



An Investigation of Effective Parameters in Deuterium-Tritium Fuel Gains in Shock Ignition Method Driven by Laser Beams

Behnaz Kaleji^{1*}, Babak Khanbabaie², Misagh Kasayian³

¹Assistant Professor, Department of Physics, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Assistant Professor, School of Physics, Damghan University, Damghan, Iran.

³MSc, School of Physics, Damghan University, Damghan, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 12.29.2020

Revised: 02.15.2021

Accepted: 03.06.2021

Keyword:

Inertial confinement fusion

Shock ignition

Energy gain

Hot-spot

*Corresponding Author:

Behnaz Kaleji

Email: behnazkaleji@gmail.com

ABSTRACT

Shock ignition (SI) is one of the methods considered in the concept of inertial confinement fusion (ICF). This two-step ICF process separates fuel assembly and ignition, relaxing the driver requirements and promising high gains. In SI scheme, a strong spherical shock wave converging at the end of the initial laser pulse ignites the pre-compressed fuel. In shock ignition, when the hot spot pressure is much higher than the surrounding cold fuel pressure, the fuel structure is considered non-isobaric. In this research, ignition conditions and fuel efficiency in shock ignition method were investigated. Then, the fuel efficiency correlations of total fuel energy, fuel gain and hot-spot radius in a non-isobaric model of fuel assembly were improved and compared with the numerical results of deuterium-tritium (DT) homogeneous fuel in SI scenario. Calculations showed that the hot spot formation conditions depend on the hot spot density and the surrounding cold fuel. Furthermore, using the improved energy efficiency equation, the role of physical parameters such as fuel mass and different ratios of hot spot pressure to the surrounding cold fuel pressure in energy efficiency were investigated.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تهران

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

تابستان ۱۴۰۰، دوره ۱۸، ویژه‌نامه شماره ۱، ۲۱۵-۲۰۵

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.256945.1272

20.1001.1.23829796.1400.18.0.13.0



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بررسی پارامترهای مؤثر در بهره سوخت دوتریوم- تریتیوم در روش افروزش شوکی راهاندازی شده با باریکه لیزری

بهناز کالجی^{*۱}، بابک خان بابائی^۲، میثاق کسایان^۳

۱- استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران.

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران.

چکیده

افروزش شوکی، یکی از روش‌های موردتوجه در ایده هم‌جوشی محصورشدگی لختی است. در این روش هم‌جوشی، محصورشدگی لختی دومرحله‌ای، فشرده‌سازی و اشتعال سوخت به‌صورت جداگانه صورت می‌گیرد که این امر سبب کاهش الزامات راه‌اندازها و بالاتر بردن بهره می‌شود. در ایده اشتعال شوکی، یک موج شوکی کروی قوی همگراشونده در انتهای پالس لیزر اولیه، باعث اشتعال سوخت ازپیش فشرده‌شده می‌شود. در اشتعال شوکی، هنگامی که فشار لکه داغ، بسیار بزرگ‌تر از فشار سوخت سرد اطراف آن است، ساختار سوخت به‌صورت غیرهم‌فشار در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، شرایط اشتعال و بهره سوخت، در روش اشتعال شوکی بررسی شده است. سپس روابط بهره سوخت و همچنین شعاع لکه داغ در مدل ناهم‌فشار را بهبود می‌بخشد و با نتایج عددی سوخت هم‌مولار دوتریوم- تریتیوم (DT) در روش شوکی، مقایسه شده است. محاسبات نشان می‌دهد که شرایط تشکیل لکه داغ، به چگالی لکه داغ و سوخت سرد اطراف آن، بستگی دارد. همچنین با استفاده از معادله بهره انرژی بهبودیافته، نقش پارامترهای فیزیکی؛ از جمله جرم سوخت و نسبت‌های مختلف فشار لکه داغ به فشار سوخت سرد اطراف آن، در بهره انرژی بررسی شد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶

کلید واژگان:

