مثال در لیزرهای مورد استفاده در مرکز تحقیقات همجوشی آمریکا (NIF) که از روش اشتعال مستقیم استفاده می‌شود به پرتوهایی با انرژی در حدود ۲ MJ نیاز است [۸]. همچنین برخورداری از بهره انرژی (Q) بالاتر نسبت به حالت‌های دیگر و عدم نیاز به تقارن در پرتودهی ساچمه (به خصوص برای کم کردن اثر ناپایداری رایلی-تیلور) از عوامل موثر دیگری جهت استفاده از این روش است [۹].

## معادلات مگنتوهیدرودینامیکی (MHD):

در مدل سیالی که ساده‌ترین و معمولی‌ترین آن MHD<sup>۱</sup> است پلاسما بر حسب کمیت‌های خوش‌تعریف و هموار نظیر چگالی و سرعت میانگین در حوالی هر مکان توصیف می‌شود. در این مدل المان‌های حجمی سیال مورد بررسی قرار می‌گیرند.

با حل معادلات مگنتوهیدرودینامیکی حاکم بر ساچمه تغییرات چگالی و دما در طول شعاع ساچمه را می‌توان به دست آورد.

معادلات MHD مربوط به پلاسمای تک سیال به صورت زیر به دست می‌آیند:

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

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

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

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

که به ترتیب روابط حاکم بر چگالی جرم، تکانه، انرژی و میدان مغناطیسی برای پلاسمای مورد نظر ما را می‌دهد. کمیت‌های موجود در معادله، چگالی جرم سیال،  $\rho$ ، سرعت سیال،  $v$ ، فشار  $P$ ، سیال،  $B$  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. همچنین روابط انرژی‌های جنبشی، داخلی، مغناطیسی و کل پلاسما به صورت معادلات (۶) الی (۹) در نظر گرفته می‌شوند.

همجوشی هسته‌ای به روش لختی یکی از بخش‌های مهم فیزیک گرما هسته‌ای است که مطالعات آن زمان زیادی را طی سال‌های اخیر به خود اختصاص داده است [۲،۱].

محصولسازی 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 مرحله پرتودهی، تراکم، اشتعال و انفجار قرار می‌دهند. در مرحله تراکم شعاع سوخت از مرتبه میلی‌متر می‌گردد و باعث چگال شدن سوخت تا مرتبه  $10^{29} - 10^{30} \text{ ion/m}^3$  یعنی در حدود ۵۰۰ الی ۱۰۰۰ برابر سوخت جامد می‌گردد و دمای سوخت نیز در حدود ۱۰ keV می‌رسد. این کار در فاصله زمانی  $10^{-10} - 10^{-9}$  ثانیه انجام می‌گیرد و نرخ برهم کنش همجوشی هسته‌ای افزایش می‌یابد [۳و۴]. واکنش اصلی عمل همجوشی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

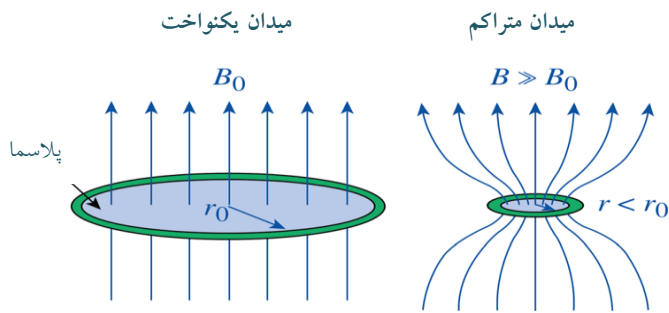


که مقدار ۱۴/۱ MeV از انرژی آزاد شده مربوط به ذرات نوترون و ۳/۵ MeV آن مربوط به ذرات آلفاست.

## اشتعال سریع (Fast Ignition):

یکی از روشهای محصولسازی لختی، اشتعال سریع است [۵،۶]. در این روش، پرتودهی به ساچمه سوخت در دو مرحله انجام می‌گیرد؛ مثلاً در HiPER<sup>۱</sup>، پرتودهی در مرحله اول با انرژی در حدود ۷۰ kJ به منظور گرم و تراکم 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 می‌گیرد [۷]. در مرحله دوم پرتودهی، پرتوهای لیزر خود نمی‌توانند 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 الکترون‌های نسبی (با انرژی ۱-۱۰ MeV) باعث ایجاد جرقه اشتعال درون پلاسما و در نهایت انجام همجوشی می‌شوند.

