



## مطالعه دینامیک افروزش و اشتعال هدف گداخت لختی با لایه کندگی الماس با استفاده از کد هیدرودینامیکی MULTI-IFE

سیده مبینا حسینی، بابک خان بابائی\*

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

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

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۹/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۰/۲۰

### چکیده

افروزش مرکزی یکی از ایده‌های اصلی گداخت محصورشدگی لختی است و در آن هدف تحت تابش متقارن و یکنواخت باریکه‌های لیزری قرار می‌گیرد. مطالعه طراحی لایه‌های هدف، با استفاده از کدهای هیدرودینامیکی، در بهبود عملکرد هدف و بهره سوخت از اهمیت زیادی برخوردار است. از این‌رو در پژوهش حاضر، بهینه‌سازی یک هدف کروی دلخواه با لایه کندگی پلی‌استیرن با استفاده از کد هیدرودینامیکی MULTI-IFE مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به خواص فیزیکی قابل توجه الماس، از آن برای بهینه‌سازی لایه کندگی استفاده شده است. این هدف تحت تابش باریکه‌های متقارن لیزر با انرژی کل ۱.۷ MJ و بیشینه توان حدودی ۶۰۰ TW قرار گرفت. محاسبات نشان داد که ضخامت بهینه الماس حدود ۱۸  $\mu\text{m}$  است. استفاده از لایه کندگی الماس سبب می‌شود که انرژی لیزر جذب شده در سطح هدف حدود ۱۶٪ افزایش یابد. افزایش انرژی جذب شده منجر به افزایش حدود ۴٪ بیشینه دمای یون‌ها شده و در نتیجه کسر مصرف سوخت حدود ۱٪ افزایش می‌یابد. در نهایت بهره سوخت افزایش حدود ۹٪ را نشان داد.

**کلیدواژه‌ها:** گداخت محصورشدگی لختی، افروزش مرکزی، کد هیدرودینامیکی MULTI-IFE، لایه کندگی الماس

## Study of ignition and burn dynamics of inertial fusion target with diamond ablator using MULTI-IFE hydrodynamic code

S.M. Hosseini, B. Khanbabaei\*

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

Research Article

Received 23.11.2020, Accepted 9.1.2021

### Abstract

Central ignition is one of the main ideas of inertial confinement fusion in which the target is irradiated symmetrically and uniformly by laser beams. The study of target layer design using hydrodynamic codes is very important in improving target performance and fuel gain. Therefore, in the present study, we investigated the optimization of a typical spherical target with a polystyrene ablator by using MULTI-IFE hydrodynamic code. Considering the remarkable physical properties of diamond, it has been used to optimize the ablator layer. This target was irradiated with symmetrical laser beams with 1.7 MJ total pulse energy and peak power of about 600 TW. The results show that the optimal thickness of the diamond is about 18  $\mu\text{m}$ . A diamond ablator increases the absorbed laser energy at the target surface by about 16%. Increasing the absorbed energy leads to an increase of about 4% in the maximum temperature of the ions, and as a result, the fuel burn fraction increases by about 1%. Eventually, fuel gain increases by about 9%.

**Keywords:** Inertial confinement fusion, Central ignition, MULTI-IFE hydrodynamic code, Diamond ablator



## ۱. مقدمه

گداخت محصورشدگی لختی<sup>۱</sup> (ICF) یکی از ایده‌های اصلی تولید انرژی مورد نیاز بشر در آینده است [۱]. تولید انرژی در این ایده بر مبنای انفجار رو به داخل<sup>۲</sup> و ایجاد افروزش در یک هدف کروی یا استوانه‌ای در ابعادی از مرتبه چند میلی‌متر استوار است. هدف عمدتاً شامل یک کپسول پوسته‌ای توخالی با یک لایه کُندگی<sup>۳</sup> خارجی و یک لایه سوخت برودتی<sup>۴</sup> دوتریم-تریتیم<sup>۵</sup> (DT) همراه با بخش کاواک مرکزی است. کاواک مرکزی با بخار DT پر شده است. انفجار رو به داخل پوسته هدف توسط تابش باریکه‌های یونی یا لیزری، به صورت مستقیم (راه‌اندازی مستقیم<sup>۶</sup>) بر سطح هدف و یا به صورت غیرمستقیم (توسط هولرام<sup>۷</sup>) ایجاد می‌شود [۲-۳].

در راه‌اندازی مستقیم، هدف توسط باریکه‌های لیزری با شدت بالا به صورت کاملاً متقارن تحت تابش قرار می‌گیرد. این امر سبب گرمایش، یونیزه شدن و در نهایت کُنده شدن سطح لایه کُندگی شده و مطابق قانون سوم نیوتون یک انفجار رو به داخل ایجاد می‌کند. در نتیجه، لایه سوخت DT به سمت داخل قرص شتاب گرفته، در مرکز آن فشرده شده و دما و چگالی لازم برای انجام فرایند گداخت هسته‌ای مهیا می‌شود [۴]. به دلیل ابعاد بسیار بزرگ و هزینه‌های بسیار بالای دستگاه‌های تجربی و همچنین پیچیدگی‌های ابزارهای آشکارسازی گداخت هسته‌ای، قسمت عمده تحقیقات در این حوزه از گداخت لختی، هم‌چنان بر پژوهش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی استوار است [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 یک‌بعدی با قابلیت طراحی هندسه‌های کروی، استوانه‌ای و تخت است که معادلات فیزیکی مورد نیاز برای شبیه‌سازی عددی و مطالعه هدف‌های گداخت لختی مانند هیدرودینامیک دو دمایی، رسانش گرمایی، ترابرد چندگروهی تابش و ... را بررسی می‌کند [۸].

