



تأثیر رفتار زمانی محرک افروزنده بر کارآیی رویکرد افروزش ضربه‌ای

محمدجعفر جعفری، امیرحسین فرهبد*، سمیه رضایی

پژوهشکده‌ی پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

چکیده: در این پژوهش، تأثیر رفتار زمانی تپ محرک افروزنده‌ی سوخت بر کارآیی هم‌جوشی هسته‌ای با استفاده از محصورسازی لختی به روش افروزش ضربه‌ای بررسی و نشان داده شد که اعمال دو تپ افروزنده‌ی همسان با تأخیر زمانی مناسب، منجر به کاهش انرژی افروزنده و در نتیجه کاهش انرژی کل مورد نیاز برای تولید انرژی می‌شود. دو تپ دوزنقه‌ای همسان با زمان صعود ۵۰ پیکوثانیه و با قله‌ی توان و پهنای تپ متفاوت و با تأخیر زمانی ۵۰ پیکوثانیه و لحظه‌ی آغاز متفاوت بر روی هدف سیستم هم‌جوشی هسته‌ای لیزری تسهیلات پژوهشی انرژی لیزر توان-بالا (HiPER) اعمال شد. شبیه‌سازی‌های یک بعدی با استفاده از کد مالتی نشان داد که نمایه‌ی مزیت استفاده از محرک افروزنده‌ی دوگانه در بازه‌ی $1.1 < FM < 1.7$ قرار دارد. نمایه‌ی مزیت بزرگ‌تر از ۱ نشان می‌دهد که برای یک انرژی محرک متراکم‌کننده‌ی سوخت ثابت، استفاده از دو تپ افروزنده‌ی برابر و کم-انرژی در مقایسه با روش افروزش ضربه‌ای دارای برتری است.

کلیدواژه‌ها: هم‌جوشی هسته‌ای، محصورسازی لختی، افروزش ضربه‌ای

Effect of ignitor time behavior on performance of shock ignition scheme

M.J. Jafari, A.H. Farahbod*, S. Rezaei

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

Abstract: In this research work, target performance under different spike pulse(s) time behavior is studied. It is shown that by applying two equal spike pulses with appropriate time delay, leads to enhancement of the target gain and reduction of the total ignitor energy. The lower spike energy is required for the lower total driver energy to be used for commercial energy production. Two trapezoidal pulses with 50 picoseconds rise time, different power levels, pulse duration, launching and delay time have been applied on a HiPER baseline target. A one-dimensional simulation by MULTI code has shown that the figure of merit for a double shock ignition scheme varies in a range of $1.1 < FM < 1.7$. The $FM > 1$ demonstrates that for the same compression energy the splitting of the ignitor pulse into two equal lower energy pulses has more benefit compared with the conventional method of shock ignition.

Keywords: Nuclear fusion, Inertial confinement, Shock ignition

*email: afarahbod@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۹/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۳/۱۸

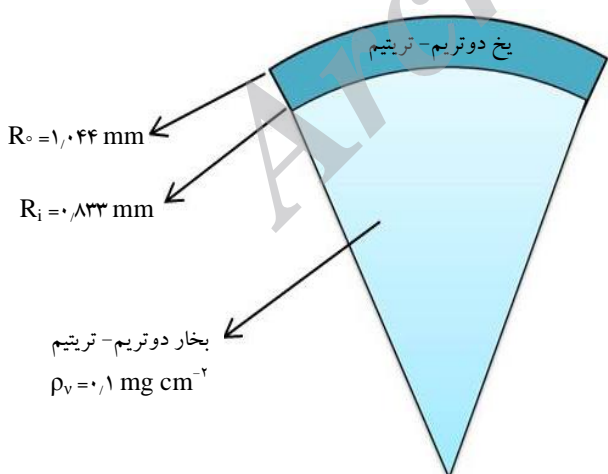


۱. مقدمه

شبه‌سازی‌های انجام شده [۵] نشان می‌دهند که انرژی و رفتار زمانی تپ افروزنده نقش به‌سزایی در آستانه‌ی افروزش و بهینه‌ی بهره‌ی هدف دارد. در پژوهش حاضر به منظور بهینه‌سازی بهره‌ی هدف و کاهش انرژی افروزش، استفاده از دو تپ همسان و کم-انرژی نسبت به تک تپ افروزنده در مدل افروزش ضربه‌ای پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. روش محاسبه