هم‌جوشی محصورشدگی لختی
افروزش شوکی
بهره انرژی
لکه داغ

*نویسنده مسئول: بهناز کالجی

پست الکترونیکی:

behnazkaleji@gmail.com



© 2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

در هم‌جوشی به روش محصورسازی اینرسی، سوختن چند میلی گرم از قرص سوخت، با چگالی ۱۰۰۰ برابر چگالی جامد، در مدت‌زمانی که اینرسی جرمی بتواند مانع از هم پاشیدن سوخت شود، رخ می‌دهد. در رهیافت متداول هم‌جوشی محصورشدگی اینرسی، با انفجار درونی سوخت دوتریوم-تریتیوم (DT) توسط باریکه لیزری در راه‌اندازی مستقیم، چنانچه سرعت انفجار درونی به حد کافی بزرگ باشد ($v \approx 400 \text{ km/s}$)، لکه داغ در مرکز سوخت تشکیل می‌شود و سپس سوخت، مشتعل می‌گردد [۱]. چنین سرعت بزرگی برای انفجار درونی، سبب ایجاد ناپایداری‌های هیدرودینامیکی از جمله ناپایداری ریلی-تیلور و در نتیجه، مانع از تشکیل مؤثر لکه داغ و بهره انرژی قابل قبول می‌شود [۲]. از سوی دیگر، انفجارهای درونی با سرعت‌های پایین‌تر و در نتیجه، پایداری هیدرودینامیکی بیشتر، ملزم به دریافت گرمایش اضافی برای تشکیل لکه داغ و ایجاد افروزش می‌باشند. در افروزش شوکی، فرایند فشرده‌سازی سوخت و افروزش آن به‌صورت جداگانه و توسط دو باریکه لیزری مجزا صورت می‌گیرد؛ بدین‌صورت که ابتدا سوخت توسط پالس کم‌شدت لیزر فشرده می‌شود و لکه داغ اولیه‌ای در مرکز آن ایجاد می‌شود. باین وجود، شرایط برای افروزش لکه داغ اولیه کافی نیست. از این‌رو، در انتهای مرحله فشرده‌گی اولیه، قرص سوخت توسط باریکه‌های لیزری پرشدت ثانویه تحت تابش قرار می‌گیرد و یک موج شوکی درون سو ایجاد می‌شود. برخورد میان موج شوکی ایجاد می‌شود و موج برگشتی از مرکز سوخت، سبب گرمایش بیشتر و افزایش چگالی لکه داغ مرکزی اولیه می‌شود و شرایط افروزش، مهیا می‌گردد [۳]. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که ایده افروزش شوکی در مقایسه با طرح‌های هم‌جوشی محصور شده لختی متعارف با پیکربندی به‌صورت ناحیه افروزشی داغ همراه با سوخت سرد محاط شده، می‌توان به بهره‌های بالاتر و آستانه افروزش پایین‌تر دست‌یافت [۴].

اولین بار در سال ۱۹۹۴ تاباک و همکارانش، روش‌های نوین هم‌جوشی اینرسی، اشتعال سوخت فشرده شده به‌وسیله یک پالس لیزری اضافی کوتاه با شدت بسیار بالا را پیشنهاد کردند [۵]. پس از آن، مطالعات بسیاری در این زمینه صورت گرفت [۶؛ ۷]. با دستیابی به احتراق با راه‌انداز غیرمستقیم همانند اشتعال سریع و اشتعال شوکی، نویدبخش اهداف بالای ICF در استفاده از انرژی پایین محرک لیزری است که منجر به رآکتورهای قدرت هم‌جوشی اقتصادی‌تر خواهد شد؛ لذا، با توجه به اینکه بهره انرژی، یک پارامتر اصلی در تعیین دوام اقتصادی نیروگاه‌های انرژی هم‌جوشی اینرسی به‌شمار می‌رود؛ مهم‌ترین پارامتری که در هم‌جوشی محصورسازی اینرسی باید محاسبه شود، کمیت بهره انرژی می‌باشد که به‌صورت نسبت انرژی آزاد شده در هم‌جوشی به انرژی دریافت شده اولیه تعریف می‌گردد. هدف اصلی این پژوهش نیز مطالعه تحلیلی فرایند افروزش شوکی سوخت DT برای رسیدن به بالاترین مقدار بهره انرژی می‌باشد.

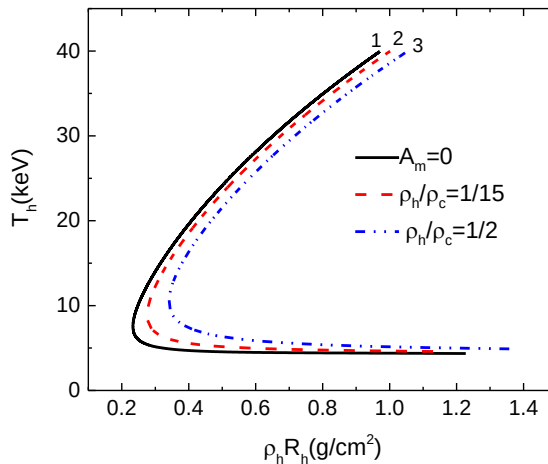
در بخش نخست شرایط افروزش سوخت هم‌مولار دوتریوم-تریتیوم در فرایند افروزش شوکی در شرایط مختلف چگالی به‌دست خواهد آمد. سپس بر مبنای رهیافت تحلیلی، مقدار بهره سوخت و جرم سوخت و تأثیر پارامترهای مختلف بر این کمیت‌ها بررسی خواهد شد.