الماس به دلیل دارا بودن خواص فیزیکی منحصر به فرد زیر، به تازگی به‌عنوان ماده لایه کُندگی مورد توجه قرار گرفته است

[۹]: (۱) به دلیل چگالی بالا، خاصیت کدوری<sup>۸</sup> مناسبی در فوتون‌های با انرژی از مرتبه الکترون‌ولت داشته و در نتیجه جذب انرژی مؤثرتری دارد. این امر سبب آهنگ بالای کُندگی لایه و کاهش آهنگ رشد ناپایداری ریلی-تیلور<sup>۹</sup> می‌شود. (۲) شفافیت اپتیکی الماس در بازه گسترده فرابنفش تا فرورسرخ (۰.۲ تا ۲۰  $\mu\text{m}$ )، استفاده از تکنیک‌های اپتیکی جهت یکنواخت‌سازی سطح لایه برودتی DT در زمان ساخت هدف را امکان‌پذیر می‌سازد. (۳) رسانش گرمایی بالای الماس ملزومات تکنولوژی مربوط به لایه برودتی هدف را ساده‌تر می‌سازد.

با توجه به خواص منحصر به فرد الماس که در بالا به آن اشاره شد، تحقیقات تئوری و تجربی زیادی در استفاده از این ماده به‌عنوان لایه کُندگی در ایده گداخت لختی راه‌اندازی شده غیرمستقیم در تأسیسات ملی افروزش<sup>۱۰</sup> (NIF) در حال انجام است [۱۰-۱۴]. نظر به این‌که استفاده از لایه کُندگی الماس در ایده گداخت لختی راه‌اندازی شده مستقیم به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته است [۱۵]، هدف پژوهش حاضر این است که برای یک هدف نوعی گداخت لختی، به‌جای لایه کُندگی متداول‌تر پلی‌استیرن از الماس به‌عنوان لایه کُندگی استفاده شود. برای این منظور با استفاده از کد هیدرودینامیکی MULTI-IFE، ابتدا ضخامت مناسب لایه کُندگی الماس را یافته و سپس پارامترهای فیزیکی مهم مانند دما، چگالی، فشار و ... در طول افروزش و اشتعال یک هدف گداخت لختی نوعی بررسی خواهند شد.

## ۲. معادلات اساسی

مطالعه هدف‌های ICF مستلزم بررسی چندین فرایند فیزیکی هم‌زمان است. یک هدف کروی حاوی سوخت DT توسط باریکه‌های لیزر به صورت کاملاً متقارن تابش‌دهی می‌شود. انرژی جذب شده در هاله پلاسمای ایجاد شده ناشی از تبخیر اولیه سطح خارجی سوخت، به سمت داخل انتقال یافته و منجر به کُندگی بیش‌تر این لایه می‌شود. این فرایند موجب انفجار رو به داخل لایه‌های داخلی هدف خواهد شد. فشردگی لایه‌های داخلی در مرکز هدف سبب می‌شود که شرایط افروزش مهیا شده و واکنش‌های گرماهسته‌ای DT آغاز شود. محصولات واکنش، به‌ویژه ذره  $\alpha$ ، در پلاسمای سوخت جذب شده و با

1. Inertial Confinement Fusion
2. Implosion
3. Ablator
4. Cryogenic
5. Deuterium-Tritium
6. Direct Drive
7. Hohlräum

8. Opacity

9. Rayleigh-Taylor

10. National Ignition Facility



به منظور بررسی هیدرودینامیک پلاسمای هدف، از معادلات ناور-استوکس<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. با حل این معادلات می‌توان تغییرات پارامترهای فیزیکی مانند دما، فشار و چگالی را در طول شعاع هدف به دست آورد. معادلات پیوستگی جرم، نیرو و انرژی در کد MULTI-IFE به ترتیب عبارتند از [۱۶]:

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

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla (P_e + P_i + P_v) \quad (3)$$

$$\rho \frac{De_e}{Dt} = -P_e \nabla \cdot \vec{v} - \nabla \cdot S_{th} + Q_{ei} + D_e \quad (4)$$

$$\rho \frac{De_i}{Dt} = -(P_i + P_v) \nabla \cdot \vec{v} - Q_{ei} + D_i \quad (5)$$

که در آن  $\rho$  چگالی جرمی،  $v$  سرعت سیال،  $e$  انرژی درونی واحد جرم و  $S_{th}$  شار گرمایی پلازما است.  $D/Dt$  مشتق در چهارچوب متحرک با سیال است.  $D_e$  و  $D_i$  به ترتیب انرژی نهشت یافته در یون‌ها و الکترون‌های پلازما ناشی از یک چشمه انرژی خارجی، مانند باریکه لیزر، می‌باشد. هم‌چنین جمله  $Q_{ei}$  ناشی از اختلاف دمای یون‌ها و الکترون‌های پلازما است که از یون‌ها به الکترون‌های پلازما منتقل می‌شود.

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



آهنگ تغییرات چگالی یون‌ها توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial n_D}{\partial t} = -n_D \nabla \cdot \vec{v} - \langle \sigma v \rangle_{DT} n_D^2 \quad (7)$$

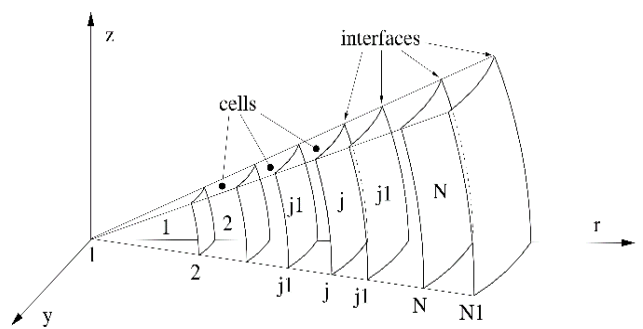
که در رابطه بالا  $\vec{v}$  سرعت سیال و  $\langle \sigma v \rangle_{DT} n_D^2$  تعداد واکنش‌ها در واحد زمان در واحد حجم را نشان می‌دهد.  $\langle \sigma v \rangle_{DT}$  واکنش‌پذیری نام دارد. در هر واکنش DT، ۸۰٪ انرژی واکنش توسط نوترون‌ها، بدون آن‌که برهم‌کنش قابل توجهی با پلاسمای سوخت داشته باشند، هدر می‌رود. ذرات آلفا با انرژی  $E_\alpha = 3.5 \text{ MeV}$  و سرعت  $v_\alpha = 1.297 \times 10^9 \text{ cm.s}^{-1}$  به عنوان ذرات آب‌حرارتی در نظر گرفته شده و دارای انرژی واحد

گرمایش آن سبب افزایش فرایند افروزش و در نهایت اشتعال سوخت می‌شود. همه سازوکارهای ترابرد (شامل پرتو  $X$  محصولات گداخت و پخش حرارتی الکترون‌ها و یون‌ها) نقش مهمی در بررسی افروزش و اشتعال هدف داشته و از این رو می‌بایست به طور صحیح مدل‌سازی شوند.