شبه‌سازی‌های ارایه شده در این پژوهش با استفاده از کد مالی (۶) [۶] و بر روی هدف مرجع تسهیلات پژوهشی انرژی لیزر توان-بالا (۷) [۷] انجام شده است. مالی، یک کد تابشی هیدرودینامیکی لاگرانژی و شامل مدل دو دمایی مجزا برای الکترون و یون، با ضریب‌های ترابرد کلاسیکی و هدایت گرمایی اسپیتزر با شار محدود (۸)، معادله‌ی حالت سزایی (۹)، پخش تابشی چندگروهی و واکنش‌های هم‌جوشی هسته‌ای است. هم‌چنین در این کد، ذره‌های باردار حاصل از واکنش هم‌جوشی هسته‌ای (در مورد واکنش دوتریم-تریتیم ذره‌های آلفا با انرژی ۳٫۵ میلیون الکترون‌ولت) انرژی خود را با مدل پخش چندگروهی بر جای می‌گذارند. شبه‌سازی‌ها بر روی هدف مرجع تسهیلات پژوهشی انرژی لیزر توان-بالا (شکل ۱) انجام شده است. این هدف شامل پوسته‌ی یخی دوتریم-تریتیم با چگالی $0,25 \text{ g cm}^{-3}$ ، شعاع خارجی $1,044 \text{ mm}$ و ضخامت $211 \mu\text{m}$ است که با گاز دوتریم-تریتیم با چگالی $0,1 \text{ mg cm}^{-3}$ در تعادل گرمایی است.



شکل ۱. هدف مرجع تسهیلات پژوهشی انرژی لیزر توان-بالا استفاده شده برای افروزش ضربه‌ای [۷].

برای دستیابی به چگالی و دمای بالا در هم‌جوشی هسته‌ای با استفاده از محصورسازی لختی به روش مستقیم، هدف کوچک کروی حاوی سوخت دوتریم-تریتیم (D-T) از طریق تابش باریک‌های لیزر با شدت در حد $10^{15} \text{ W cm}^{-2}$ متراکم می‌شود. در رهیافت افروزش مرکزی، لبه‌ی بیرونی هدف از طریق فشار کندگی تا سرعت $V_{\text{imp}} > 3 \times 10^7 \text{ cm s}^{-1}$ شتاب گرفته و سوخت تا چگالی 1000 g cm^{-3} فشرده می‌شود. در مرحله‌ی ایستایی (۱)، سوخت متراکم شده طی یک فرایند بی‌دررو گرم شده و لکه‌ی داغ کم-چگال مرکزی که با سوخت چگال احاطه شده است پدید می‌آید. با تبدیل انرژی جنبشی پوسته‌ی هدف به انرژی درونی لکه‌ی داغ و ایجاد شرایط دمای لکه‌ی داغ ($T_h > 10 \text{ keV}$) و چگالی سطحی (۲) $(\rho R_h > 0,3 \text{ g cm}^{-2})$ ، ذره‌های آلفای حاصل از واکنش‌های هم‌جوشی هسته‌ای لکه‌ی داغ در سوخت چگال و سرد، متوقف و منجر به گرمایش آن و انتشار موج سوختن می‌شوند [۱]. افروزش ضربه‌ای [۲]، رهیافت جدیدی است که در آن فاز متراکم‌کننده و افروزش از یک‌دیگر تفکیک شده‌اند. ابتدا هدف کروی از طریق محرک لیزر با شدت $10^{15} \text{ W cm}^{-2}$ (۱-۰٫۳) و سرعت کم ($290-220 \text{ km s}^{-1}$) متراکم، و در مرحله‌ی نهایی با تابش تپ افروزنده با پهنای زمانی کوتاه‌تر و با شدتی تا ده برابر بیش‌تر از تپ متراکم‌کننده، سوخت تا دمای افروزش گرم می‌شود. فشار متناظر با موج ضربه‌ی حاصل از محرک افروزنده طی چندین مرحله به دلیل هم‌گرایی کروی و برخورد با موج ضربه‌ی منعکس شده از مرکز هدف، تقویت شده و در نهایت لکه‌ی داغ با افزایش فشار و دما به چگالی سطحی لازم برای آغاز افروزش دست می‌یابد. برای هدف‌های با جرم یکسان، ایجاد شرایط افروزش در مدل ناهم‌فشار سوخت (افروزش ضربه‌ای)، به انرژی بسیار کم‌تری نسبت به مدل هم‌فشار در افروزش مرکزی نیاز دارد که منجر به افزایش بهره و کم شدن آستانه‌ی افروزش می‌شود [۳]. شبه‌سازی‌های هیدرودینامیکی نشان می‌دهند که به علت کاهش سرعت انفجار درونی (۳) در فاز تراکم، ناپایداری‌های هیدرودینامیکی در فرایند افروزش ضربه‌ای کاهش می‌یابد در حالی که به علت شدت بالای تپ افروزنده نمی‌توان از بروز ناپایداری‌های لیزر-پلازما نظیر پراکندگی القایی رامان (۴) و پراکندگی القایی بریلوین (۵) در برهم‌کنش لیزر با پلازما اجتناب کرد [۴].