اشتعال سوخت

در اثر برهم‌کنش دوتریوم با تریتیوم در قرص سوخت هم‌جوشی، با تولید ذرات آلفا، انرژی لازم برای گرم شدن محیط پلاسما و اشتعال سوخت با برهم‌کنش با ذرات دیگر فراهم می‌شود. از طرفی، واکنش‌های دیگری نیز در محیط پلاسما رخ می‌دهد که به دلایل گوناگونی باعث هدررفت انرژی خواهند شد. از این رو به‌منظور افروزش سوخت هم‌جوشی، با توجه به مدل غیرهم‌فشار افروزش شوکی با پیکربندی سوخت شامل لکه داغی با شعاع R_0 و چگالی ρ_0 احاطه‌شده توسط لایه‌ای از سوخت سرد با شعاع R_s و چگالی ρ_s ، باید توان نهشتی ذرات آلفای ناشی از واکنش هم‌جوشی DT بیشتر از توان‌های اتلافی محیط باشد، شرط خودگرمایش برای مدل ناهم‌فشار را می‌توان به‌صورت رابطه ۱ نوشت [۸]:

$$\left(A_{\alpha} f_{\alpha} \langle \sigma v \rangle - A_b \sqrt{T_h}\right) (\rho_h R_h)^2 - A_m \sqrt{\frac{\rho_h T_h^{\frac{3}{2}}}{\rho_c}} (\rho_h R) - \frac{3 A_e T_h^{\frac{3}{2}}}{\text{Log } \Lambda} > 0 \quad (1)$$

که در این رابطه، توان اتلافی ناشی از کار مکانیکی، تابش ترمزی و رسانش حرارتی الکترون‌ها در نظر گرفته شده است؛ بنابراین پارامتر محصورسازی ($\rho_h R_h$) تابعی از دمای لکه داغ (T_h) و نسبت چگالی لکه داغ (ρ_h) به سوخت سرد (ρ_c) خواهد بود. $\langle \sigma v \rangle$ ، پارامتر آهنگ هم‌جوشی برهم‌کنش DT و Log Λ ، لگاریتم کولنی می‌باشد. معادله ۱ به‌ازای $A_m=0$ ، با حذف جمله کار مکانیکی مدل هم‌فشار می‌باشد. ضرایب A_e ، A_b ، A_{α} و A_m ثابت است و مقادیر عددی آن‌ها در مرجع [۸] یافت می‌شود. شکل ۱ شرط افروزش را برحسب نسبت‌های مختلف چگالی‌های لکه داغ و سوخت سرد بررسی می‌کند.



شکل ۱. دمای لکه داغ بر حسب پارامتر محصورسازی لکه داغ ($\rho_h R_h$)

با توجه به شکل ۱ نبود جمله کار مکانیکی در مدل هم‌فشار، بازه بزرگ‌تری از پارامتر محصورسازی لکه داغ برای افروزش سوخت را در دسترس قرار می‌دهد. از آنجاکه افروزش شوکی، بر مبنای مدل ناهم‌فشار استوار است؛ توان اتلافی ناشی از انبساط سوخت در نظر گرفته نمی‌شود. منحنی‌های نقطه‌چین، شرایط افروزش را به‌ازای $\frac{\rho_h}{\rho_c}$ ‌های متفاوت نشان می‌دهد. با کاهش نسبت چگالی لکه داغ به چگالی سوخت سرد، دسترسی به شرایط افروزش سوخت، بهتر خواهد شد.

