



مطالعه نقش لایه کندگی دوتایی کربن چگالی بالا - پلی استایرن در اشتعال هدف‌های گداخت لختی

مریم نصریان، بابک خان بابائی*

دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، صندوق پستی: ۳۶۷۱۶-۴۱۱۶۷، دامغان، ایران

*Email: b.khanbabaei@du.ac.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۷

چکیده

لایه کندگی کربن چگالی بالا یکی از گزینه‌های امیدبخش در آموزش گرما هسته‌ای در هدف‌های گداخت محصورشدگی لختی است. به منظور کاهش ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و هم‌چنین حفظ سوخت از پدیده پیش‌گرمایش، از طراحی لایه کندگی دوتایی با لایه بیرونی کربن چگالی بالا که اخیراً توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است، استفاده شده است. از این‌رو در این پژوهش، بهینه‌سازی لایه کندگی دوتایی یک هدف کروی دلخواه با تک لایه کندگی پلی استایرن را با استفاده از کد هیدرودینامیکی MULTI-IFE مورد بررسی قرار دادیم. این هدف، تحت تابش باریکه‌های متقارن لیزر با طول پالس ۲۲۷ ns، طول موج ۰.۲۵ μm و انرژی کل ۱.۷ MJ قرار گرفت. محاسبات ما نشان می‌دهد که ضخامت بهینه کربن چگالی بالا حدود ۵.۶ μm است. استفاده از لایه کندگی دوتایی سبب می‌شود که انرژی لیزر جذب شده در سطح هدف حدود ۸٪ افزایش یابد. افزایش انرژی جذب شده منجر به افزایش حدود ۵٪ توان آلفای تولیدی شده و در نتیجه کسر مصرف سوخت حدود ۱.۵٪ افزایش می‌یابد. در نهایت بهره سوخت حدود ۱۲٪ افزایش یافت.

کلیدواژه‌ها: گداخت محصورشدگی لختی، آموزش مرکزی، کد هیدرودینامیکی MULTI-IFE، لایه کندگی دوتایی HDC-CH

Study of the double-layer high-density carbon-polystyrene ablator in the ignition of inertial fusion targets

M. Naserian, B. Khanbabaei*

Department of Physics, Damghan University, P.O. Box: 36716-41167, Damghan - Iran

Research Article

Received 2.1.2022 Accepted 8.3.2022

Abstract

High-density carbon ablator is one of the promising candidates for thermonuclear ignition in inertial confinement fusion. A double-layer polystyrene-high dense carbon ablator has been used to reduce the hydrodynamic instabilities as well as protect the fuel from the preheating phenomenon. Therefore, in this study, we investigated the optimization of a typical double ablator spherical target with an initial polystyrene ablator layer with a thickness of 37 μm by using MULTI-IFE hydrodynamic code. This target was irradiated with symmetrical laser beams with 22.7 ns pulse duration, 0.25 μm wavelength, and 1.7 MJ total pulse energy. Our calculations show that the optimal thickness of the high-density carbon is about 5.6 μm . Using a diamond ablator increases the absorbed laser energy at the target surface by approximately 8%. Increasing the absorbed energy leads to an increase of about 5% in the alpha power deposition, and as a result, the fuel burn fraction increases by about 1.5%. Eventually, fuel acquire increases by approximately 12%.

Keywords: Inertial confinement fusion, Central ignition, MULTI-IFE hydrodynamic code, HDC-CH ablator



۱. مقدمه

تاکنون در طراحی هدف‌های مورد استفاده در گداخت لختی، مواد کندی مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در این بین پلی‌استایرن^{۱۰} (CH) و کربن چگالی بالا^{۱۱} (HDC) از بهترین گزینه‌های انتخابی می‌باشند [۹-۱۰]. اگرچه ماده کندی پلی‌استایرن سهولت ساخت بالایی داشته و عمدتاً در تأسیسات ملی افروزش^{۱۲} (NIF) به عنوان لایه کندی در هدف‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما حصول فشردگی بالای سوخت در نتیجه برهم‌کنش لیزر با ماده لایه کندی جهت افروزش و اشتعال سوخت منجر به مقادیر بالای میکروناپایداری‌هایی مانند ناپایداری واپاشی دو-پلاسمون^{۱۳} می‌شود. در واقع امکان پایین نگه‌داشتن این قبیل میکروناپایداری در این شرایط دشوار است [۱۱-۱۵]. در مقابل، ماده کندی HDC به دلیل چگالی بالا، اگرچه در مقایسه با ماده کندی پلی‌استایرن نسبت به ناپایداری‌های هیدرودینامیکی‌ای هم‌چون ناپایداری ریلی-تیلور^{۱۴} تا حدودی حساس‌تر است اما خاصیت کداری مناسبی در فوتون‌های با انرژی از مرتبه الکترون‌ولت داشته و در نتیجه جذب انرژی مؤثرتری دارد. این امر سبب آهنگ بالای کندی لایه و کاهش آهنگ رشد میکرو ناپایداری‌ها می‌شود [۱۶-۱۹]. از طرفی، استفاده از HDC به عنوان لایه کندی به تنهایی موجب نازک شدن ضخامت لایه کندی می‌شود. از آنجایی که ضخامت لایه کندی می‌بایست در حدی باشد که سوخت DT را از پدیده پیش‌گرمایش^{۱۵} ناشی از پلاسمای کرونا حفظ کند، اخیراً لایه‌های دوتایی برای ماده کندی طراحی و به صورت تجربی ساخته شده است [۲۰]. استفاده از لایه کندی دوتایی سبب کاهش شیب گرادیان چگالی پوخته از لایه کندی تا سوخت شده که این به نوبه خود در کاهش ناپایداری‌های هیدرودینامیکی مانند ریلی-تیلور مؤثر است. بنابراین با توجه به این‌که استفاده از لایه کندی HDC در ایده گداخت لختی راه‌اندازی شده مستقیم اخیراً مورد توجه قرار گرفته است [۲۱]، در این پژوهش قصد داریم در یک هدف نوعی گداخت لختی، لایه کندی متداول CH را با لایه کندی HDC بیوشانیم و از آن به عنوان لایه کندی دوتایی استفاده نماییم. برای این منظور با استفاده از کد هیدرودینامیکی MULTI-IFE، ابتدا ضخامت مناسب لایه کندی HDC را یافته و سپس پارامترهای فیزیکی مهم مانند دما، چگالی، فشار و ... را در طول افروزش و اشتعال یک هدف گداخت لختی نوعی، بررسی می‌کنیم.

گداخت محصورشدگی لختی^۱ (ICF) یکی از رهیافت‌های اصلی دستیابی صلح‌آمیز به انرژی هسته‌ای است [۱]. در این ایده، کپسول حاوی چند میلی‌گرم سوخت دوتریم-تریتیم (DT) به صورت مستقیم (راه‌اندازی مستقیم^۲) یا غیرمستقیم^۳ (هولرام^۴) تحت تابش باریکه‌های پرشدت انرژی قرار می‌گیرد [۲، ۳]. در ایده گداخت به روش راه‌اندازی مستقیم، هدف عمدتاً شامل کپسول پوخته‌ای توخالی با یک لایه کندی^۵ خارجی و یک لایه سوخت برودتی^۶ همراه با بخش مرکزی (که توسط چند میلی‌گرم گاز DT پر شده است) می‌باشد. این کپسول تحت تابش متقارن باریکه‌های لیزر قرار می‌گیرد. برهم‌کنش لیزر با سطح هدف سبب می‌شود بخشی از سطح خارجی آن کنده و یونیزه شده هاله پلاسمایی به نام کرونا^۷ در اطراف سوخت ایجاد شود. در نتیجه کنده شدن سطح کپسول، نیرویی رو به داخل به سوخت وارد شده و سبب فشردگی آن تا چگالی‌هایی از مرتبه ۱۰۰۰ برابر چگالی اولیه سوخت شده و دما در مرکز قرص بالا می‌رود. در نتیجه، واکنش‌های گداخت هسته‌ای آغاز شده و ذرات آلفای تولید شده موجب گرمایش بیش‌تر سوخت شده و شرایط برای افروزش خود-نگهدار^۸ ایجاد می‌شود [۴].