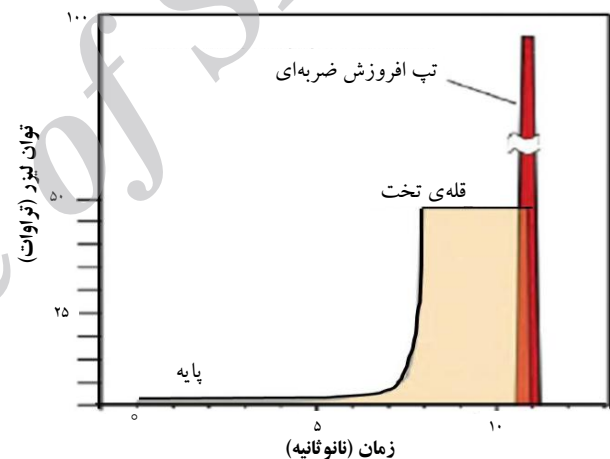
۳. محرک افروزنده‌ی دوگانه

طرح ارایه شده در این پژوهش، استفاده از دو موج ضربه‌ای همسان و کم-انرژی به عنوان تپ افروزنده است. در این روش، استفاده از دو تپ ذوزنقه‌ای با زمان صعود ۵۰ پیکوثانیه و قله‌ی توان ۶۰ تا ۲۰۰ تراوات و پهنای ۱۵۰ تا ۲۵۰ پیکوثانیه، با تأخیر زمانی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴، نمودار بهره‌ی هدف برحسب قله‌ی توان تپ افروزنده را برای دو پهنای مختلف تپ و تأخیرهای زمانی ۰ و ۵۰ پیکوثانیه نشان می‌دهد. زمان آغاز تپ افروزنده برای تمامی موردها لحظه‌ی ۱۰/۲ نانوثانیه است. براساس نتیجه‌های به دست آمده، نمایه مزیت^(۱۱) تپ ضربه‌ی دوگانه را با توجه به ثابت ماندن انرژی تپ متراکم کننده به صورت $FM_{ig} = (G/G_{HiPER}) \times (E_{ig}/E_{ig2})$ تعریف می‌کنیم که در آن G و E_{ig2} به ترتیب، بهره‌ی هدف و انرژی تپ افروزنده در افروزش با محرک افروزنده‌ی دوگانه، و G_{HiPER} و E_{ig} به ترتیب، بهره‌ی هدف و انرژی تپ افروزنده در تپ مرجع استفاده شده در افروزش ضربه‌ای است [۸]. نمایه مزیت در واقع معیاری است برای مقایسه‌ی دو روش که به وسیله‌ی آن مزیت مدل پیشنهادی ارزیابی می‌شود. این رویکرد در مرجع [۱۰] نیز مورد استفاده قرار گرفته است. نتیجه‌ی محاسبات برای تپ‌های ۲۰۰ پیکوثانیه‌ای در جدول ۱ و نمودار نمایه مزیت در شکل ۵ آورده شده است.