جرم سوخت

در مدل غیر هم‌فشار، ایده افروزش شوکی پیکربندی سوخت، شامل لکه داغی احاطه‌شده توسط لایه‌ای از سوخت سرد، پارامترهای شرط افروزش لکه داغ را می‌توان بر حسب کمیت‌های β و γ به‌صورت $\rho_h R_h = 0.4\beta (\text{gcm}^{-2})$ و دمای $T_h = 5\gamma (\text{keV})$ تعریف کرد که در آن $\gamma = T_h/5$ و $\beta = \rho_h R_h/3$ می‌باشد. انرژی لیزر فرودی (E_L) با بازده جفت‌شدگی η ، به قرص سوخت به‌صورت انرژی لکه داغ (E_h) و سوخت سرد فشرده‌شده اطراف (E_c) مطابق رابطه

در این رابطه $\eta E_L = E_h + E_c = E_f$ انرژی درونی سوخت است. فشار و انرژی سوخت سرد را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت [۹]:

$$P_c (\text{Gbar}) = 2.2 \times 10^{-3} \alpha \rho_c^{\frac{5}{3}} \quad (2)$$

$$E_c (\text{MJ}) = 0.32 \alpha \rho_c^{\frac{2}{3}} M \quad (3)$$

در رابطه بالا α پارامتر آیزننروپ و M نیز جرم کل سوخت می‌باشد. با فرض اینکه معادله حالت لکه داغ از قانون گاز کامل پیروی می‌کند، فشار و انرژی لکه داغ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$P_h (\text{Gbar}) = 1.6 \frac{\beta \gamma}{R_h} \quad (4)$$

$$E_h = 10^3 \beta \gamma R_h^3 \quad (5)$$

شعاع لکه داغ و سوخت لایه سرد از طریق تعریف چگالی سطحی و جرم سوخت سرد به صورت زیر به دست می‌آید:

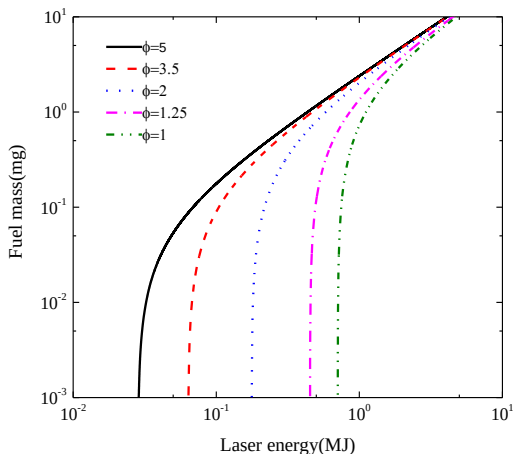
$$R_h = \frac{0.4 \beta}{\rho_h} \quad (6)$$

$$R_s = \frac{0.05}{\rho_s} \left(\frac{R_h \phi}{\beta \gamma} \right)^{\frac{2}{5}} \alpha^{-\frac{3}{5}} (\eta E_L - E_h) \quad (7)$$

Φ ، نسبت فشار لکه داغ به فشار سوخت سرد متراکم شده اطراف آن می‌باشد. به منظور بررسی ارتباط میان جرم سوخت و انرژی مورد نیاز باریکه لیزر فرودی برای سوختن سوخت، رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$M = \frac{\eta E_L 2.4 \times \frac{10^3 (\beta \gamma)^3 P_s^2}{\phi^2}}{3.9 \alpha^{\frac{3}{5}} P_c^{\frac{2}{5}}} + 4.3 \frac{\beta^3 \gamma^2}{P_c^2 \phi^2} \quad (8)$$

شکل ۲، تغییرات جرم سوخت را بر حسب انرژی لیزر به ازای مقادیر مختلف پارامتر ϕ نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، به ازای یک جرم مشخص، با افزایش اختلاف فشار لکه داغ و سوخت سرد پیرامون آن، انرژی لازم برای افروزش و سوختن سوخت، کاهش می‌یابد و بدین ترتیب، بهره انرژی در این روش، در مقایسه با افروزش مرکزی، افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر، انرژی لیزر براساس نسبت‌های مختلف فشار سوخت سرد به فشار لکه داغ، به ازای جرم‌های بزرگ‌تر از ۱ mg نزدیک به هم بوده است. بدین ترتیب، انرژی لازم برای احتراق سوخت‌های بالاتر از ۱ mg در احتراق مرکزی و احتراق شوکی، اختلاف زیادی با هم ندارند و در نتیجه، روش شوکی، مزیت چندانی نسبت به روش احتراق مرکزی در سوخت‌های با جرم بالاتر از ۱ mg نخواهند داشت.