پلاسمای ICF شبه خنثی هستند (یعنی  $Zn_i = n_e$ ). از طرفی، با توجه به اختلاف زیاد جرم‌های یون‌ها و الکترون‌ها، کد MULTI-IFE از مدل پلاسمای 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 این رو مختصات جرمی به صورت زیر تعریف شده و به عنوان یک متغیر مستقل در نظر گرفته شده است [۸]:

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

برای یک ذره در حال حرکت با سیال، مقدار  $\mu$  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  $v(\mu, t)$  را به عنوان متغیرهای حالت در این کد به کار برد. سایر متغیرها مانند چگالی جرمی، دما، فشار و ... می‌توانند برحسب این متغیرها بیان شوند. معادلات بالا باید در کد MULTI-IFE گسسته‌سازی شوند. برای این منظور ابتدا توابع پیوسته فوق مطابق شکل ۱ شبکه‌بندی می‌شوند. ذرات کنترل (با مقدار ثابت  $\mu$ )، با تعریف یک شبکه لاگرانژی، که نشان‌دهنده سطوح کروی (که سطح مشترک نام دارند) بوده و از ۱ تا  $N+1$  شماره‌گذاری شده‌اند، تعیین می‌شوند.

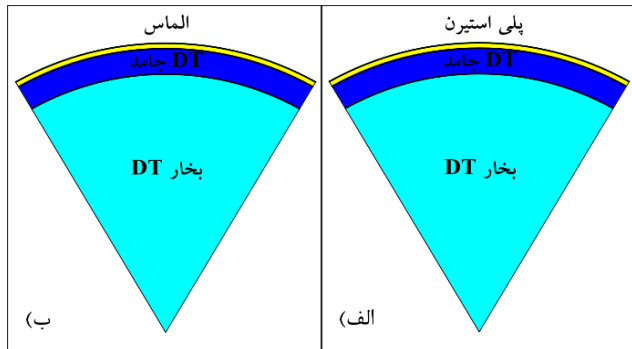


شکل ۱. شبکه‌بندی شطرنجی در مختصات کروی. کمیت‌های اسکالر در سلول و کمیت‌های برداری در سطوح مشترک تعریف می‌شود.

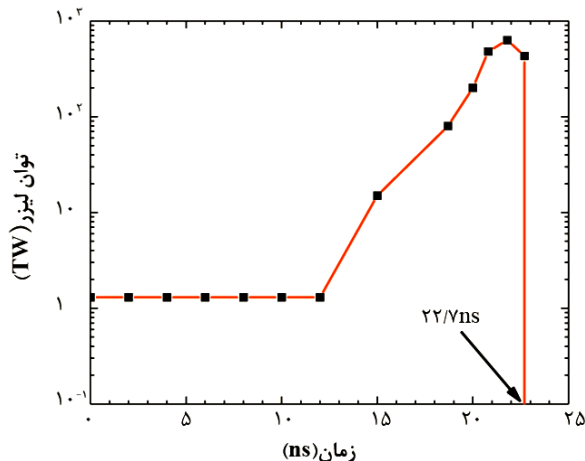


جدول ۱. مشخصات هندسه هدف استفاده شده در مراجع [۱۹، ۲۰]

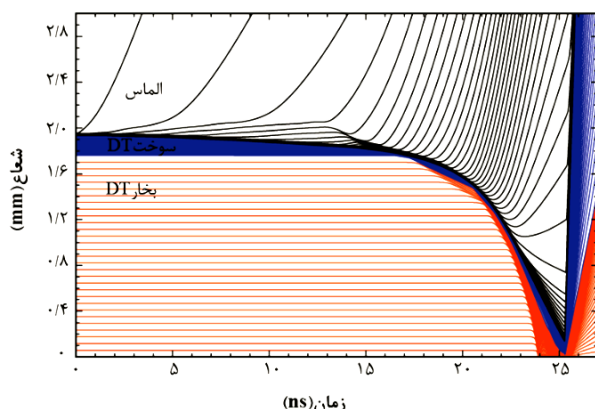
ماده لایه	DT بخار	جامد DT	پلی استیرین
ضخامت ( $\mu\text{m}$ )	۱۷۶۰	۱۷۴	۳۷
جرم (mg)	ناچیز	۱۶۸	۱۶۷
تعداد سلول	۶۰	۹۰	۹۰



شکل ۲. طرحواره هدف DT (الف) با لایه کندگی پلی استیرین [۱۹، ۲۰] (ب) با لایه کندگی الماس.



شکل ۳. توان پالس لیزر فرودی بر حسب زمان.



شکل ۴. تحول مکانی سلول‌های لگرنژی بر حسب زمان در مرحله انفجار در داخل هدف قسمت ب شکل ۱.

حجم  $E_\alpha$  هستند. ترابرد این ذرات درون پلاسما از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{E_\alpha}{\rho} \right) + \rho P_\alpha \frac{\partial \rho^{-1}}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{S}_\alpha - \frac{E_\alpha}{\tau_\alpha} + Q_\alpha \quad (8)$$

که در آن فشار جنبشی،  $P_\alpha = \varepsilon_0 \langle \sigma v \rangle n_D^2$  بخشی از چگالی توان گرما هسته‌ای که به ذره آلفا می‌رسد،  $\frac{E_\alpha}{\tau_\alpha}$  چگالی توان اتلافی انتقال یافته به پلاسما که میان یون‌ها و الکترون‌ها تقسیم می‌شود،  $\tau_\alpha$  زمان واهلش ذرات آلفا در پلاسمای سوخت و  $k_\alpha$  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، ۱۸] یافت.