هیدرودینامیک پیچیده و فرایندهای ترابرد وابسته به آن در انفجار رو به داخل^۹ در یک هدف نوعی در گداخت محصورشدگی لختی از یک سو و ابعاد بسیار بزرگ و هزینه‌های بسیار بالای دستگاه‌های تجربی و هم‌چنین پیچیدگی‌های ابزارهای آشکارسازی گداخت هسته‌ای از سوی دیگر سبب شده که استفاده از کدهای شبیه‌سازی عددی در این حوزه بسیار پرکاربرد باشد [۵-۷]. کد هیدرودینامیکی MULTI-IFE یکی از جدیدترین و به‌روزترین کدهای اعتبارسنجی شده مورد استفاده در این زمینه پژوهشی است. MULTI-IFE یک کد یک-بعدی با قابلیت طراحی هندسه‌های کروی، استوانه‌ای و تخت است که معادلات فیزیکی مورد نیاز برای شبیه‌سازی عددی و مطالعه هدف‌های گداخت لختی مانند هیدرودینامیک دودمایی، رسانش گرمایی، ترابرد چندگروهی تابش و ... را بررسی می‌کند [۸].

1. Inertial Confinement Fusion
2. Direct Drive
3. Indirect Drive
4. Hohlräum
5. Ablator
6. Cryogenic
7. Corona
8. Self-Sustain
9. Implosion

10. Polystyrene
11. High-Density-Carbon
12. National Ignition Facility
13. Two-Plasmon Decay
14. Rayleigh-Taylor
15. Preheating



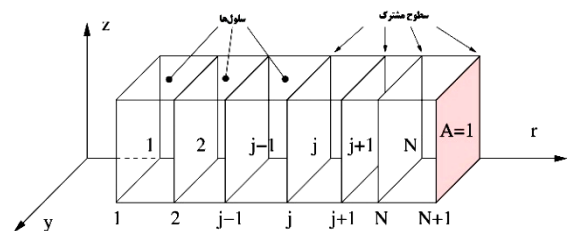
۲. معادلات اصلی شبیه سازی

در شرایط ترمودینامیکی خاصی که در ICF و آزمایش‌های مربوط به آن یافت می‌شود، ترابرد انرژی از طریق تابش گروهی نقش مهمی ایفا می‌کند. در این شرایط، میدان تابشی از طریق پدیده‌های گسیل و جذب شدیداً با حرکت‌های هیدرودینامیکی، جفت شده هستند. به منظور درک کامل فرایندهای فیزیکی که تحت این شرایط رخ می‌دهد، کدهای شبیه‌سازی توسعه یافته اند. کد MULTI-IFE امکان حل معادلات هیدرودینامیکی یک‌بعدی جفت شده با معادلات ترابرد تابشی (شامل پرتو X ، محصولات گداخت و پخش حرارتی الکترون‌ها و یون‌ها) را که نقش مهمی در بررسی آفرز و اشتعال هدف داشته به طور صحیح مدل سازی می‌کند.

با توجه به شبه خنثی بودن پلاسماهای ICF و همچنین اختلاف زیاد جرم‌های یون‌ها و الکترون‌ها، کد MULTI-IFE از مدل پلاسما دو مؤلفه‌ای (شامل یون‌ها و الکترون‌ها) برای محاسبه کمیت‌های فیزیکی مورد نظر مانند دما، فشار، انرژی داخلی و ... استفاده می‌کند. همچنین در این کد، به جای مختصه فضایی r ، از توصیف لاگرانژی سیال استفاده می‌شود. از این‌رو، مختصات جرمی به صورت زیر تعریف و به عنوان یک متغیر مستقل در نظر گرفته شده است [۲۲]:

$$\mu(r, t) = \int_0^r p(r, t) 4\pi r^2 dr \quad (1)$$

برای یک ذره در حال حرکت با سیال، مقدار μ ثابت است. این امر سبب می‌شود تا بتوان انرژی درونی الکترون‌ها $e_e(\mu, t)$ و یون‌ها $e_i(\mu, t)$ همراه با مختصات سیال $r(\mu, t)$ و سرعت $v(\mu, t)$ به عنوان متغیرهای حالت در این کد به کار رود. سایر متغیرها مانند چگالی جرمی، دما، فشار، و ... می‌توانند برحسب این متغیرها بیان شوند. معادلات بالا در کد MULTI-IFE گسسته‌سازی می‌شوند. برای این منظور ابتدا، توابع پیوسته فوق، مطابق شکل ۱ شبکه‌بندی می‌شوند. ذرات کنترل (با مقدار ثابت μ)، با تعریف یک شبکه لاگرانژی، که نشان‌دهنده سطوح کروی (که سطح مشترک نام دارند) بوده و از ۱ تا $N+1$ شماره گذاری شده‌اند، تعیین می‌شوند.



شکل ۱. شبکه‌بندی شطرنجی در مختصات تخت. کمیت‌های اسکالر درون سلول و کمیت‌های برداری در سطوح مشترک تعریف می‌شود.

توصیف سیالی پلاسما بر اساس قوانین پایستگی بیان می‌شود. معادلات پیوستگی جرم، نیرو و انرژی در کد MULTI-IFE به ترتیب عبارتند از [۸]:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \vec{v} \quad (2)$$

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla \sigma \quad (3)$$

$$\rho \frac{De}{Dt} = -\sigma \nabla \cdot \vec{v} - \nabla \cdot S_{th} + D_{ext} \quad (4)$$

که در رابطه بالا ρ چگالی جرمی، v سرعت سیال، e انرژی درونی واحد جرم، σ تانسور تنش و S_{th} شار گرمایی پلاسما است. D/Dt مشتق در چهارچوب متحرک با سیال است. معادله تکانه گسسته‌سازی شده در این کد با فرض عدم حضور منبع انرژی خارجی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda m_{j-1} \frac{dv_{j-1}}{dt} + \left(\frac{1}{2} - \lambda \right) (m_{j-1} + m_j) \frac{dv_j}{dt} + \lambda m_j \frac{dv_{j+1}}{dt} = A_j (p_{j-1} - p_j) \quad (5)$$

که m_j نشان‌دهنده جرم سلول j ، A_j مساحت‌های مربوط به سطح مشترک‌ها، P_j فشار کل سلول و λ پارامتر عددی است. انتقال حرارت الکترون‌ها و یون‌ها از طریق حل معادلات ترابرد پخشی بوده و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$m_j \frac{de_j^e}{dt} = A_j S_j^e - A_{j+1} S_{j+1}^e - m_j k_j^{ei} (T_j^e - T_j^i) + Q_j^e \quad (6)$$

$$m_j \frac{de_j^i}{dt} = A_j S_j^i - A_{j+1} S_{j+1}^i - m_j k_j^{ei} (T_j^e - T_j^i) + Q_j^i \quad (7)$$

که S_j^e و S_j^i شارهای حرارتی هستند که به ترتیب توسط الکترون‌ها و یون‌ها حمل می‌شوند. عبارت شامل ضریب k_j^{ei} ، تبادل توان بین الکترون‌ها و یون‌ها است. Q_j^e و Q_j^i نهشت انرژی در یون‌ها و الکترون‌ها در اثر جذب لیزر و گرم شدن ذرات α هستند.