<sup>۱</sup> Magneto-Hydro-Dynamics<sup>۱</sup> High Power laser Energy Research



شکل ۱: نمایش فشردگی میدان مغناطیسی همزمان با افزایش چگالی [۱۴].

$$E_{\text{kinetic}} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m} \quad (۶)$$

$$E_{\text{internal}} = \frac{3}{2}k_B T \quad (۷)$$

$$E_{\text{magnetic}} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (۸)$$

$$E_{\text{total}} = E_{\text{kinetic}} + E_{\text{internal}} + E_{\text{magnetic}} \quad (۹)$$

### مشخصات ساچمه هدف

استفاده از ساچمه‌های استوانه‌ای باعث می‌شود تا زمان محصور سازی پلاسما در ساچمه‌ها افزایش یابد به این ترتیب که با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی جریان پلاسما بیشتر در مرکز ساچمه و روی محور استوانه متمرکز می‌گردد و اتلاف انرژی ناشی از برخورد پلاسما 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)<sup>۱</sup> شناخته می‌شود، اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. برای ساچمه استوانه‌ای در شرایط زیر اشتعال انجام می‌گیرد:

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

$$\rho R \geq 0.3-0.6 \text{ g/cm}^2 \quad (۱۰)$$

می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی، مقدار کمینه پارامتر  $\rho R$  را باز هم از مرتبه ۳۰-۱۰ نیز کوچک‌تر کرد [۱۳].

در بیشینه فشردگی، میدان مغناطیسی در منطقه داغ نیز به همراه سیال فشرده می‌گردد (شکل ۱). برای اثبات این مطلب کافی است فرض کنیم شار در لحظه قبل از فشردگی برابر  $\varphi_0 = B_0 \pi r_0^2$  باشد سپس در زمان بیشینه فشردگی شار برابر  $\varphi = B \pi r^2$  می‌گردد، طبق پایستگی شار میدان مغناطیسی خواهیم داشت:

$$B = B_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (۱۱)$$

طبق نتایج آزمایشگاهی که به تازگی منتشر شده است، در حضور میدان مغناطیسی ۸ تسلا و با فشردگی ساچمه کروی در حدود ۴۸۰ مرتبه، فشردگی میدان مغناطیسی نیز در حدود ۵۰۰ برابر به دست آمده است [۱۴].

### شبیه‌سازی منطقه داغ به وسیله کد MHD2D

در شبیه‌سازی عددی انجام گرفته منطقه داغ را به صورت یک شبکه سلولی که شامل دو ناحیه داخلی و خارجی است در نظر گرفتیم. چگالی و دمای ناحیه خارجی از ناحیه داخلی بیش‌تر است (جدول ۱).

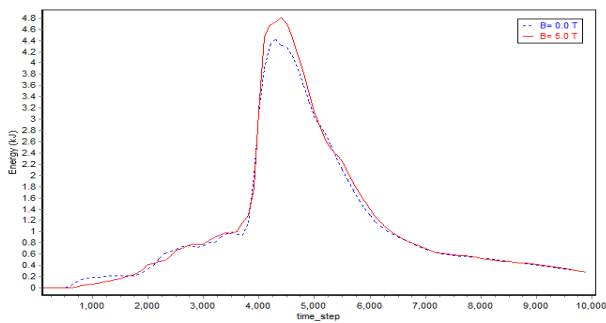
جدول ۱: مقادیر اولیه چگالی جرم، دما، فشار و انرژی کل در منطقه داغ

حالت	ناحیه	میدان مغناطیسی (T)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	دما (keV)	متوسط فشار (Gbar)	متوسط انرژی کل (kJ)
۱	داخلی	۰	۰/۰۰۳	$2/5 \times 10^{-5}$	۲۳/۵	۱
	خارجی	۰	۱۰	۳		
۲	داخلی	۵	۰/۰۰۳	$2/5 \times 10^{-5}$	۲۳/۵	۱
	خارجی	۵	۱۰	۳		

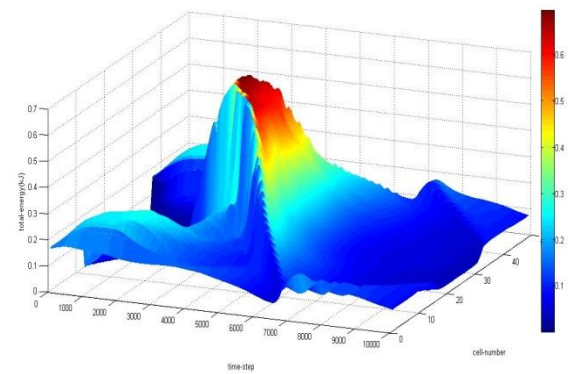
### نتیجه‌گیری

با توجه به نمودار سه بعدی انرژی کل بر حسب زمان-مکان (شکل ۲ و شکل ۳) مشاهده می‌شود که در گام زمانی بین ۳۰۰۰ الی ۵۰۰۰، انرژی کل سلول‌های مرکزی منطقه داغ به بیشینه مقدار خود می‌رسند که در واقع نشان‌دهنده زمان بیشینه فشردگی و آغاز اشتعال ساچمه در این بازه زمانی است. در هنگام شروع اشتعال در مرکز ساچمه، چون سرعت تراکم در این لحظه مینیمم می‌شود، انرژی جنبشی نیز که رابطه مستقیمی با سرعت دارد به مینیمم مقدار خود می‌رسد. هم‌چنین در ابتدا انرژی جنبشی حالت بدون میدان تا قبل از اشتعال بیشتر است اما پس از اشتعال این روند عکس می‌گردد. (شکل ۴). در زمان اشتعال مرکز ساچمه چون دما بیشینه می‌گردد در نتیجه انرژی داخلی نیز که رابطه مستقیمی با دما دارد به بیشینه مقدار خود خواهد رسید (شکل ۵).