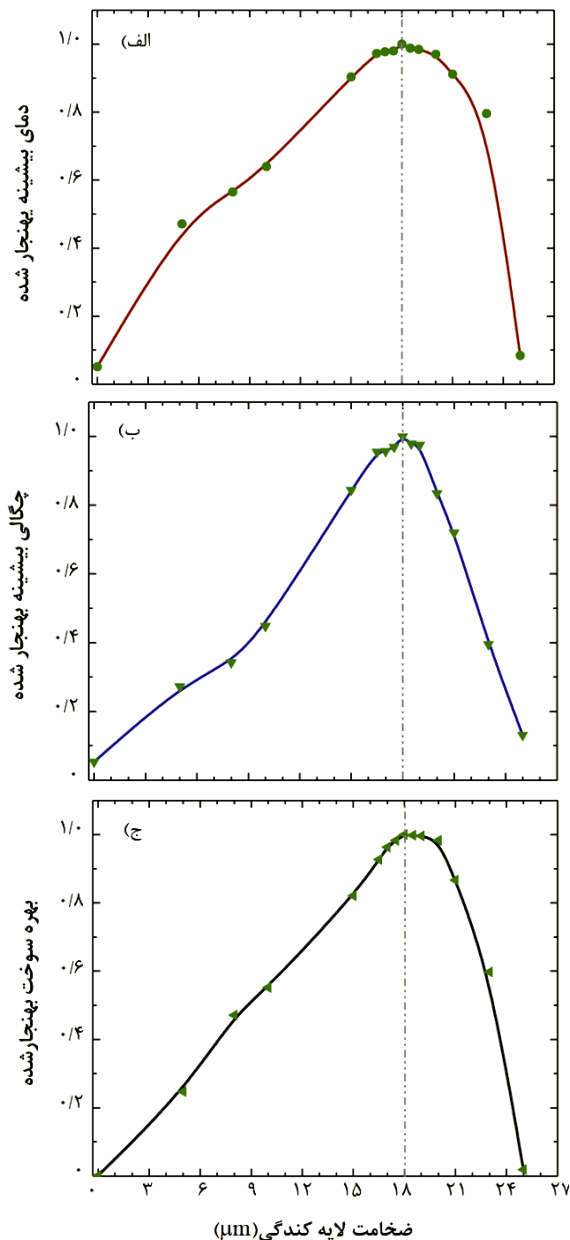
### ۳. روش کار

شکل ۲ طرحواره قطاع هدف استفاده شده در مراجع [۱۹، ۲۰] و پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. هدف‌ها شامل کپسول پوسته‌ای توخالی با یک لایه کندگی و یک لایه سوخت برودتی جامد DT همراه با کاواک مرکزی (حاوی بخار DT) است. اطلاعات تکمیلی در جدول ۱ گزارش شده است.

هدف مورد استفاده در این پژوهش دارای ساختاری مشابه با هدف معرفی شده در جدول ۱ بوده و تنها به جای لایه کندگی پلی استیرین، از لایه کندگی الماس استفاده شده است. این هدف توسط یک پالس لیزری  $22/7 \text{ ns}$  با طول موج  $0.25 \mu\text{m}$  تحت تابش متقارن قرار می‌گیرد. تغییرات زمانی توان پالس فرودی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است، تپ فرودی با یک پیش پالس  $12 \text{ ns}$  با توان  $1.3 \text{ TW}$  آغاز شده و سپس به تدریج به بیشینه  $600 \text{ TW}$  می‌رسد. انرژی کل پالس فرودی در حدود  $1.7 \text{ MJ}$  است.

شکل ۴ نمودار انفجار رو به داخل هدف با لایه کندگی الماس را به ازای یک ضخامت معین نشان می‌دهد. با گرم شدن سطح هدف توسط پالس لیزر فرودی، سلول‌های بیرونی لایه الماس شروع به تبخیر و کنده شدن می‌کنند. 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 می‌کند و در زمان تقریبی  $24 \text{ ns}$  به مرکز آن رسیده، ایستا شده و به دما و فشار لازم جهت آفرزش سوخت می‌رسد.





شکل ۵. تغییرات (الف) دمای بیشینه بهنجار شده، (ب) چگالی بیشینه بهنجار شده و (ج) بهره سوخت بهنجار شده بر حسب ضخامت لایه کندگی الماس.

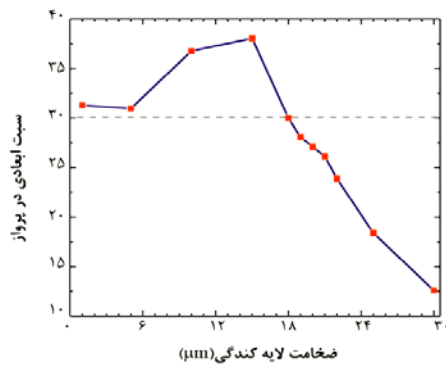
ناپایداری‌های هیدرودینامیکی محدودیت‌های مهمی در طراحی هدف‌های ICF ایجاد می‌کند، زیرا اغتشاشات سیالی می‌تواند تأثیر عمده‌ای در تشکیل لکه‌داغ و شکل هندسی آن داشته باشد. از آنجا که کدهای هیدرودینامیکی یک‌بعدی به‌طور مستقیم قادر به محاسبه این قبیل ناپایداری‌ها نیستند (زیرا برای محاسبه ناپایداری‌های هیدرودینامیکی به حداقل دو بُعد نیاز است)، از این‌رو برای اطمینان از صحت عملکرد کدهای یک‌بعدی از پارامترهای کنترلی استفاده می‌شود. یکی از