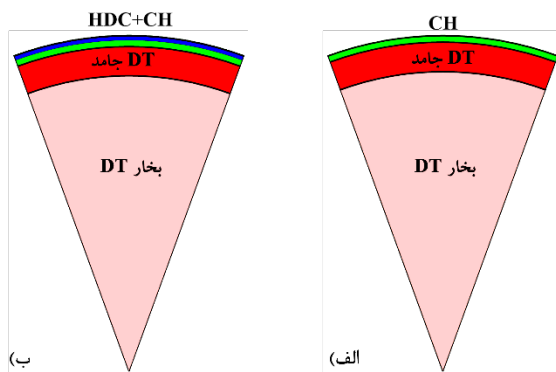
ترابرد تابش نقش مهمی در اهداف ICF دارند. در صورت دستیابی به شرایط آفرز، سرمایه‌ش تابشی بسیار مهم و حیاتی بوده و محدودیت‌های شدیدی در طراحی هدف اعمال می‌کند (مثلاً تعیین آستانه دمای حداقل ۵ keV برای آفرز). در این کد فوتون‌ها به k گروه انرژی تقسیم‌بندی شده و چگالی انرژی و شار آن به صورت زیر تعریف می‌شود:



۳. روش کار

در ایده افروزش مرکزی در روش گداخت محصورسازی لختی با راه‌انداز مستقیم لیزری، کپسول هدف به صورت کاملاً متقارن تحت تابش باریکه‌های لیزر با شدت بالا قرار می‌گیرد. این تابش منجر به کندگی سطح هدف و یونیزه‌شدن آن می‌گردد. در نتیجه این برهم‌کنش، یک انفجار رو به داخل سبب شتاب سوخت می‌شود. زمانی که سوخت در مرکز متوقف شود، انرژی جنبشی آن به انرژی درونی تبدیل خواهد شد. در این زمان سوخت شامل پوسته‌های بسیار متراکمی است که در مرکز آن یک لکه‌داغ قرار دارد. یک موج اشتعالی از نقاط داغ آغاز شده و در نتیجه تمامی سوخت افروخته شده و سبب انفجار می‌شود. طرح‌واره قطاع هدف استفاده شده در مراجع [۲۳، ۲۴] و این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است. هدف‌ها شامل کپسول پوسته‌ای توخالی با لایه کندگی و یک لایه سوخت برودتی جامد DT همراه با کاواک مرکزی (حاوی بخار DT) است. اطلاعات تکمیلی را در جدول ۱ می‌توان مشاهده نمود.

هدف مورد استفاده در این پژوهش، دارای ساختاری مشابه با هدف معرفی شده در جدول ۱ بوده و تنها به جای لایه کندگی پلی‌استایرن، از لایه کندگی دوتایی کربن‌چگالی‌بالا-پلی‌استایرن استفاده شده است. این کپسول‌ها توسط یک پالس لیزری ۲۲٫۷ ns از نور لیزر ماورای بنفش (طول موج ۰٫۲۵ μm) تحت تابش یکنواخت قرار می‌گیرد. بررسی طیف جذب کربن‌چگالی‌بالا در بازه طول موج لیزر ماورای بنفش به کار رفته در این پژوهش، نشان می‌دهد که این طول موج در حوالی قله بیشینه جذب قرار دارد [۲۵].



شکل ۲. طرح‌واره هدف DT، (الف) با لایه کندگی CH [۲۳، ۲۴] (ب) با لایه کندگی HDC+CH.

جدول ۱. مشخصات هندسه هدف استفاده شده در مراجع [۲۳، ۲۴]

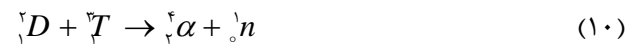
ماده لایه	ضخامت (μm)	جرم (mg)	تعداد سلول
DT بخار	۱۷۶۰	۰٫۳	۴۰
DT برودتی	۱۷	۱٫۶۸	۸۰
پلی‌استایرن	۳۷	۱٫۶۷	۹۰

$$U^k(r, t) = \frac{1}{c} \int_{v_k}^{v_{k+1}} \int_0^\pi I(r, \theta, v, t) 2\pi \sin \theta d\theta dv \quad (8)$$

$$S^k(r, t) = \int_{v_k}^{v_{k+1}} \int_0^\pi \cos \theta I(r, \theta, v, t) 2\pi \sin \theta d\theta dv \quad (9)$$

که در رابطه بالا C سرعت نور، θ زاویه بین جهت انتشار فوتون و جهت شعاعی است و $I(r, \theta, v, t)$ شدت طیف یا همان شار انرژی در واحد زاویه فضایی و فرکانس است.

در کد MULTI-IFE اشتعال گرمایسته‌ای سوخت هم‌مولار DT مطابق واکنش زیر صورت می‌پذیرد:



آهنگ تغییرات چگالی یون‌ها توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial n_D}{\partial t} = -n_D \nabla \cdot \vec{v} - \langle \sigma v \rangle_{DT} n_D^2 \quad (11)$$

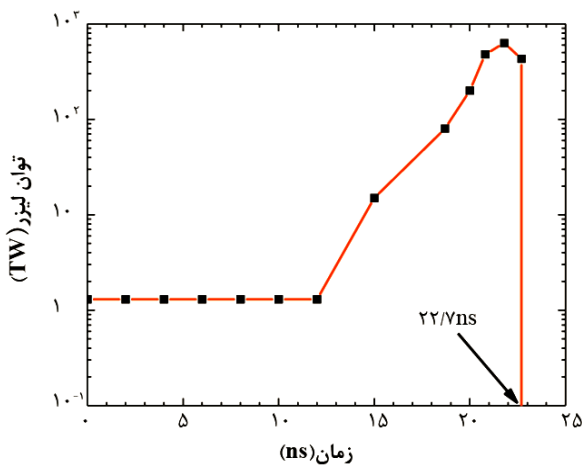
که در رابطه بالا \vec{v} سرعت سیال و $\langle \sigma v \rangle_{DT} n_D^2$ تعداد واکنش‌ها در واحد زمان در واحد حجم را نشان می‌دهد. $\langle \sigma v \rangle_{DT}$ واکنش‌پذیری نام دارد. در هر واکنش DT، ۸۰٪ انرژی واکنش توسط نوترون‌ها، بدون آن‌که برهم‌کنش قابل توجهی با پلاسمای سوخت داشته باشند، هدر می‌رود. ذرات آلفا با انرژی $E_\alpha = 3.5 \text{ MeV}$ دارای انرژی واحد حجم E_α هستند. تبارد این ذرات درون پلاسما از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۱]:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{E_\alpha}{\rho} \right) + \rho P_\alpha \frac{\partial \rho^{-1}}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{S}_\alpha - \frac{E_\alpha}{\tau_\alpha} + Q_\alpha \quad (12)$$

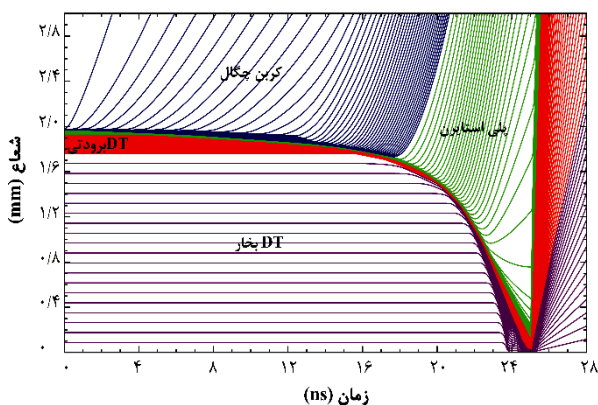
که در رابطه بالا P_α فشار جنبشی، $Q_\alpha = \epsilon_0 \langle \sigma v \rangle n_D^2$ بخشی از چگالی توان گرمایسته‌ای که به ذره آلفا می‌رسد، $\frac{E_\alpha}{\tau_\alpha}$ چگالی توان اتلافی انتقال یافته به پلاسما که میان یون‌ها و الکترون‌ها تقسیم می‌شود، τ_α زمان واهلش ذرات آلفا در پلاسمای سوخت و S_α شار انرژی ذرات آلفا است.