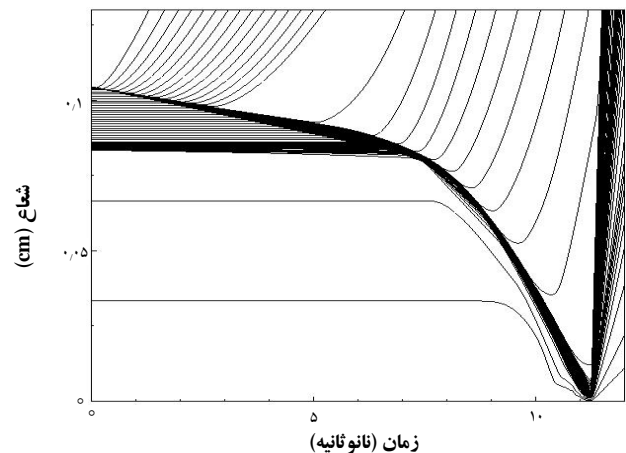
همان‌طور که در جدول ۱، مشاهده می‌شود مقدار نمایه مزیت برای توان‌های بیش از ۸۰ تراوات بزرگ‌تر از یک است. هم‌چنین نمودار بهره‌ی پیشینه‌ی هدف برحسب توان تپ با پهنایهای مختلف تپ در شکل ۶ ترسیم شده است. بهره‌ی پیشینه در زمان شروع تپ افروزنده، به گونه‌ای است که بیش‌ترین مقدار بهره‌ی هدف حاصل شود.

نمایه مزیت در این حالت به صورت $FM_{total} = (G/G_{HiPER}) \times (E_{tot}/E_{tot2})$ تعریف می‌شود که در آن E_{tot2} و E_{tot} انرژی کل محرک برای به ترتیب، تپ مرجع و تپ محرک دوگانه است. مقدارهای نمایه مزیت برای سه تپ با پهنایهای مختلف نسبت به تپ مرجع برای حالتی که تأخیر زمانی ۵۰ پیکوثانیه است، در جدول ۲ آورده شده است. در شکل ۷ نمودار نمایه مزیت برای هر سه تپ مورد بررسی نسبت به انرژی کل محرک رسم شده است. در این جا نیز مشاهده می‌شود که استفاده از دو تپ با پهنای کم‌تر نسبت به تک تپ استفاده شده در تسهیلات پژوهشی انرژی لیزر توان-بالا دارای نمایه مزیت بیش‌تر از یک است.

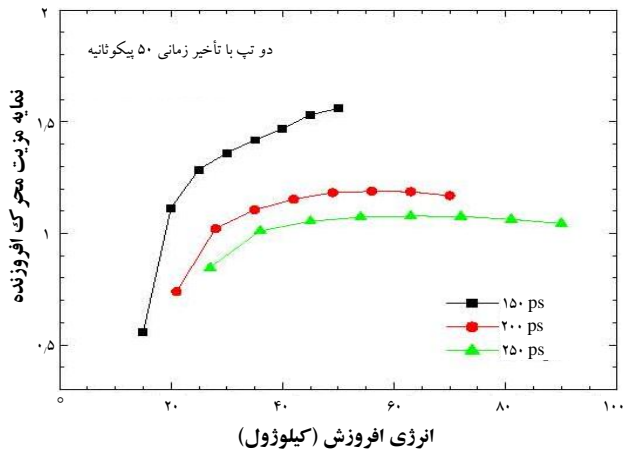
به منظور اطمینان از صحت نتیجه‌های شبیه‌سازی مدل ارایه شده در این مقاله، ابتدا شبیه‌سازی یک بعدی افروزش ضربه‌ای [۸] که با کد دوئد^(۱۰) انجام شده است [۹] تکرار شد. برای این محاسبات طول موج تپ لیزر $\lambda_L = 0.35 \mu m$ بود و همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تپ متراکم کننده در لحظه‌ی $t=0$ با توان کم و ثابت ۰/۵ تراوات آغاز و توان آن از لحظه‌ی ۴ تا ۷/۵ نانوثانیه به صورت خطی افزایش یافته و سپس به مدت ۲/۷ نانوثانیه با قله‌ی ثابت ۲۵ تراوات ادامه می‌یافت. تپ افروزنده در زمان $t_s = 10/2$ نانوثانیه آغاز و به مدت ۲۰۰ پیکوثانیه به صورت خطی به توان ۸۰ تراوات می‌رسید و پس از ۳۰۰ پیکوثانیه با شیب اولیه، به صفر کاهش می‌یافت. شکل ۳ تحول زمانی شعاع هدف به دست آمده با استفاده از کد مالتی را نشان می‌دهد که در توافق کامل با نتیجه‌های آتزنی و همکاران [۸] است.