به ازای هر انرژی معین لیزر، یک ضخامت بهینه لایه کندگی وجود دارد که در آن ضخامت، بهره سوخت بیشینه می‌شود. 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 [۲۱]. از آنجا که تابش ترمزی معکوس با میانگین توان دوم بار یون‌ها (یعنی  $\langle Z^2 \rangle$ ) متناسب است، استفاده از لایه کندگی الماس سبب می‌شود که جذب کلی انرژی لیزر در مقایسه با لایه کندگی پلی‌استیرن بالاتر رود. از طرفی جذب بالاتر انرژی لیزر سبب افزایش دمای پلاسمای کرونا‌ی تشکیلی در پیرامون سطح هدف شده که به نوبه خود باعث می‌شود آستانه ناپایداری واپاشی دو-پلاسمون<sup>۱</sup> بالاتر رود. هم‌چنین به ازای یک ماده لایه کندگی معین، افزایش ضخامت لایه کندگی، سوخت DT را از پدیده پیش‌گرمایش<sup>۲</sup> ناشی از پلاسمای کرونا حفظ می‌کند [۲۲، ۲۳]. لذا به‌نظر می‌رسد استفاده از مواد با  $\langle Z^2 \rangle$  بالاتر و لایه‌های ضخیم‌تر در لایه کندگی مناسب‌تر باشد. اما باید توجه داشت که استفاده از مواد کندگی با  $\langle Z^2 \rangle$  بالا سبب می‌شود که تابش‌های اتلافی نیز افزایش یابد.

از طرف دیگر، مواد با  $Z$  بالا رسانش گرمایی را از پلاسمای ناحیه جذب انرژی لیزر تا جبهه کندگی کاهش می‌دهد. از این‌رو می‌بایست تمامی عوامل بالا در حالت بهینه طراحی در نظر گرفته شود. نکته کلیدی در طراحی لایه کندگی آن است که انرژی لیزر تماماً در پلاسمای ماده کندگی جذب شود. شکل ۵ تغییرات پارامترهای مهم پلاسمای سوخت شامل (الف) دمای بیشینه یون‌ها، (ب) چگالی بیشینه سوخت و (ج) بهره سوخت را که به بیشینه مقدار هر کمیت، بهنجار شده را به ازای ضخامت‌های مختلف لایه الماس نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، تمامی پارامترها در ضخامت تقریبی  $18 \mu\text{m}$  دارای بیشینه هستند.

1. Two-Plasmon Decay
2. Preheating

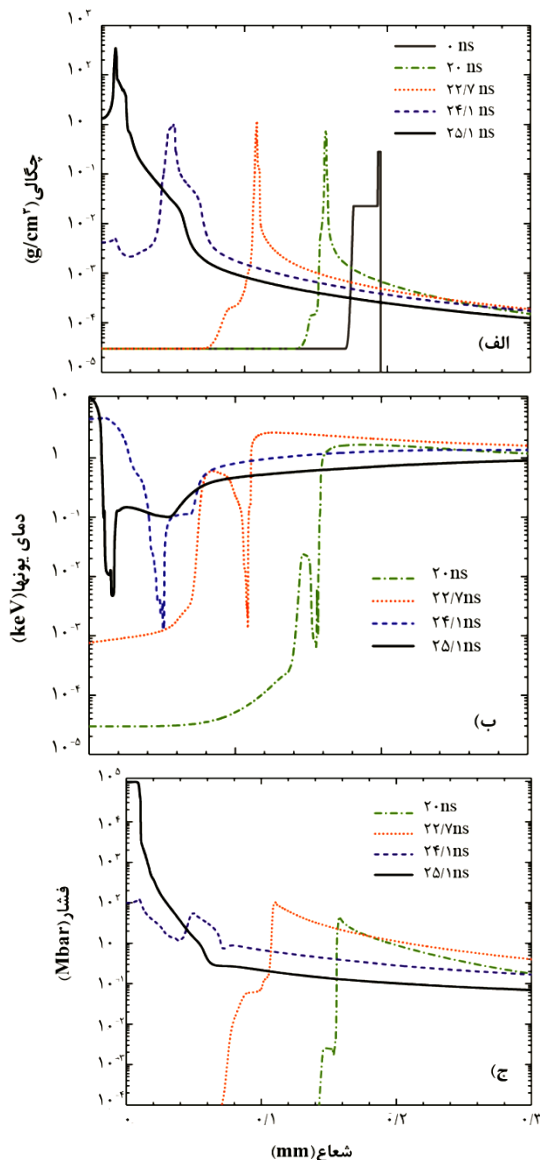




شکل ۶. تغییرات نسبت ابعادی در پرواز بر حسب ضخامت لایه کندگی الماس.

جدول ۲. مشخصات هندسه هدف استفاده شده در این پژوهش

الماس	جامد DT	بخار DT	ماده لایه
۱۸	۱۷۴	۱۷۶۰	ضخامت (μm)
۲/۴۶	۱/۶۸	ناچیز	جرم (mg)
۹۰	۹۰	۶۰	تعداد سلول



شکل ۷. زنجیره مقاطع شعاعی (الف) چگالی (ب) دمای یون (ج) فشار در طول انفجار رو به داخل در زمان‌های مختلف.

مهم‌ترین آن‌ها نسبت ابعادی در پرواز<sup>۱</sup> است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۴]:

$$(9) \quad \text{نسبت ابعادی در پرواز} = \frac{R_{\gamma/\gamma}}{\Delta \gamma/\gamma}$$

که در آن  $R_{\gamma/\gamma}$  شعاع میانگین چگالی بیشینه پوسته و  $\Delta \gamma/\gamma$  ضخامت پوسته در شرایطی است که پوسته تقریباً به اندازه یک سوم شعاع اولیه، در اثر انفجار رو داخل، حرکت کرده است. شبیه‌سازی‌های متعدد نشان داده که اگر مقدار نسبت ابعادی در پرواز بیش از ۳۰ شود، پوسته در حین فرایند انفجار رو به داخل دچار شکستگی و اغتشاش غیرقابل کنترل می‌شود. در نتیجه در این حالت نتایج کد یک‌بعدی با نتایج تجربی اختلاف قابل توجهی خواهد داشت [۲۵]. شکل ۶ نسبت ضخامت ابعادی در پرواز هدف مورد استفاده در این پژوهش را بر حسب ضخامت لایه کندگی نشان می‌دهد. خط چین افقی رسم شده در شکل، حداکثر مقدار مجاز نسبت ابعادی در پرواز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، برای ضخامت‌های بزرگ‌تر از ۱۷ μm، 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.