این دسته معادلات در هر سلول، در گام زمانی تعیین شده، محاسبه می‌شود. جزییات بیشتر نحوه گسسته‌سازی و حل دسته معادلات را می‌توان در مراجع [۸، ۲۲] یافت.





شکل ۳. توان پالس لیزر فرودی برحسب زمان.



شکل ۴. تحول مکانی سلول‌های لاگرنژی برحسب زمان در مرحله انفجار در داخل برای هدف شکل ۱ ب.

انرژی لیزر توسط فرایند تابش ترمزی معکوس جذب کپسول هدف می‌شود. از آنجایی که این فرایند متناسب با میانگین توان دوم بار یون‌ها (یعنی $\langle Z^2 \rangle$) است، استفاده از مواد با Z بالاتر سبب جذب بهتر انرژی باریکه لیزر می‌شود [۲۹]. جذب بالاتر انرژی لیزر در سطح لایه کندگی موجب بالاتر رفتن دمای پلاسمای کرونا اطراف هدف شده و این امر به نوبه خود موجب بالاتر رفتن آستانه ناپایداری واپاشی دو- پلاسمون^۱ می‌شود. از طرفی باید توجه داشت که استفاده از لایه کندگی با Z بالا به علت افزایش تابش‌های اتلافی، سبب کاهش رسانش گرمایی از پلاسمای ناحیه جذب انرژی تا جبهه کندگی می‌شود. همچنین استفاده از لایه‌های کندگی با Z بالاتر سبب کاهش ضخامت لایه کندگی در مقایسه با لایه کندگی متداول‌تر پلی‌استایرن می‌شود. همان‌گونه که قبل‌تر نیز اشاره شد، از آنجایی که ضخامت لایه کندگی می‌بایست در حدی باشد که

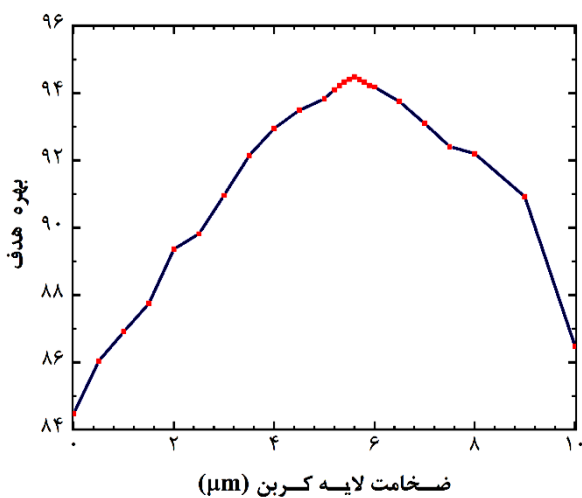
آستانه تخریب یکی از مباحث مهم در برهم‌کنش لیزرهای پرتوان با هدف‌ها است. چرا که عاملی تعیین‌کننده در طراحی و ساخت هدف‌ها است. تخریب ناشی از لیزر معمولاً از طریق دو سازوکار حرارتی و الکتریکی توصیف می‌شود. برای لیزرهای پیوسته و یا پالس‌های لیزری با طول پالس بلندتر از ۵۰ ps سازوکار حرارتی برقرار است به گونه‌ای که ابتدا موجب یونیزاسیون و سپس کندگی سطح هدف می‌شود [۲۶، ۲۷]. آستانه تخریب در لیزر با مشخصات بالا برای ماده‌های کندگی به کار رفته در این پژوهش از مرتبه چند J/cm^2 است. به عنوان مثال آستانه تخریب کربن چگالی بالا برای لیزر با طول موج μm ۰٫۲۵ و طول پالس ۲۲/۷ ns حدود $3 J/cm^2$ است [۲۸]. از آنجایی که توان لیزر به کار رفته در این شبیه‌سازی بسیار بالاتر از آستانه تخریب ماده‌های کندگی پلی‌استایرن و کربن چگالی بالا استفاده شده در این پژوهش است، فرایندهای یونیزاسیون و کندگی مورد نظر توسط باریکه‌های لیزر صورت می‌پذیرد.

تغییرات توان پالس فرودی برحسب زمان در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است، تپ فرودی با یک پیش‌پالس ۱۲ ns با توان ۱/۳ TW آغاز شده و سپس به تدریج به بیشینه ۶۰۰ TW می‌رسد. انرژی کل پالس فرودی در حدود ۱/۷ MJ است.

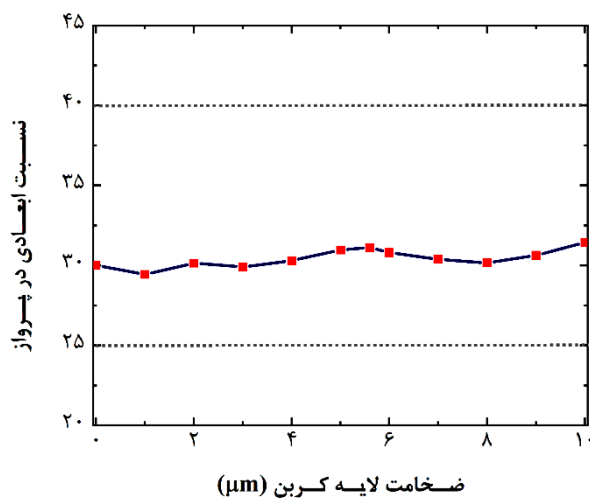
همان‌گونه که قبل‌تر اشاره شد، تابش متقارن و یکنواخت پالس لیزری سبب انفجار رو به داخل پوسته هدف می‌شود. انفجار رو به داخل در شکل ۴ به صورت نمودار شارش نشان داده شده است. در شبیه‌سازی کره هدف به صورت شعاعی به سلول‌های جرمی تقسیم‌بندی شده و مسیرهای سطوح مشترک سلول‌های منتخب در صفحه شعاع- زمان رسم شده است. با گرم شدن سطح هدف توسط پالس لیزر فرودی، سلول‌های بیرونی لایه کندگی (کربن چگالی بالا) تبخیر، یونیزه و منبسط می‌شوند. در نتیجه این عمل، بخش داخلی کنده نشده تحت فشار کندگی ایجاد شده، به سمت داخل متراکم می‌شود. افزایش توان لیزر در زمان‌های بعدی سبب شتاب‌گیری لایه‌های داخلی می‌شود. پس از خاموش شدن پالس لیزر، لایه با سرعت ثابت به سمت مرکز کاواک حرکت نموده و در زمان تقریبی ۲۴ ns به مرکز آن رسیده، ایستا شده و به دما و فشار لازم جهت افروزش سوخت می‌رسد.



قابل توجهی نخواهد داشت [۳۱]. شکل ۶ نسبت ضخامت ابعادی در پرواز هدف مورد استفاده در این پژوهش را برحسب ضخامت بخش بیرونی (کربن چگالی بالا) لایه کندگی نشان می‌دهد. خط چین‌های افقی رسم شده در شکل، محدوده مجاز نسبت ابعادی در پرواز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، برای هدف با لایه کندگی دوتایی و ضخامت لایه کربن چگال $5.6 \mu\text{m}$ شرط نسبت ابعادی در پرواز دارای مقادیر مجاز بوده و از این رو می‌توان اطمینان حاصل نمود که اغتشاشات تأثیر چندانی بر افروزش و اشتعال هدف نخواهد داشت. در نتیجه بهره سوخت و پارامترهای فیزیکی، برای هدف طراحی شده در این پژوهش دارای اعتبار است.