شکل ۲. جرم سوخت برحسب انرژی لیزر فرودی به‌ازای ϕ های مختلف

بهره سوخت

بهره سوخت به‌صورت نسبت انرژی آزادشده در برهم‌کنش‌های هم‌جوشی به انرژی کل دریافت شده توسط سوخت به‌صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود [۱۰]:

$$\text{Gain} = \frac{q_f M f_b}{E_c + E_h} \quad (9)$$

در رابطه بالا $q_f \approx 335.5 \times 10^3 \text{ (kJ/mg)}$ انرژی آزادشده در هر میلی‌گرم از سوخت DT است. f_b کسر مصرف سوخت که نشان‌دهنده مصرف سوخت طی واکنش هم‌جوشی می‌باشد؛ از این رو برای تحقق یک فرایند ایده‌آل در هم‌جوشی و در نتیجه، احتراق کامل سوخت، مقدار این پارامتر باید برابر با ۱ باشد. کسر مصرف سوخت را می‌توان به‌صورت رابطه ۱۰ نوشت:

$$f_b = \frac{\rho R_{\text{tot}}}{H_B + \rho R_{\text{tot}}} \quad (10)$$

در رابطه بالا $\rho R_{\text{tot}} = \rho_c (R_c - R_h) + \rho_h R_h$ می‌باشد و $H_B = 7 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ است [۱۱].

در سال ۲۰۱۰ اشمیت و همکارانش، فرایند سوزش با اعمال تقریب‌هایی از جمله در محاسبه کسر مصرف سوخت و نیز بهره انرژی در روش هم‌جوشی به روش افروزش شوکی با استفاده از باریکه لیزر را بررسی کردند. با فرض کوچک بودن انرژی لکه داغ نسبت به انرژی سوخت سرد ($E_h \ll E_c$)، از انرژی لکه داغ، صرف‌نظر و $E_{KJ} \approx E_c$ در نظر گرفته شد که E_{KJ} انرژی کل رسیده به سوخت می‌باشد [۱۰].

در پژوهش حاضر، بدون در نظر گرفتن تقریب‌های مرجع [۱۰] برای دستیابی به مقادیر دقیق‌تری برای بهره سوخت، مقدار دقیق انرژی کل و همچنین پارامتر کسر مصرف سوخت به‌ترتیب به‌صورت $E_{KJ} = E_c + E_h$ و

$$f_b = \frac{\rho R_{tot}}{H_B + \rho R_{tot}}, \text{ در نظر گرفته شد؛ از این رو رابطه دقیق برای بهره سوخت به‌صورت زیر بیان می‌شود:}$$

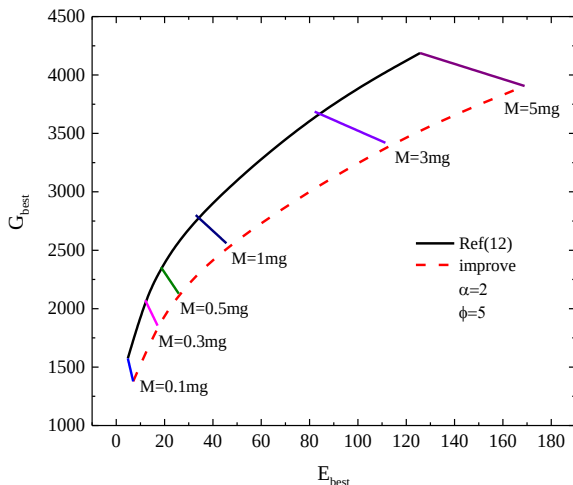
$$G = \frac{(335.5 \times 10^3 \text{ Mp} R_{tot})}{(E_c + E_h)(\rho R_{tot} + 7)} \quad (11)$$

جدول ۱، مقایسه بین بهره و انرژی بهینه سوخت سرد، به‌ازای مقادیر مختلف جرم و به‌ازای $\phi=5$ ، $\alpha=2$ بین مرجع [۱۰] و پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه بین انرژی سوخت سرد برحسب کیلوژول و بهره به‌دست‌آمده از مرجع اشمیت و همکاران، ۲۰۱۰ [۲۰] و پژوهش حاضر