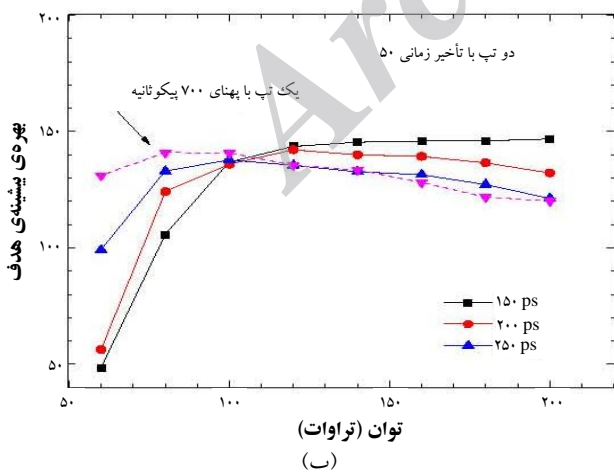
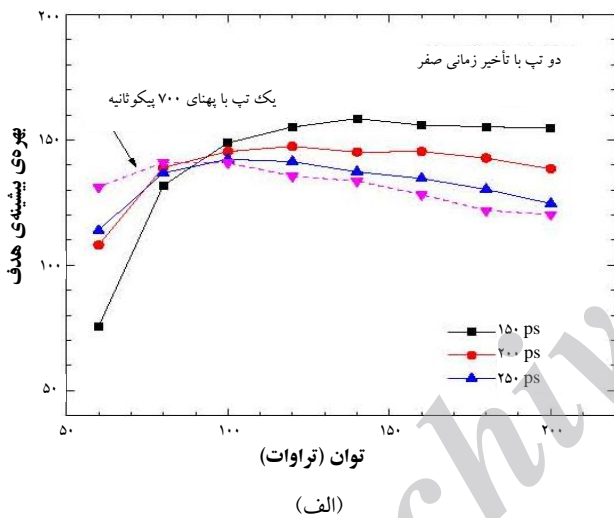
شکل ۲. تحول زمانی تپ محرک متراکم کننده و افروزنده‌ی لیزری در افروزش ضربه‌ای استفاده شده در پژوهش حاضر و به وسیله‌ی آتزنی و همکاران [۸].



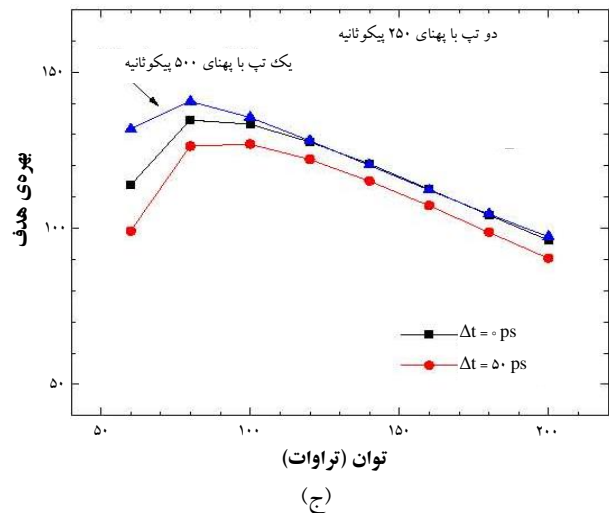
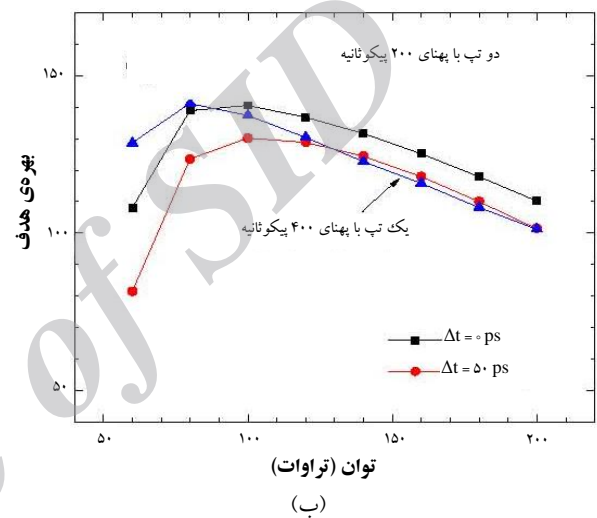
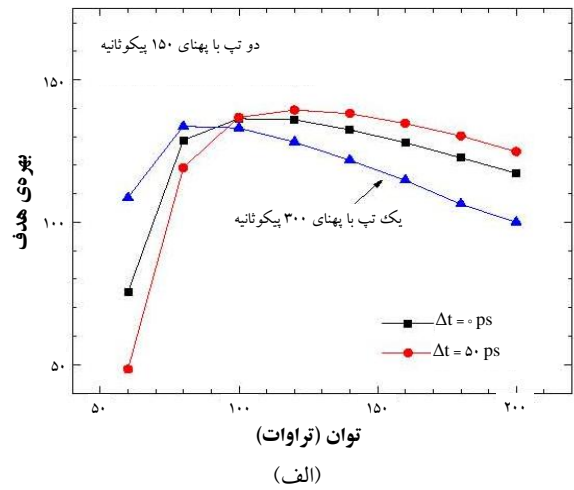
شکل ۳. تحول زمانی محاسبه شده برای اجزای جرم هدف متناظر با شکل ۱.