شکل ۵. تغییرات بهره سوخت برحسب ضخامت لایه کندگی دوتایی کربن چگالی بالا - پلی استایرن.



شکل ۶. تغییرات نسبت ابعادی در پرواز برحسب ضخامت لایه کندگی دوتایی کربن چگالی بالا - پلی استایرن.

سوخت DT را از پدیده پیش‌گرمایش ناشی از پلاسمای کرونا حفظ کند، بنابراین هدف با لایه کندگی پلی استایرن را با ضخامت مناسبی از لایه کربن چگالی بالا پوشش داده و به عنوان لایه دوتایی به کار می‌بریم. با توجه به جذب بهتر انرژی لیزر در مواد با Z بالاتر، کربن چگالی بالا به عنوان بخش بیرونی و پلی استایرن به عنوان بخش درونی لایه دوتایی به کار رفته است. ضخامت بهینه لایه کندگی (که در آن بهره هدف بیشینه می‌شود) به انرژی لیزر بستگی دارد. این ضخامت بهینه توسط اثر متقابل فرایندهای فیزیکی بازدهی جذب لیزر، تابش‌های اتلافی، رسانش گرمایی الکترون‌ها از ناحیه جذب لیزر تا جبهه کندگی و بازدهی کندگی تعیین می‌شود. فرایند جذب انرژی لیزر در سطح هدف از طریق تابش ترمزی معکوس است [۲۹]. شکل ۵ تغییرات پارامتر مهم بهره هدف شامل را به ازای ضخامت‌های مختلف لایه کربن چگالی بالا نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، بهره هدف در ضخامت تقریبی $5.6 \mu\text{m}$ دارای بیشینه مقدارش است.

شبیه‌سازی‌های یک‌بعدی به علت فرض حفظ تقارن کروی در طول زمان شبیه‌سازی، ایده‌آل هستند. اما در عمل ناهمسانی‌های کوچک در تابش‌دهی می‌تواند سبب عدم تقارن‌های انفجاری بزرگ شود. هم‌چنین ناپایداری‌های هیدرودینامیکی محدودیت‌های مهمی در طراحی هدف‌های ICF ایجاد می‌کند. زیرا اغتشاشات سیالی می‌تواند تأثیر عمده‌ای در تشکیل لکه‌داغ و شکل هندسی آن داشته باشد. از آنجایی که جهت محاسبه این قبیل ناپایداری‌ها به حداقل دو بعد نیاز است، از این رو کدهای هیدرودینامیکی یک‌بعدی به طور مستقیم قادر به محاسبه این قبیل ناپایداری‌ها نیستند. برای اطمینان از صحت عملکرد کدهای یک‌بعدی از پارامترهای کنترلی استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین آن‌ها نسبت ابعادی در پرواز^۱ است که به صورت $\frac{R_{y_f}}{\Delta R_{y_f}}$ تعریف می‌شود [۳۰].

که در آن R_{y_f} شعاع میانگین چگالی بیشینه پوسته و ΔR_{y_f} ضخامت پوسته است، هنگامی که پوسته تقریباً به اندازه یک‌سوم شعاع اولیه، در اثر انفجار رو به داخل، حرکت کرده است. شبیه‌سازی‌های متعدد نشان داده که اگر مقدار نسبت ابعادی در پرواز بین ۲۵ تا ۴۰ شود، پوسته در حین فرایند انفجار رو به داخل، دچار شکستگی و اغتشاش غیر قابل کنترل نمی‌شود. در نتیجه در این حالت نتایج کد یک‌بعدی با نتایج تجربی اختلاف

1. In Flight Aspect Ratio



۴. نتایج

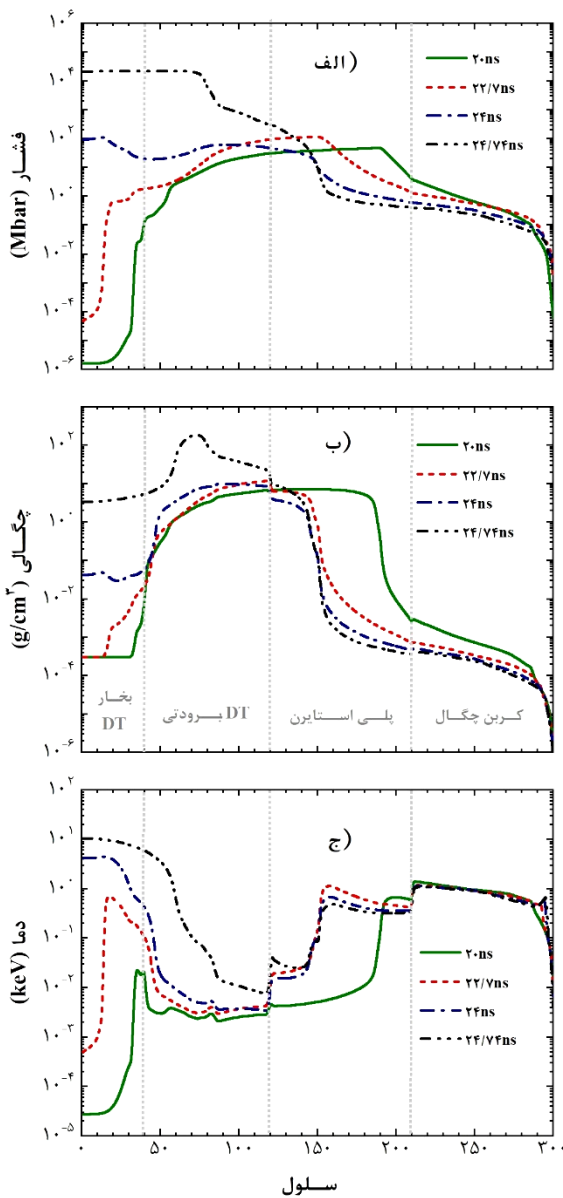
جدول ۲ مشخصات هندسه و جرم‌های لایه‌های به کار رفته در هدف، در این پژوهش را نشان می‌دهد. ضخامت بهینه کربن چگالی بالا $5/6 \mu\text{m}$ همراه با $37 \mu\text{m}$ لایه پلی استایرن تشکیل لایه کندگی دوتایی معادل با $2/29 \text{ mg}$ یعنی حدود $1/36$ برابر جرم تک لایه کندگی پلی استایرن به کار رفته در شبیه‌سازی قبلی است. در این بخش ابتدا افروزش هدف با لایه کربن چگالی بالا را بررسی نموده و سپس پارامترهای فیزیکی مؤثر در افروزش و اشتعال را با هدف با لایه کندگی پلی استایرن مقایسه می‌کنیم.

شکل ۷ زنجیره‌های مقاطع سلول‌های لاگرانژی چگالی، دمای یون‌ها و فشار کل را در طول مراحل شتاب‌گیری $(t=20 \text{ ns}$ و $t=22/7 \text{ ns})$ ، پس از بازجهش اولین موج ضربه‌ای در مرکز $(t=24 \text{ ns})$ و در حدود زمان افروزش سوخت $(t=24/74 \text{ ns})$ را نشان می‌دهد. شکل ۷- الف فشار کندگی ایجاد شده، در نتیجه برهم‌کنش لیزر با هدف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود، فشار کندگی در پایان زمان تابش لیزر $(22/7 \text{ ns})$ ، در ناحیه پوسته به بیش از 100 Mbar می‌رسد. این فشار سبب حرکت پوسته به سمت داخل و تراکم آن می‌شود. هنگامی که امواج ضربه‌ای به مرکز هدف رسیده و رو به بیرون منعکس می‌شوند $(t=24 \text{ ns})$ ، بخار DT را تا دمای بالاتر از 4 keV گرم می‌کند. در زمان حدود $24/74 \text{ ns}$ فشار قله از حدود 200 Gbar تجاوز نموده و دمای یون‌ها به دمای افروزش می‌رسد.