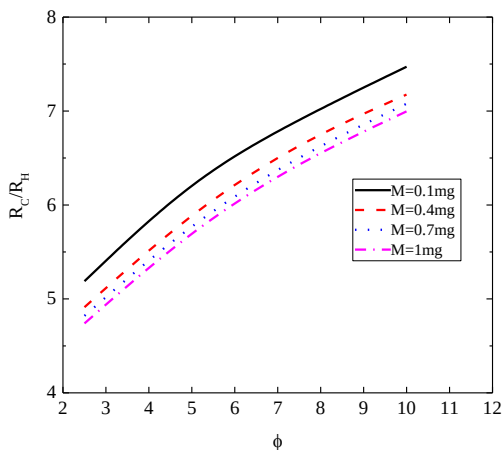
بهره بهینه (پژوهش حاضر)	انرژی بهینه (پژوهش حاضر)	بهره بهینه [۱۰]	انرژی بهینه [۱۰]	جرم سوخت (mg)
۱۳۷۸	۷	۱۵۷۵	۴/۸	۰/۱
۱۸۵۵	۱۷/۱	۲۰۷۳	۱۲	۰/۳
۲۱۲۸	۲۵/۹	۲۳۵۵	۱۸/۵	۰/۵
۲۵۶۰	۴۵/۶	۲۸۰۱	۳۲/۹	۱
۳۴۲۰	۱۱۱/۴	۳۶۸۶	۸۲/۱	۳
۳۹۰۶	۱۶۹	۴۱۸۸	۱۲۵/۷	۵

در شکل ۳، بهره ماکزیمم سوخت برحسب انرژی بهینه سوخت سرد، به‌ازای مقادیر مختلف جرم و به‌ازای $\alpha=2$ ، $\phi=5$ با توجه به مرجع مذکور و پژوهش حاضر، رسم شده است. چنانچه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، به‌ازای یک جرم یکسان، مقدار بهره سوخت، کاهش می‌یابد و با دقت بیشتری نسبت به قبل به‌دست‌آمده است.



شکل ۳. مقایسه بهره و انرژی بهینه بین مرجع [۱۰] و پژوهش حاضر

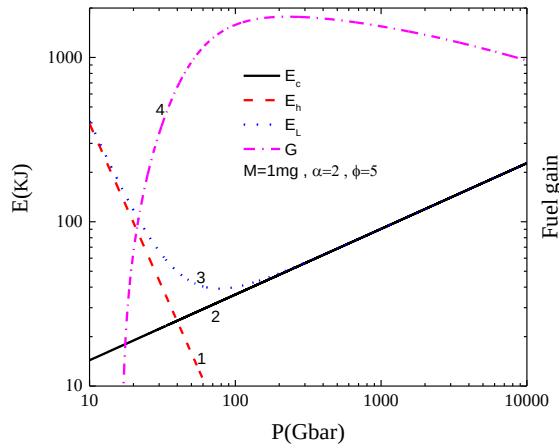
همچنین در این مرجع، نسبت شعاع سوخت سرد به شعاع لکه داغ، همواره ثابت و برابر ۳ در نظر گرفته شده است، اما با توجه به روابط بیان شده و شکل ۴ مشاهده می‌شود که این نسبت به‌ازای جرم و پارامتر ϕ ، تغییر خواهد کرد. با توجه به شکل، نسبت شعاع سوخت سرد به شعاع لکه داغ، به‌ازای یک ϕ مشخص، و جرم‌های مختلف، متفاوت است. همچنین این نسبت به‌ازای جرم یکسان با مقادیر مختلف از پارامتر ϕ نیز با هم متفاوت است. با مقایسه‌ای که بین چهار جرم ۰/۱، ۰/۴، ۰/۷ و ۱ میلی گرم شده است، مشاهده می‌شود که بزرگ‌ترین مقدار، برای سوخت با جرم ۰/۱ میلی گرم و نسبت فشار لکه داغ به فشار سوخت سرد با مقدار ۱۰ می‌باشد.



شکل ۴. نمودار نسبت شعاع سوخت سرد به شعاع لکه داغ برحسب جرم و ϕ های متفاوت

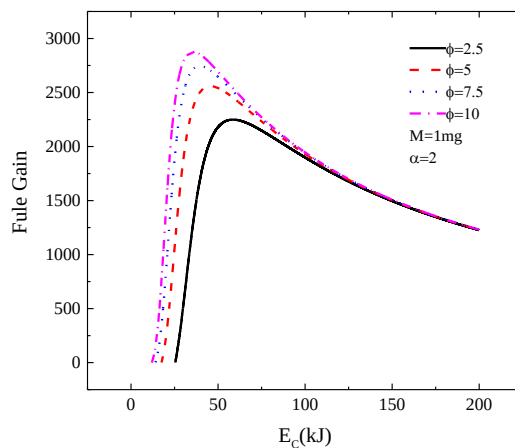
در شکل ۵، انرژی و بهره سوخت برحسب فشار قرص سوخت از پیش‌فشرده، رسم شده است. در فشار پایین، انرژی موردنیاز برای تشکیل لکه داغ بسیار بزرگ‌تر از انرژی فشرده‌سازی (منحنی ۱) و در فشارهای بالاتر این انرژی به‌شدت