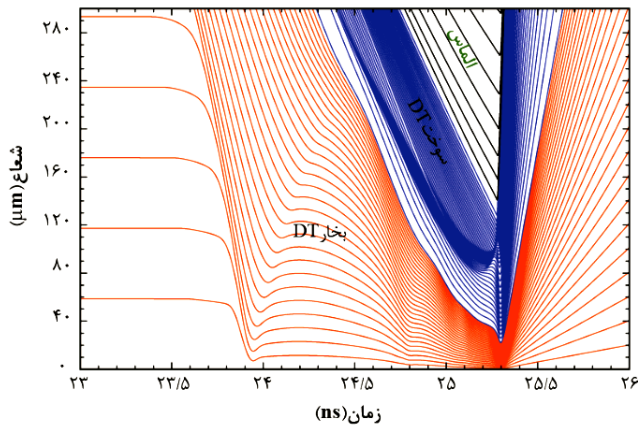
#### ۴. نتایج

جدول ۲ مشخصات هندسه و جرم‌های لایه‌های به کار رفته در هدف در این پژوهش را نشان می‌دهد. ضخامت بهینه ۱۸ μm معادل با جرم لایه کندگی ۲/۴۶ mg، یعنی حدود ۱/۵ برابر جرم لایه کندگی پلی‌استیرن به کار رفته در شبیه‌سازی قبلی است. در این بخش ابتدا افروزش هدف با لایه الماس بررسی شده و سپس پارامترهای فیزیکی مؤثر در افروزش و اشتعال با هدف با لایه کندگی پلی‌استیرن مقایسه خواهند شد.

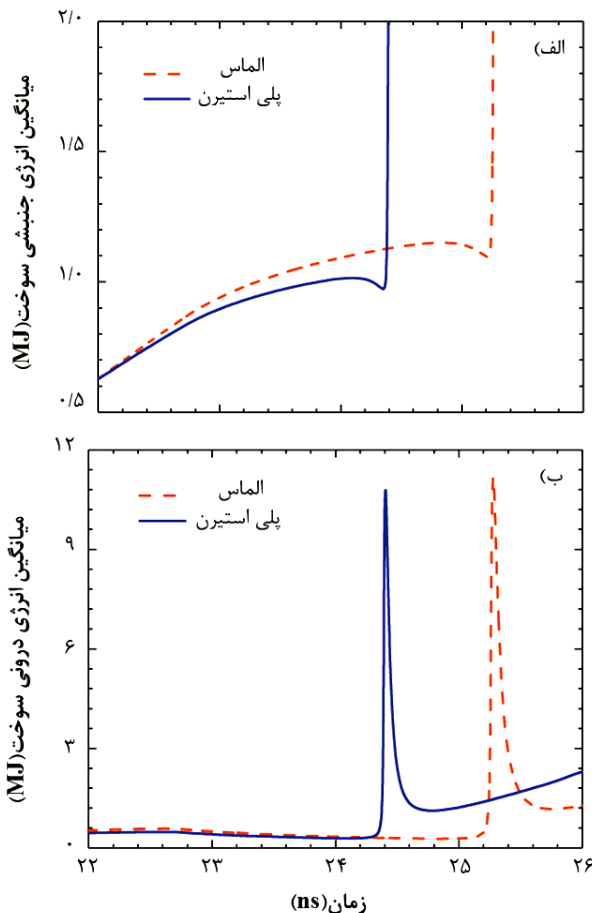
شکل ۷ زنجیره‌های مقاطع شعاعی چگالی، دمای یون‌ها و فشار کل را در زمان اولیه ( $t=0$  s)، در طول مراحل شتاب‌گیری ( $t=20$  s و  $t=22/1$  s)، پس از بازجهش اولین موج ضربه‌ای در مرکز ( $t=24/1$  s) و در حدود زمان افروزش سوخت ( $t=25/1$  s) نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که دما و فشار اولیه با توجه به مقایسه بسیار کوچکی که دارند در زمان اولیه در شکل ۷ نشان داده نشده است.



می‌شود. انرژی درونی بالاتر به معنای دمای بالاتر در لکه‌داغ بوده و شرایط افروزش را بهینه خواهد کرد (جدول ۳).



شکل ۸. نمودار خطوط لاگرنزی در آخرین مرحله انفجار رو به داخل، ایستایی و اشتعال در هدف با ماده کندیگی الماس.



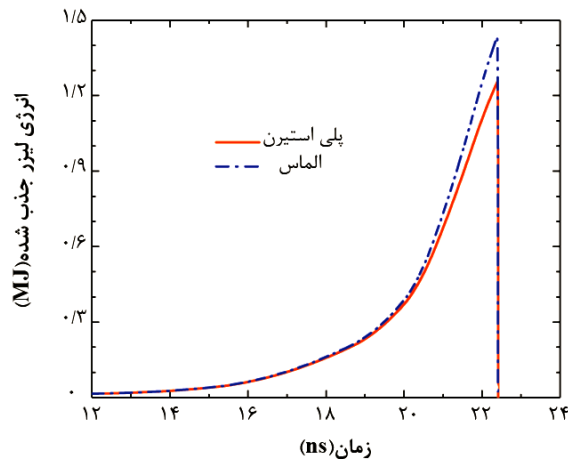
شکل ۹. تغییرات میانگین انرژی جنبشی و انرژی درونی در آخرین مرحله انفجار رو به داخل، ایستایی و اشتعال.

شکل ۷ الف حرکت پوسته به سمت داخل و تراکم آن را در بازه زمانی ۰ تا ۲۲/۷ ns نشان می‌دهد. این تراکم ناشی از فشار کندیگی ایجاد شده در نتیجه برهم‌کنش لیزر با هدف ایجاد می‌شود. همان‌گونه که از شکل ۷ ج مشاهده می‌شود، فشار کندیگی فقط در سطح پوسته دارای قله‌ای است که مقدار آن به بیش از ۱۰۰ Mbar در پایان زمان تابش لیزر (۲۲/۷ ns) می‌رسد. هنگامی که امواج ضربه‌ای به مرکز هدف رسیده و رو به بیرون منعکس می‌شوند (۲۴/۱ ns)، بخار DT را تا دمای بالاتر از ۴ keV گرم می‌کند. در زمان حدود ۲۵/۱ ns فشار قله از حدود ۲۰۰ Gbar تجاوز نموده و دمای یون‌ها به دمای افروزش می‌رسد.