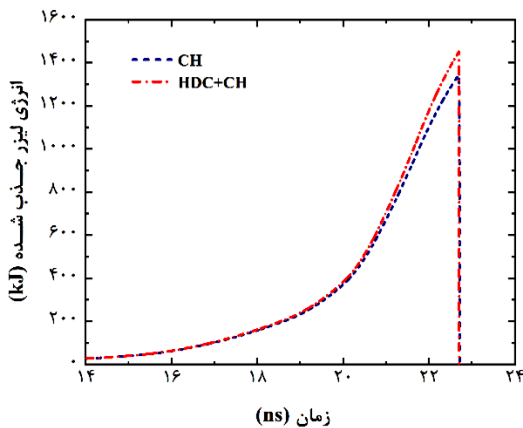
شکل ۸ انرژی لیزر جذب شده برحسب زمان در طول پالس لیزر فرودی برای لایه کندگی پلی استایرن و لایه کندگی دوتایی کربن چگالی بالا- پلی استایرن نشان می‌دهد. همان‌گونه که قبل‌تر اشاره شد، فرایند جذب انرژی لیزر از طریق تابش ترمزی معکوس بوده و با $\langle Z^2 \rangle$ متناسب است. از این‌رو جذب انرژی لیزر در لایه کندگی دوتایی کربن چگالی بالا- پلی استایرن بالاتر از تک لایه کندگی پلی استایرن است. انرژی لیزر جذب شده در هدف با لایه کندگی دوتایی کربن چگالی بالا- پلی استایرن حدود 108 kJ بیش‌تر از هدف با لایه پلی استایرن، در زمان خاموش شدن لیزر است.

جدول ۲. مشخصات هندسه هدف استفاده شده با لایه کندگی دوتایی

ماده لایه	ضخامت (μm)	جرم (mg)	تعداد سلول
DT بخار	1760	0.3	40
DT برودتی	17	1.68	80
پلی استایرن	37	1.67	90
کربن چگالی بالا	5.6	0.62	90

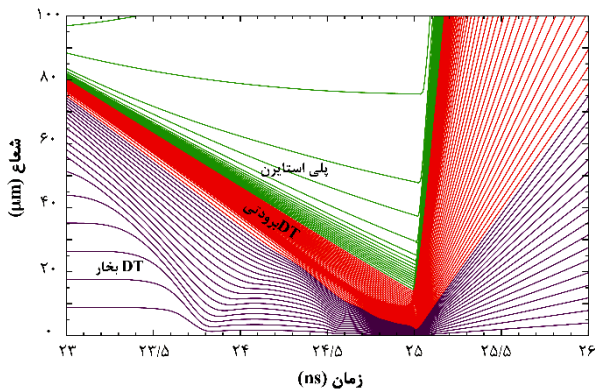


شکل ۷. زنجیره مقاطع سلول لاگرانژی، الف) فشار ب) چگالی ج) دمای یون‌ها در طول انفجار رو به داخل در زمان‌های مختلف.



شکل ۸. انرژی کل لیزر جذب شده در طول زمان تابش پالس لیزر به ازای ماده کندگی دوتایی کربن چگالی بالا- پلی استایرن و ماده کندگی تک لایه پلی استایرن.





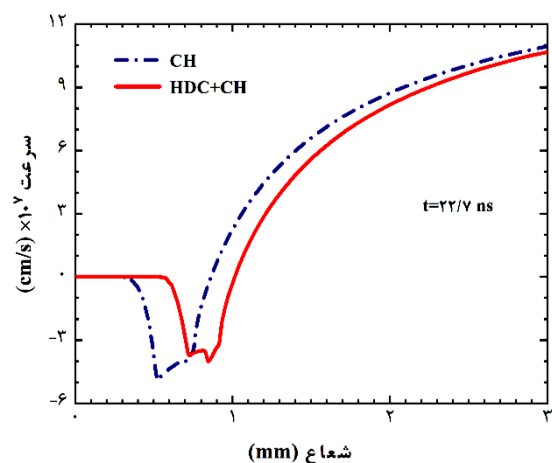
شکل ۱۰. نمودار خطوط لاگرانژی در آخرین مرحله انفجار رو به داخل، ایستایی و اشتعال در هدف با ماده کندی دوتایی کربن چگالی بالا- پلی استایرن.

شکل ۱۱ تغییرات انرژی جنبشی میانگین را در آخرین مرحله انفجار رو به داخل، ایستایی و اشتعال نشان می‌دهد. به منظور مقایسه، این تغییرات برای هدف با لایه کندی پلی استایرن نیز رسم شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت لکه‌داغ در هدف با لایه کندی دوتایی (در مقایسه با لایه کندی پلی استایرن) حدود 0.5 ns دیرتر تشکیل می‌شود. علت این امر، جرم سنگین‌تر لایه کندی دوتایی در مقایسه با لایه کندی پلی استایرن است. زیرا برای شتاب دادن هر دو هدف با لایه‌های کندی متفاوت (دوتایی و پلی استایرن) از توان و انرژی لیزر یکسانی استفاده شده است.

پروفایل چگالی پوسته برحسب شعاع در زمانی که هر دو هدف برای اولین بار به دمای 10 keV رسیده‌اند در شکل ۱۲ رسم شده است. افزایش بیشینه چگالی در ساختار سوخت با لایه کندی دوتایی به علت استفاده از کربن چگالی بالا در مقایسه با سوخت با لایه کندی پلی استایرن کاملاً مشهود است. در هر دو ساختار، شعاع تقریبی لکه‌داغ تشکیل شده حدود $100 \mu\text{m}$ است. در این حالت، هدف با لایه کندی دوتایی با توجه به این‌که با چگالی بالاتری لکه‌داغ را احاطه کرده است، ذرات آلفای تولید شده در داخل لکه‌داغ احتمال فرار کم‌تری به خارج از محیط داشته و در نتیجه در حالت کلی در این حالت افزایش دمای بیش‌تری را لکه‌داغ تجربه خواهد کرد. افزایش حدود 4.6 keV در بیشینه دمای لکه‌داغ در سوخت با لایه کندی دوتایی در قیاس با سوخت با لایه کندی تک لایه پلی استایرن، مؤید این مطلب است.

شکل ۹ سرعت حرکت شاره (پوسته) را برحسب شعاع نشان می‌دهد. پلاسمای کندی یافته با سرعت‌های زیاد (مقادیر مثبت) منبسط شده و پوسته (مقادیر سرعت منفی) به داخل شتاب داده می‌شود. نکته مهم در خصوص سرعت انفجار رو به داخل آن است که با وجود آن‌که افزایش سرعت انفجار رو به داخل سبب افزایش دمای لکه‌داغ تشکیل شده می‌شود، اما از طرفی ناپایداری‌های هیدرودینامیکی را افزایش داده و یکنواختی پوسته را از بین می‌برد. علت کم‌تر بودن سرعت انفجار درونی در هدف با لایه کندی دوتایی سنگین‌تر بودن آن (2.29 mg) در قیاس با لایه کندی پلی استایرن (1.67 mg) است.