افت پیدا می‌کند و انرژی فشرده‌سازی سوخت سرد بزرگ‌تر از انرژی موردنیاز برای تشکیل لکه داغ می‌شود (منحنی ۲). در منحنی ۳ جمع این دو انرژی رسم شده است که بهینه فشار لازم برای رسیدن به بهره ماکزیمم در مینیمم این تابع واقع می‌شود که این نکته در منحنی ۴ (تغییرات بهره بر حسب فشار) مشهود است.



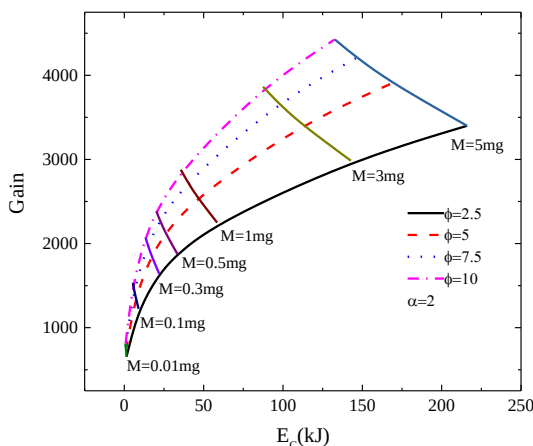
شکل ۵. تغییرات انرژی و بهره سوخت بر حسب فشار

از آنجایی که ایده افروزش شوکی بر مبنای مدل ناهم فشار استوار است، از این رو در شکل ۶، بهره انرژی بر حسب انرژی سوخت سرد به‌ازای مقادیر مختلف پارامتر ϕ رسم شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، پارامتر ϕ ، نسبت فشار لکه داغ به فشار سوخت سرد است که این اختلاف فشار توسط موج شوکی ایجاد شده از طریق باریکه لیزر دوم ایجاد می‌شود. با توجه به نمودار درمی‌یابیم با افزایش پارامتر ϕ ، بهره سوخت به‌ازای یک E_C مشخص، افزایش پیدا خواهد کرد. علاوه بر آن، به‌ازای پارامتر ϕ بزرگ‌تر، ضمن رسیدن به بهره بیشینه، با توجه به قله نمودار، نیاز به مصرف انرژی E_C نیز کمتر خواهد بود.



شکل ۶. تغییرات بهره انرژی سوخت بر حسب انرژی سوخت سرد به‌ازای ϕ های مختلف

شکل ۷، بهره انرژی را برحسب انرژی سوخت سرد، به‌ازای جرم‌های مختلف سوخت و مقادیر مختلف پارامتر ϕ ، برای بیشینه بهره انرژی به‌دست‌آمده در قسمت قبل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش پارامتر ϕ ، بیشینه بهره انرژی نیز افزایش می‌یابد. در ضمن با افزایش جرم سوخت، اختلاف انرژی بین پارامترهای مختلف ϕ مربوط به یک جرم، بیشتر می‌شود [۱۲].



شکل ۷. بیشینه بهره انرژی برحسب انرژی سوخت سرد به‌ازای جرم و پارامتر ϕ .

نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های نوین در طرح همجوشی به روش محصورسازی اینرسی، همجوشی به روش افروزش شوکی است که با جداسازی مراحل فشردگی و افروزش سوخت موجب کاهش انرژی اولیه و افزایش مقدار بهره انرژی می‌شود. در این پژوهش، آستانه افروزش سوخت در روش افروزش شوکی با استفاده از محرک لیزری برای سوخت DT، به علت غیرهم‌فشار بودن لکه داغ و سوخت اطراف آن، نسبت به اشتعال مرکزی پایین‌تر به‌دست‌آمده است. بنابراین چگالی سوخت کمتری موردنیاز است؛ زیرا لزومی برای رسیدن به دمای اشتعال در زمان تراکم ساچمه و سرعت بالای انفجار درونی سوخت نمی‌باشد و در نتیجه از حساسیت‌های ناشی از تقارن انفجار و ایجاد ناپایداری‌های ریلی تیلور کاسته می‌شود. سپس، بهره انرژی و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی آن در افروزش شوکی موردبررسی قرار گرفت. محاسبات نشان می‌دهد که در مدل غیرهم‌فشار افروزش شوکی، با افزایش فشار لکه داغ نسبت به فشار سوخت سرد اطراف آن، بهره انرژی افزایش می‌یابد. همچنین برای جرم‌های کوچک‌تر از ۱mg، به‌ازای جرم معین سوخت، با افزایش نسبت فشار لکه داغ به فشار سوخت سرد، انرژی لیزر فرودی، کاهش و در نتیجه، بهره انرژی افزایش می‌یابد و در جرم‌های بزرگ‌تر از ۱ mg، انرژی لیزر فرودی به یک مقدار ثابتی خواهد رسید و دیگر، روند افزایشی نخواهد داشت؛ بنابراین برای جرم‌های بالاتر از ۱ mg، افروزش شوکی به سمت افروزش مرکزی میل خواهد کرد.