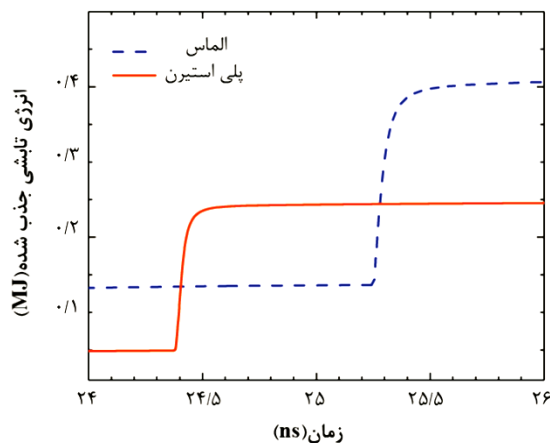
شکل ۸ مراحل پایانی انفجار درونی، ایستایی پوسته و اشتعال هدف با لایه کندیگی الماس را در بازه زمانی ۲۳ تا ۲۶ ns نمایش می‌دهد. در انتهای پالس لیزری، پوسته به سرعت بالایی رسیده و در همان زمان یک موج ضربه‌ای قوی در میان گاز منتشر می‌شود. این موج ضربه‌ای مطابق شکل در زمان تقریبی ۲۴ ns به مرکز هدف رسیده و از 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 ۲۴/۱ تا ۲۵/۳ ns انرژی جنبشی پوسته به انرژی درونی تبدیل شده و چگالی آن بالا می‌رود؛ سپس لکه داغ در مرکز آن تشکیل شده، افروزش در سوخت صورت گرفته و در نهایت سوخت مشتعل می‌شود.

شکل ۹ تغییرات انرژی جنبشی میانگین و انرژی درونی را در آخرین مرحله انفجار رو به داخل، ایستایی و اشتعال نشان می‌دهد. به‌منظور مقایسه، این تغییرات برای هدف با لایه کندیگی پلی‌استیرن نیز رسم شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت لکه‌داغ در هدف با لایه کندیگی الماس (در مقایسه با لایه کندیگی پلی‌استیرن) حدود ۱ ns دیرتر تشکیل می‌شود. علت این امر، جرم سنگین‌تر لایه کندیگی الماس در مقایسه با لایه کندیگی پلی‌استیرن است. زیرا برای شتاب دادن هر دو هدف با لایه‌های کندیگی متفاوت (الماس و پلی‌استیرن) از توان و انرژی لیزر یکسانی استفاده شده است. هم‌چنین شکل ۹ نشان می‌دهد که در طول فرایند انفجار رو به داخل، استفاده از لایه کندیگی الماس سبب شده که میانگین انرژی جنبشی سوخت در مقایسه با لایه کندیگی پلی‌استیرن تا حدودی افزایش پیدا کند. در نتیجه، این امر منجر به قله انرژی درونی بالاتری





شکل ۱۰. انرژی کل لیزر جذب شده در طول زمان تابش پالس لیزر به ازای ماده کندگی پلی استیرین و الماس.



شکل ۱۱. تغییرات انرژی تابشی جذب شده در طول ایستایی، افروزش و اشتعال، به ازای ماده کندگی پلی استیرین و الماس.

## ۵. جمع بندی

شبیه سازی هدف های گداخت لختی بخش مهمی در طراحی نیروگاه های گداخت لختی است؛ چرا که با افزایش بهره، سبب فعالیت این نیروگاه ها به صورت اقتصادی می شود. به منظور شبیه سازی این هدف ها کدهای هیدرو دینامیکی به صورت گسترده ای به کار می رود. از این رو در این پژوهش بهینه سازی یک هدف گداخت لختی با لایه کندگی اولیه پلی استیرین مورد مطالعه قرار گرفت. الماس به دلیل ساختار فیزیکی منحصر به فرد خود به تازگی مورد توجه پژوهشگران در طراحی هدف های گداخت لختی قرار گرفته است. از این رو در این پژوهش الماس جایگزین پلی استیرین شد. سپس با بررسی پارامترهای فیزیکی مهم، ضخامت بهینه این لایه به دست آمد. بررسی ها نشان داد اگرچه لکه داغ در هدف با لایه کندگی الماس (در مقایسه با لایه کندگی پلی استیرین) حدود ۱ ns دیرتر تشکیل می شود. اما از

جدول ۳. مقایسه پارامترها و عملکرد هدف های شبیه سازی شده

پارامتر	هدف با ماده کندگی پلی استیرین	هدف با ماده کندگی الماس
بیشینه دمای یون ها (keV)	۱۵۵٫۷	۱۶۲٫۳
بیشینه دمای الکترون ها (keV)	۶۶٫۶	۶۷٫۶
کسر تریتیوم مصرف شده	۰٫۲۸۷	۰٫۲۹۰
بیشینه انرژی جنبشی سوخت (MJ)	۲۶٫۹۷	۲۹٫۶۰
انرژی لیزر جذب شده (MJ)	۱٫۳۵	۱٫۵۶
انرژی گداخت آزاد شده (MJ)	۱۴۵٫۰۹	۱۵۱٫۷۱
انرژی تابشی جذب شده (MJ)	۰٫۲۴۱۵	۰٫۳۱۴۲
بهره سوخت	۸۴	۹۳

در جدول ۳ مقایسه ای بین پارامترهای مهم به دست آمده در این شبیه سازی با مراجع [۱۹، ۲۰] ارائه شده است. همان گونه که این جدول نشان می دهد، انرژی لیزر جذب شده در هدف با لایه کندگی الماس حدود ۲۰۰ kJ بیش تر از هدف با لایه پلی استیرین در زمان خاموش شدن لیزر است. برای بررسی بیش تر، انرژی لیزر جذب شده بر حسب زمان در طول پالس لیزر فرودی برای دو لایه کندگی پلی استیرین و الماس در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان گونه که قبل تر اشاره شد، فرایند جذب انرژی لیزر از طریق تابش ترمزی معکوس بوده و با  $\langle Z^2 \rangle$  متناسب است. با توجه به این که  $\frac{\langle Z^2 \rangle_{\text{پلی استیرین}}}{\langle Z^2 \rangle_{\text{الماس}}} = 2/9$  است، از این رو جذب انرژی لیزر در لایه کندگی الماس بالاتر از پلی استیرین است.