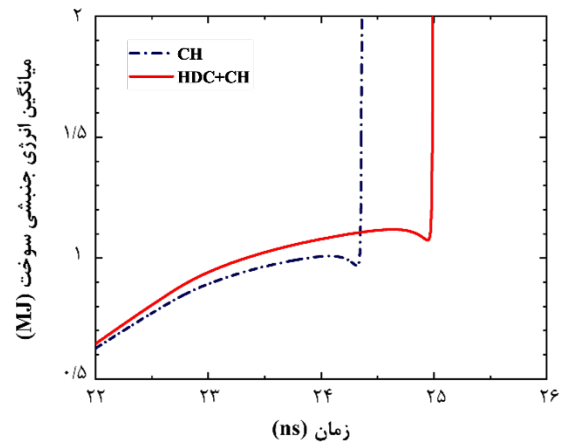
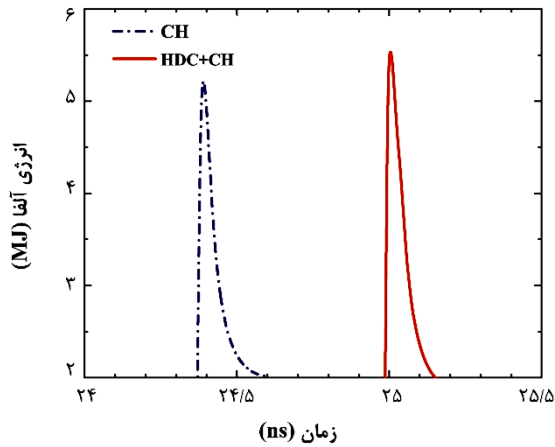
شکل ۱۰ مراحل پایانی انفجار درونی، ایستایی پوسته و اشتعال هدف با لایه کندی دوتایی را در بازه زمانی $23-26$ ns نمایش می‌دهد. در انتهای پالس لیزری، پوسته به سرعت بالایی رسیده و در همان زمان یک موج ضربه‌ای قوی در میان گاز منتشر می‌شود. این موج ضربه‌ای مطابق شکل در زمان تقریبی 24 ns به مرکز هدف رسیده و از آن منعکس می‌شود. خطوط افقی بخار DT در نواحی نزدیک به مرکز هدف، بعد از این زمان نشان‌دهنده ایستایی بخار DT است. موج بازتاب شده از مرکز به سطح داخل پوسته برخورد نموده و سبب می‌شود تا پوسته در حال تراکم، شتاب منفی پیدا کند. در بازه زمانی میان $24.1-24.74$ ns انرژی جنبشی پوسته به انرژی درونی تبدیل شده و چگالش بالا می‌رود. سپس لکه‌داغ در مرکز آن تشکیل شده، افروزش در سوخت صورت گرفته و در نهایت سوخت مشتعل می‌شود.



شکل ۹. سرعت شاره برحسب شعاع در لحظه خاموش شدن پالس لیزر به ازای ماده کندی دوتایی کربن چگالی بالا- پلی استایرن و ماده کندی تک لایه پلی استایرن.

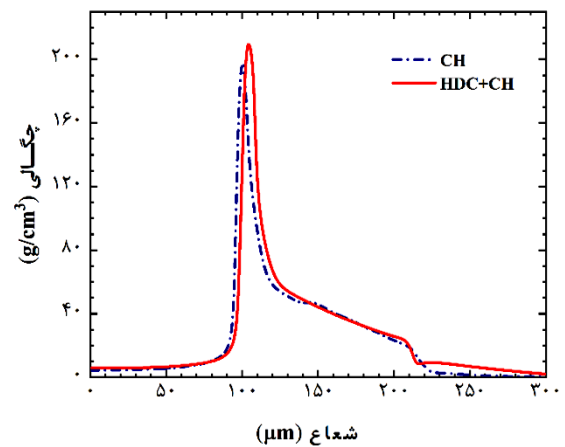


جدول ۳ مقایسه‌ای میان سایر پارامترهای مهم به دست آمده در این شبیه‌سازی را با مراجع [۲۳، ۲۴] به صورت جمع‌بندی شده نشان می‌دهد.

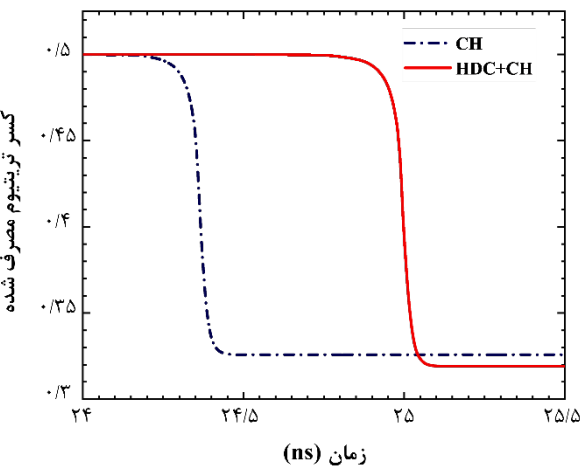


شکل ۱۱. تغییرات میانگین انرژی جنبشی و انرژی درونی در آخرین مرحله انفجار رو به داخل، ایستایی و اشتعال.

شکل ۱۳. انرژی آلفای تولید شده به ازای ماده کندی دوتایی کربن چگالی بالا-پلی استایرن و ماده کندی تک لایه پلی استایرن.



شکل ۱۲. تغییرات چگالی برحسب شعاع در لحظه‌ای که هر دو هدف به دمای ۱۰ keV می‌رسند.



شکل ۱۴. کسر تریتم مصرفی به ازای ماده کندی دوتایی کربن چگالی بالا-پلی استایرن و ماده کندی تک لایه پلی استایرن.

شکل ۱۳ انرژی آلفای تولید شده در نتیجه واکنش‌های گداخت DT در زمان اشتعال سوخت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است انرژی آلفای تولیدی در حالتی که از لایه کندی دوتایی استفاده شده است حدود ۵ درصد بیش از تک لایه پلی استایرن است. علت این امر دمای بالاتر لکه‌داغ در ساختار سوخت با لایه کندی دوتایی می‌باشد. محاسبات نشان می‌دهد که بیشینه دمای لکه‌داغ در سوخت با لایه کندی دوتایی حدود ۴/۶ keV بیش‌تر از سوخت با لایه کندی تک لایه پلی استایرن است.

شکل ۱۴ کسر تریتم مصرفی را به ازای هر دو پیکربندی لایه کندی برحسب زمان در طول زمان افروزش و اشتعال نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، پیکربندی لایه کندی دوتایی سبب شده که کسر مصرف سوخت حدود ۱/۵٪ افزایش یابد. این امر به نوبه خود سبب افزایش بهره هدف خواهد شد.

جدول ۳. مقایسه پارامترها و عملکرد هدف‌های شبیه‌سازی شده

پارامتر	هدف با ماده کندی پلی استایرن	هدف با ماده کندی دوتایی کربن چگالی بالا-پلی استایرن
بیشینه دمای یون‌ها (keV)	۱۵۵٫۷	۱۶۰٫۳
بیشینه دمای الکترون‌ها (keV)	۶۶٫۶	۶۸٫۱
بیشینه انرژی جنبشی سوخت (MJ)	۲۶٫۹۷	۲۸٫۴۳
انرژی لیزر جذب شده (MJ)	۱٫۳۵	۱٫۵
انرژی گداخت آزاد شده (MJ)	۱۴۵٫۰۹	۱۵۰٫۳۱
بهره سوخت	۸۴	۹۴