Reference

- [1] Atzeni, S., Schiavi, A., & Marocchino, A. (2011). Studies on the robustness of shock-ignited laser fusion targets. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 53(3), 035010. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/53/3/035010>
- [2] Eliezer, S., Pinhasi, S. V., Martinez Val, J. M., Raicher, E., & Henis, Z. (2017). Heating in ultraintense laser-induced shock waves. *Laser and Particle Beams*, 35(2), 304-312. <https://doi.org/10.1017/S0263034617000192>
- [3] Kawasaki, K., Hironaka, Y., Maeda, Y., Iwasaki, T., Tanaka, D., Miyanishi, K., Nagatomo, H., Fujioka, S., Ozaki, N., Kodama, R., Matsuoka, T., Batani, D., Trela, J., Nicolai, P., & Shigemori, K. (2020). The role of hot electrons on ultrahigh pressure generation relevant to shock ignition conditions. *High Energy Density Physics*, 37, 100892. <https://doi.org/10.1016/j.hedp.2020.100892>
- [4] Piriz, A., Piriz, S., & Tahir, N. (2011). Dynamic stabilization of classical Rayleigh-Taylor instability. *Physics of Plasmas*, 18(9), 092705. <https://doi.org/10.1063/1.3633487>
- [5] Tabak, M., Hammer, J., Glinsky, M. E., Kruer, W. L., Wilks, S. C., Woodworth, J., Campbell, E. M., Perry, M. D., & Mason, R. J. (1994). Ignition and high gain with ultrapowerful lasers. *Physics of Plasmas*, 1(5), 1626-1634. <https://doi.org/10.1063/1.870664>
- [6] Payun, S., & Malekynia, B. (2019). Thermal resonance effect by a strong shock wave in D-T fuel side-on ignition by laser-driven block acceleration. *Laser and Particle Beams*, 37(4), 332-340. <https://doi.org/10.1017/S0263034619000624>
- [7] Shang, W. L., Betti, R., Hu, S. X., Woo, K., Hao, L., Ren, C., Christopherson, A. R., Bose, A., & Theobald, W. (2017). Electron Shock Ignition of Inertial Fusion Targets. *Physical Review Letters*, 119(19), 195001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.195001>
- [8] Lafon, M., Ribeyre, X., & Schurtz, G. (2010). Gain curves and hydrodynamic modeling for shock ignition. *Physics of Plasmas*, 17(5), 052704. <https://doi.org/10.1063/1.3407623>
- [9] Ribeyre, X., Lafon, M., Schurtz, G., Olazabal-Loumé, M., Breil, J., Galera, S., & Weber, S. (2009). Shock ignition: modelling and target design robustness. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 51(12), 124030. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/51/12/124030>
- [10] Schmitt, A. J., Bates, J. W., Obenschain, S. P., Zalesak, S. T., & Fyfe, D. E. (2010). Shock ignition target design for inertial fusion energy. *Physics of Plasmas*, 17(4), 042701. <https://doi.org/10.1063/1.3385443>
- [11] Atzeni, S., Ribeyre, X., Schurtz, G., Schmitt, A. J., Canaud, B., Betti, R., & Perkins, L. J. (2014). Shock ignition of thermonuclear fuel: principles and modelling. *Nuclear Fusion*, 54(5), 054008. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/54/5/054008>
- [12] Atzeni, S., Schiavi, A., Marocchino, A., Giannini, A., Mancini, A., & Temporal, M. (2013). Studies on shock ignition targets for inertial fusion energy. *EPJ Web of Conferences*, 59, 01005. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135901005>