<sup>۱</sup> Magnetized-Target-Fusion

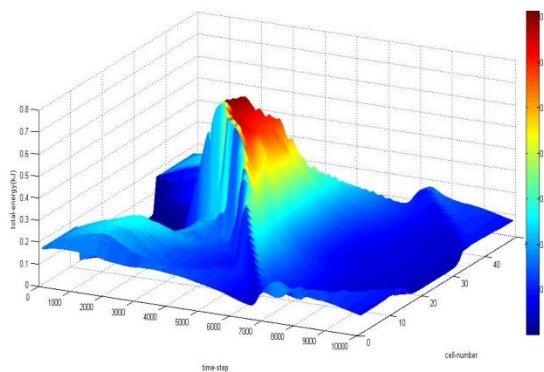


شکل ۶: نمودار انرژی کل بر حسب زمان برای سلول مرکزی منطقه داغ.



شکل ۲: نمودار انرژی بر حسب زمان- مکان بدون حضور میدان مغناطیسی.

در بررسی نمودار انرژی کل بر حسب زمان در مرکز منطقه داغ وجود میدان مغناطیسی ۵ تسلا باعث افزایش انرژی کل به میزان ۸ درصد نسبت به حالت بدون حضور میدان مغناطیسی در گام زمانی ۴۰۰۰ الی ۵۰۰۰ شده است (شکل ۶). این افزایش انرژی علاوه بر افزایش هم‌زمان چگالی و دما است که به میزان ۱۹ و ۶ درصد در مرکز منطقه داغ به دست آمده است [۱۵]. پس با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی مناسب می‌توان عمل همجوشی را در شرایط بهتری فراهم نمود به طوری که انرژی خروجی بیشتری حاصل شود.

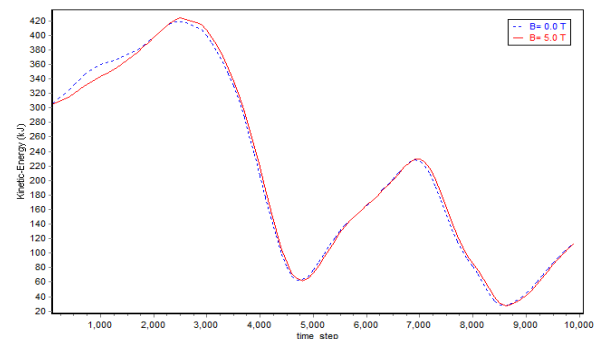


شکل ۳: نمودار انرژی بر حسب زمان- مکان با حضور میدان مغناطیسی ۵ تسلا.

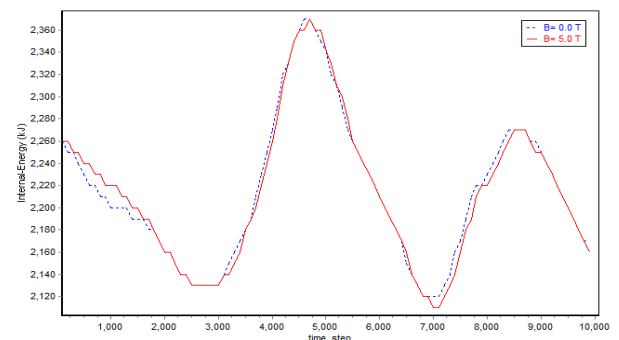
### مرجع‌ها

- [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-accelerated 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, Krueer 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 al., "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](https://lasers.llnl.gov/about/nif/how_nif_works/index.php).
  - [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.
  - [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).
- [۱۵] پروازیان، داوری، ا. هب "بررسی رفتار مگنتو هیپیدرودینامیکی پلاسما در ساجمه‌های ICF در روش اشتعال سریع با حضور میدان مغناطیسی خارجی"،

نوزدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، زمستان ۱۳۹۱



شکل ۴: نمودار انرژی جنبشی بر حسب زمان برای کل منطقه داغ.



شکل ۵: نمودار انرژی داخلی بر حسب زمان برای کل منطقه داغ.

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه

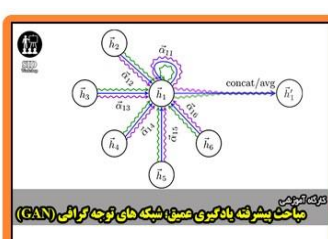


فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛ شبکه های توجه گرافی (Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین مقاله نویسی IEEE و ISI ویژه فنی و مهندسی