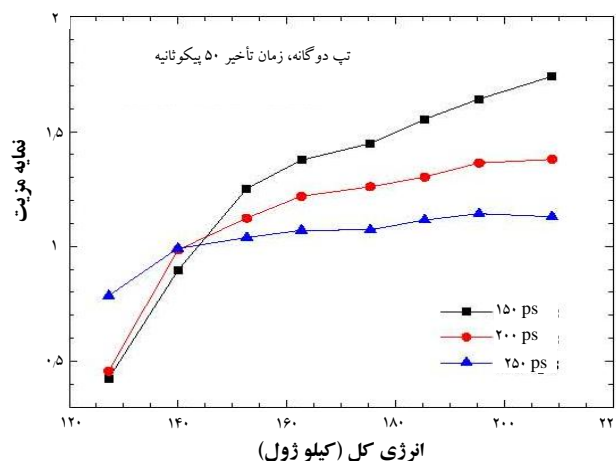
شکل ۵. رابطه‌ی بین نمایه مزیت و انرژی افروزش برای محرک افروزنده با دو تب افروزنده با پهنای متفاوت و مقایسه‌ی آن با یک تب افروزنده مرجع [۷]. زمان آغاز تب افروزنده، ۱۰۲ نانوثانیه است. در تمام موردها تأخیر زمانی میان دو تب محرک ۵۰ پیکوثانیه است. انرژی مترکم کننده‌ی هدف برای تمام موردها برابر هستند.



شکل ۶. بهره‌ی بیشینه‌ی هدف، G_{max} ، به صورت تابعی از توان تب افروزنده. دو تب با تأخیر زمانی (الف) صفر و (ب) ۵۰ پیکوثانیه. به منظور مقایسه، در هر دو حالت بهره‌ی هدف برای تک تب مرجع نیز نشان داده شده است.



شکل ۴. رابطه‌ی بین بهره‌ی هدف و توان تب افروزنده برای انرژی محرک مترکم کننده برابر؛ (الف) ۲ تب با پهنای ۱۵۰ پیکوثانیه و یک تب با پهنای ۳۰۰ پیکوثانیه، (ب) ۲ تب با پهنای ۲۰۰ پیکوثانیه و یک تب با پهنای ۴۰۰ پیکوثانیه و (ج) ۲ تب با پهنای ۲۵۰ پیکوثانیه و یک تب با پهنای ۵۰۰ پیکوثانیه.



شکل ۷. مقایسه‌ی نمایه مزیت استفاده از دو تب با پهنایهای مختلف با یک تب افروزنده، در انرژی‌های کل مختلف تب مرجع (در هر مورد زمان آغاز تب افروزنده به گونه‌ای است که بهره‌ی بیشینه حاصل شود).