۵. جمع‌بندی

مراجع

1. C.B. Edwards, et al. *Inertial confinement fusion and prospects for power production*, *High Power Laser Sci. Eng.*, **3**, 1 (2015).
2. R.L. McCrory, et al., *Progress in direct-drive inertial confinement fusion*, *Phys. Plasmas*, **15**, 055503 (2008).
3. J. Lindl, *Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain*, *Phys. Plasmas*, **2**, 3933 (1995).
4. R.L. McCrory, et al., *Progress in direct-drive inertial confinement fusion*, *Phys. Plasmas*, **15**, 055503 (2008).
5. J. Breil, et al., *Multi-material ALE computation in inertial confinement fusion code CHIC*, *Comput. Fluids*, **46**, 161 (2011).
6. S. Peng, et al., *LARED-Integration code for numerical simulation of the whole process of the indirect-drive laser inertial confinement fusion*, *High Power Laser and Particle Beams*, **27**, 032007 (2015).
7. R.W. Paddock, et al., *One-dimensional hydrodynamic simulations of low convergence ratio direct-drive inertial confinement fusion implosions*, *Philos. T. Roy. Soc., A*, **379**, 20200224 (2020).
8. R. Ramis, J. Meyer-ter-Vehn, *MULTI-IFE—A one-dimensional computer code for Inertial Fusion Energy (IFE) target simulations*, *Comput. Phys. Commun.*, **203**, 226 (2016).
9. S.W. Haan, *Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility*, *Phys. Plasmas*, **18**, 051001 (2011).
10. J. Nilsen, *Understanding the effects of radiative preheat and self-emission from shock heating on equation of state measurement at 100s of Mbar using spherically converging shock waves in a NIF hohlraum*, *Matter and Radiation at Extremes*, **5**, 018401 (2020).
11. L.B. Hopkins, et al., *Increasing stagnation pressure and thermonuclear performance of inertial confinement fusion capsules by the introduction of a high-Z dopant*, *Phys. Plasmas*, **25**, 080706 (2018).
12. V.A. Smalyuk, et al., *Hydrodynamic instability growth and mix experiments at the National Ignition Facility*, *Phys. Plasmas*, **21**, 056301 (2014).
13. V.A. Smalyuk, et al., *Review of hydrodynamic instability experiments in inertially confined fusion implosions on National Ignition Facility*, *Plasma Phys. Control*, **62**, 014007 (2020).
14. H. Louis, et al., *Miniature Targets for Hydrodynamic Instability Experiments on Nova*, *Fusion Sci. Technol.*, **28**, 1833 (1995).

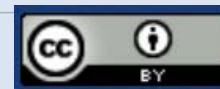
شبهه‌سازی‌ها نقش مهمی را در طراحی نیروگاه‌های گداخت لختی دارند. برای آن‌که این نیروگاه‌ها بتوانند به صورت اقتصادی فعالیت کنند، هدف‌های گداخت لختی می‌بایست بهره‌بردارایی داشته باشند. برای این منظور کدهای هیدرودینامیکی به صورت گسترده‌ای به کار می‌رود. از این‌رو در این پژوهش بهینه‌سازی یک هدف گداخت لختی با لایه کندگی تک لایه پلی‌استایرن مورد مطالعه قرار گرفت. کربن‌چگالی بالا به دلیل ساختار فیزیکی منحصر به فردی که دارد، اخیراً مورد توجه محققین در طراحی هدف‌های گداخت لختی قرار گرفته است. از این‌رو در این پژوهش کربن‌چگالی بالا را به صورت لایه اضافی همراه با پلی‌استایرن به صورت لایه کندگی دوتایی به کار بردیم. سپس با بررسی بهره‌دهی، ضخامت بهینه این لایه محاسبه شد. بررسی‌ها نشان داد که زمان تشکیل لکه‌داغ در هدف با لایه کندگی دوتایی (در مقایسه با لایه کندگی تک لایه پلی‌استایرن) حدود ۰/۵ ns دیرتر است. این امر ناشی از سنگین‌تر بودن لایه کندگی دوتایی در مقایسه با تک لایه کندگی پلی‌استایرن است. لایه کندگی کربن‌چگالی بالا جذب انرژی لیزر بالاتری در مقایسه با لایه کندگی پلی‌استایرن دارد. هم‌چنین نسبت ابعادی در پرواز در لایه کندگی دوتایی شرایط بهینه‌تری دارد. از این‌رو، در طول فرایند انفجار رو به داخل، ساختار سوخت وضعیت بهتری داشته و اغتشاشات و ناپایداری‌های هیدرودینامیکی تأثیر کم‌تری خواهند داشت. در نتیجه با توجه به چگالی بالاتر، ساختار سوخت را در این بازه زمانی بهتر حفظ می‌کند. این امر موجب می‌شود که لکه‌داغ در لایه کندگی دوتایی در قیاس با پلی‌استایرن، بیشینه دمای بالاتری داشته و مقدار سوخت بیش‌تری در زمان افروزش مصرف شود. همه این موارد منجر به افزایش بهره‌دهی هدف خواهد شد. از این‌رو به نظر می‌رسد کربن‌چگالی بالا ماده مناسبی جهت استفاده در طراحی‌های هدف‌های گداخت لختی باشد.



15. C. R. Weber, et al., *First Measurements of Fuel-Ablator Interface Instability Growth in Inertial Confinement Fusion Implosions on the National Ignition Facility*, *Phys. Rev. Lett.*, **117**, 159902 (2016).
16. J. Biener, *Diamond ablaters for inertial confinement fusion*, *Fusion Sci. Technol.*, **49**, 737 (2006).
17. A.B. Zylstra, et al., *Record Energetics for an Inertial Fusion Implosion at NIF*, *Phys. Rev. Lett.*, **126**, 025001 (2021).
18. L.F.B. Hopkins, et al., *First High-Convergence Cryogenic Implosion in a Near-Vacuum Hohlraum*, *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 175001 (2015).
19. J.L. Kline, et al., *Progress of indirect drive inertial confinement fusion in the United States*, *Nuclear Fusion*, **59**, 11 (2019).
20. X. Qiao, *Novel Target Designs to Mitigate Hydrodynamic Instabilities Growth in Inertial Confinement Fusion*, *Phys. Rev. Lett.*, **126**, 185001 (2021).
21. H.D. Whitley, et al., *Comparison of ablaters for the polar direct drive exploding pusher platform*, *High Energy Density Phys.*, **38**, 100928 (2021).
22. R. Ramis, *One-dimensional Lagrangian implicit hydrodynamic algorithm form Inertial Confinement Fusion applications*, *J. Comput. Phys.*, **330**, 173 (2017).
23. R.L. McCrory, C.P. Verdon, *Inertial Confinement Fusion, Proceedings of the Course and Workshop*, (Eds. Caruso and E. Sindoni, 1988), 83-123.
24. S. Atzeni, J. Meyer-ter-Vehn, *The physics of inertial fusion*, 1st ed. (Clarendon Press, Oxford, 2004).
25. K.S. Kumar, et al., *Microwave Assisted Synthesis and Characterizations of Decorated Activated Carbon*, *Int. J. Electrochem. Sci.*, **7**, 5484 (2012).
26. B.C. Stuart, et al., *Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics*, *Phys. Rev.*, B **53**, 4 (1996).
27. B.C. Stuart, et al., *Optical ablation by high-power shortpulse lasers*, *JOSA*, B **13**, 459 (1996).
28. B. Ali Khan, et al., *Femtosecond laser micromachining of diamond: current research status, applications and challenges*, *Carbon*, **179**, 209 (2021).
29. V.N. Goncharov, *Improving the hot-spot pressure and demonstrating ignition hydrodynamic equivalence in cryogenic deuterium-tritium implosions on OMEGA*, *Phys. Plasmas*, **21**, 056315 (2014).
30. S. Pfalzner, *An Introduction to Inertial Confinement Fusion*, (CRC Press, Taylor & Francis, 2006).
31. R.S. Craxton, *Direct-drive inertial confinement fusion: A review*, *Phys Plasmas*, **22**, 110501 (2015).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

مریم ناصریان، بابک خان بابائی (۱۴۰۲)، مطالعه نقش لایه کندگی دوتایی کربن چگالی بالا- پلی استایرن در اشتعال هدف‌های گداخت لختی، ۱۰۴، ۱۱۶-۱۲۶

DOI: 10.24200/nst.2023.1375

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1375.html