انرژی تابشی جذب شده در جدول ۳ نیز متأثر از جنس لایه کندگی است. در لحظه ایستایی، بخش اعظم لایه کندگی (حدود ۹۰٪) در اثر برهم کنش با لیزر از سطح سوخت کنده می شود. بخش باقی مانده با جذب و بازتاب بخشی فوتون های تابشی از سوخت در حال افروزش، تا حدودی به گرمایش آن کمک می کند. از آن جا که مواد با Z بالاتر، قابلیت بهتری در گیراندازی فوتون های گسیلی از پلاسمای سوخت دارند، بنابراین همان گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، استفاده از لایه کندگی الماس مناسب تر به نظر می رسد.





9. J. Biener, *Diamond ablaters for inertial confinement fusion*, *Fusion Sci. Technol*, **49**, 737 (2006).
10. J. Biener, et al., *Diamond spheres for inertial confinement fusion*, *Nucl. Fusion*, **49**, 112001 (2009).
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. K.D. Meaney, et al., *Improved inertial confinement fusion gamma reaction history  $^{12}\text{C}$  gamma-ray signal by direct subtraction*, *Phys. Plasmas*, **90**, 113503 (2019).
13. A.J. MacKinnon, *High-density carbon ablator experiments on the National Ignition Facility*, *Phys. Plasmas*, **21**, 056318 (2014).
14. M. Najjar, B. Khanbabaei, *Effects of carbon impurity on the ignition of deuterium-tritium targets under the relativistic shock waves*, *Phys. Plasmas*, **26**, 032709 (2019).
15. Heather D. Whitley, et al., *Comparison of ablaters for the polar direct drive exploding pusher platform*, [arXiv: 2006. 15635 \[physics.comp-ph\]](https://arxiv.org/abs/2006.15635) (2020).
16. R. Ramis, R. Schmalz, J. Meyer-ter-vehn, *Multi- a computer code for one- dimensional multigroup radiation hydrodynamics*, *Comput. Phys. Commun.* **49**, 475 (1988).
17. R. Ramis, et al., *MULTI-fs—A computer code for laser–plasma interaction in the femtosecond regime*, *Comput. Phys. Commun.* **183**, 637 (2012).
18. R. Ramis, *One-dimensional Lagrangian implicit hydrodynamic algorithm for Inertial Confinement Fusion applications*, *J. Comput. Phys.* **330**, 173 (2017).
19. R.L. McCrory, C.P. Verdon, *Inertial Confinement Fusion*, *Proceedings of the Course and Workshop*, (Eds. Caruso and E. Sindoni, 1988), 83-123 (1988).
20. S. Atzeni, J. Meyer-ter-Vehn, *The physics of inertial fusion*, 1st ed. (Clarendon Press, Oxford, 2004).
21. S. Pfalzner, *An Introduction to Inertial Confinement Fusion*, (CRC Press, Taylor & Francis, 2006).
22. A. Simon, et al., *On the inhomogeneous two-plasmon instability*, *Phys. Fluids*, **26**, 3107 (1983).
23. D.T. Michel, et al., *Experimental Validation of the Two-Plasmon-Decay Common-Wave Process*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 155007 (2012).
24. R.S. Craxton, *Direct-drive inertial confinement fusion: A review*, *Phys Plasmas*, **22**, 110501 (2015).
25. 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).

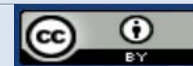
آن‌جا که توان‌های اتلافی و مخصوصاً تابش ترمزی تابعیت دما دارند، این تغییرات در بازه زمانی ایستایی تا افروزش و اشتعال سوخت (که تغییرات شدید دمایی دارد) قابل توجه است. این بازه زمانی برای هر دو هدف اختلاف ناچیزی (حدود ۰٫۲ ns) دارند. در نتیجه توان‌های اتلافی تغییرات محسوسی نخواهند داشت. از طرفی لایه کندی الماس جذب انرژی لیزر بالاتری در مقایسه با لایه کندی پلی‌استیرین دارد. هم‌چنین نسبت ابعادی در پرواز در لایه کندی الماس 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. لایه کندی الماس در قیاس با پلی‌استیرین، توانایی بالاتری در جذب تابش‌های گسیلی در طول زمان ایستایی و افروزش را داشته و هم‌چنین با توجه به چگالی بالاتر، ساختار سوخت را در این بازه زمانی بهتر حفظ می‌کند. از این‌رو به نظر می‌رسد الماس ماده مناسبی جهت استفاده در طراحی‌های هدف‌های گداخت لختی باشد.

#### مراجع

1. H. Hora, *New aspects for fusion energy using inertial confinement*, *Laser Part. Beams*, **25**, 37 (2007).
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. V.N. Goncharov, *Improved performance of direct-drive inertial confinement fusion target designs with adiabat shaping using an intensity picket*, *Phys. Plasmas*, **10**, 1906 (2003).
5. J. Breil, et al., *Multi-material ALE computation in inertial confinement fusion code CHIC*, *Comput. Fluids*, **46**, 161 (2011).
6. S. Weber, et al., *A transport simulation code for inertial confinement fusion relevant laser–plasma interaction*, *Comput. Phys. Commun.* **168**, 141 (2005).
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).

#### 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

سیده مبینا حسینی، بابک خان بابائی (۱۴۰۱)، مطالعه دینامیک افروزش و اشتعال هدف گداخت لختی با لایه کندی الماس با استفاده از کد هیدرودینامیکی MULTI-IFE، ۹۹، ۱۰-۱۸

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.1.2.5

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1344.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1344.html)