جدول ۱. نمایه مزیت و ویژگی‌های محرک افروزنده با تب دوگانه (با پهنای ۲۰۰ پیکوثانیه) و تک تب (با پهنای ۴۰۰ پیکوثانیه)

توان (تراوات)	بهره‌ی هدف		انرژی تب افروزنده		نمایه مزیت دو تب	
			تک تب ۴۰۰	دو تب ۲۰۰	تأخیر زمانی صفر	تأخیر زمانی ۵۰
	تک تب ۴۰۰ پیکوثانیه	دو تب ۲۰۰ پیکوثانیه	پیکوثانیه	پیکوثانیه	پیکوثانیه	پیکوثانیه
۶۰	۱۲۸	۸۱	۲۱	۱۸	۰٫۹۷۹	۰٫۷۳۸
۸۰	۱۴۱	۱۲۳	۲۸	۲۴	۱٫۱۴۸	۱٫۰۲۱
۱۰۰	۱۳۷	۱۳۰	۳۵	۳۰	۱٫۱۹۳	۱٫۱۰۵
۱۲۰	۱۳۰	۱۲۹	۴۲	۳۶	۱٫۲۲۴	۱٫۱۵۲
۱۴۰	۱۲۳	۱۲۴	۴۹	۴۲	۱٫۲۵۱	۱٫۱۸۲
۱۶۰	۱۱۶	۱۱۸	۵۶	۴۸	۱٫۲۶۲	۱٫۱۸۸
۱۸۰	۱۰۸	۱۱۰	۶۳	۵۴	۱٫۲۷۲	۱٫۱۸۷
۲۰۰	۱۰۱	۱۰۱	۷۰	۶۰	۱٫۲۷۱	۱٫۱۶۹۵

جدول ۲. نمایه مزیت و ویژگی‌های تب افروزنده‌ی دوگانه و تک تب (انرژی در تمام حالت‌ها برحسب کیلو ژول است)

توان (تراوات)	بهره‌ی هدف دو تب			انرژی کل (HiPER)	انرژی کل دو تب			انرژی کل تک تب ۷۰۰ ps	نمایه مزیت دو تب		
	۱۵۰ ps	۲۰۰ ps	۲۵۰ ps		۱۵۰ ps	۲۰۰ ps	۲۵۰ ps		۱۵۰ ps	۲۰۰ ps	۲۵۰ ps
۶۰	۴۸	۵۶	۹۹	۱۲۷٫۳	۱۱۰٫۶	۱۱۹٫۴	۱۲۳	۱۲۷	۰٫۴۲	۰٫۴۶	۰٫۷۸
۸۰	۱۰۶	۱۲۴	۱۳۳	۱۴۰	۱۱۷٫۴	۱۲۵٫۴	۱۳۳	۱۴۰	۰٫۸۹	۰٫۹۸	۰٫۹۹
۱۰۰	۱۳۷	۱۳۶	۱۳۸	۱۵۲٫۷	۱۱۸٫۷	۱۳۱٫۴	۱۴۴	۱۵۳	۱٫۲۵	۱٫۱۲	۱٫۰۴
۱۲۰	۱۴۴	۱۴۲	۱۳۵	۱۶۲٫۷	۱۲۵٫۴	۱۴۰٫۱	۱۵۲	۱۶۳	۱٫۳۷	۱٫۲۲	۱٫۰۷
۱۴۰	۱۴۵	۱۴۰	۱۳۳	۱۷۵٫۴	۱۳۲	۱۴۶٫۱	۱۶۳	۱۷۵	۱٫۴۵	۱٫۲۶	۱٫۰۷
۱۶۰	۱۴۶	۱۳۹	۱۳۱	۱۸۵٫۴	۱۳۶	۱۵۴٫۸	۱۷۱	۱۸۵	۱٫۵۵	۱٫۳۰	۱٫۱۱
۱۸۰	۱۴۶	۱۳۶	۱۲۷	۱۹۵٫۴	۱۴۲٫۸	۱۶۰٫۸	۱۷۹	۱۹۵	۱٫۶۴	۱٫۳۶	۱٫۱۴
۲۰۰	۱۴۷	۱۳۲	۱۲۱	۲۰۸٫۸	۱۴۶٫۷	۱۶۶٫۸	۱۸۷	۲۰۹	۱٫۷۴	۱٫۳۸	۱٫۱۳

حاضر نشان داد که در روش افروزش ضربه‌ای، تقسیم تب افروزنده به دو تب کم-انرژی و برابر می‌تواند به نحو مؤثری منجر به کاهش انرژی کل محرک‌های افروزنده‌ی لیزری شود. نتیجه‌ی شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی یک بعدی نشان می‌دهد که با استفاده از دو موج ضربه با تأخیر زمانی مناسب، می‌توان با

۴. نتیجه‌گیری

روش جدید افروزش ضربه‌ای پیشرفت بزرگی در هم‌جوشی هسته‌ای با استفاده از محصورسازی لختی به شمار می‌رود. اما کاستن از انرژی محرک‌های لیزری برای احداث نیروگاه‌های هسته‌ای هم‌چنان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش



مرجع‌ها

- [1] K.S. Anderson, R. Betti, P.W. McKenty, T.J.B. Collins, M. Hohenberger, W. Theobald, R.S. Craxton, J.A. Delettrez, M. Lafon, J.A. Marozas, R. Nora, S. Skupsky, A. Shvydky, A polar-drive shock-ignition design for the National Ignition Facility, *Phys. Plasma*, 20 (2013) 056312.
- [2]. R. Betti, C.D. Zhou, K.S. Anderson, L.J. Perkins, W. Theobald, A.A. Solodov, Shock ignition of thermonuclear fuel with high areal density, *Phys. Rev. Lett.*, 98 (2007) 155001.
- [3] M. Lafon, X. Ribeyre, G. Schurtz, Gain curves and hydrodynamic modeling for shock ignition, *Phys. Plasma*, 17 (2010) 052704.
- [4] O. Klimo, S. Weber, V.T. Tikhonchuk, J. Limpouch, Particle-in-cell simulations of laser-plasma interaction for the shock ignition scenario, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 52 (2010) 055013.
- [5] X. Ribeyre, G. Schurtz, M. Lafon, S. Galera, S. Weber, Shock ignition: an alternative scheme for HiPER, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 51 (2009) 015013.
- [6] R. Ramis, J. Meyer-ter-Vehn, J. Ramirez, MULTI2D a computer code for two-dimensional radiation hydrodynamics, *Computer Physics Communications*, 180 (2009) 977.
- [7] S. Atzeni, A. Schiavi, C. Bellei, Targets for direct-drive fast ignition at total laser energy of 200–400 kJ, *Phys. Plasmas*, 14 (2007) 052702.
- [8] S. Atzeni, A. Schiavi, A. Marocchino, Studies on the robustness of shock-ignited laser fusion targets, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 53 (2011) 035010.
- [9] S. Atzeni, A. Schiavi, F. Califano, F. Cattani, F. Cornolti, D. Del Sarto, T.V. Liseykina, A. Macchi, F. Pegoraro, Fluid and kinetic simulation of inertial confinement fusion plasmas, *Comput. Phys. Commun.*, 169 (2005) 153.
- [10] A.H. Farahbod, S.A. Ghasemi, Fast-shock ignition: a new approach to inertial confinement fusion, *IJPR*, 12 (4) (2013) 347.

کاستن از انرژی محرک، بهره‌ای معادل با افروزش ضربه‌ای به دست آورد. در این مقاله پس از به دست آوردن نتیجه‌ی محاسبه‌ها برای تپ مرجع استفاده شده برای افروزش ضربه‌ای در پروژه‌ی تسهیلات پژوهشی انرژی لیزر توان-بالا، مدل پیشنهادی برای تپ افروزنده شبیه‌سازی شده و نمودارهای بهره‌ی هدف در مقایسه با تپ مرجع به دست آمد. سپس با تعریف نمایه‌ی مزیت برحسب مقدارهای بهنجار شده‌ی بهره و انرژی محرک در سازوکار افروزش ضربه‌ای با استفاده از موج ضربه‌ی دوگانه، مقدار نمایه‌ی مزیت در بازه‌ی ۱/۱ و ۱/۷ به دست آمد.

پی‌نوشت‌ها

1. Stagnation stage
2. Areal density
3. Implosion
4. Stimulated Raman Scattering (SRS)
5. Stimulated Brillouin Scattering (SBS)
6. MULTI
7. High Power laser Energy Research Facility (HiPER)
8. Flux limited spitzer thermal conduction
9. SESAME
10. DUED
11. Figure of merit