مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۲، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۱



افروزش سریع- شوکی رهیافتی نوین برای همجوشی محصور سازی اینرسی

امیر حسین فرهبد و سید ابوالفضل قاسمی

پژوهشکدهٔ لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران پست الکترونیکی: afarahbod@aeoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۱۴ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۱/۸/۱۰)

چکیدہ

در این مقاله رهیافت نوینی برای همجوشی محصور سازی اینرسی به نام افروزش سریع- شوکی معرفی شده است. مدل ارائه شده نشان میدهد که تحت شرایط مناسب، جدا کردن افروزش سوخت متراکم شده به دو مرحله میتواند منجر به کاهش انرژی کل برای افروزش سوخت و افزایش بهرهٔ انرژی شود. در این روش پس از مرحلهٔ ایستایی سوخت، در دو مرحله، و با اعمال تپ کوتاه پر توان لیزر به روش افروزش سریع و موج ضربه به روش افروزش شوکی و با تأخیر زمانی مناسب، و انرژی و توانی کمتر از آنچـه کـه در هـر روش به تنهایی به کار میرود، دمای لکهٔ داغ مؤثر پدید آمده افزایش یافته و افروزش سوخت کامل میشود. مدل تحلیلی ارائه شده بر پایهٔ نتایج محاسبات عـددی بـرای آسـتانهٔ آغاز همجوشی برای لکهٔ داغ محصور شده با سوخت متراکم شده نشان میدهد که با اعمال روش ترکیبی افروزش سریع- شوکی و به ازای جرم اولیه ثابت سوخت، از آنـرژی کـل آغاز همجوشی برای لکهٔ داغ محصور شده با سوخت متراکم شده نشان میدهد که با اعمال روش ترکیبی افروزش سریع- شوکی و به ازای جرم اولیه ثابت سوخت، از آنـرژی کـل لازم برای افروزش سوخت در مقایسه با انرژی افروزش شوکی کاسته میشود. در این حال پهرهٔ انرژی تا ۱۵ درصد افزایش میدید که مزیت مهمی محسوب میشود. با تنظیم مناسب محرک افروزندهٔ شوکی و همزمان حفظ مزایای اشاره شده برای هدف با جرم سوخت بیش از ۲ میلی گرم میتوان از سهم محرک افروزندهٔ سریع تا مدود ۲۰ درصد نسبت به شرایط مشابه با ساز و کار صرفاً افروزش سریع کاست. ویژگی ای ۲ میلی گرم میتوان از سهم محرک افروزندهٔ سریع تا حدود ۲۰ درصد نسبت به شرایط مشابه با ساز و کار صرفاً افروزش سریع کاست. ویژگی اخیر از دیدگاه فناوری ساخت محرکهای پر انرژی لیزر با پهنای تپ چند پیکوثانیه از اهمیت فراوانی برخوردار است. نمایهٔ مزیت برای روش افروزش سریع کاست. ویژگی اخی از دیدگاه فناوری ساخت محرکه می پر انرژی لیزر با پهنای تپ هری از اهمیت فراوانی برخوردار

واژههای کلیدی: افروزش سریع، افروزش شوکی، افروزش سریع- شوکی، همجوشی محصورسازی اینرسی، مدل نا هم فشار

محاسبات نشان می دهند که انرژی افروزش^⁴ در ساز و کار افروزش سریع به صورت $P_c^{-r} \sim \rho_c^{-r}$ به چگالی سوخت متراکم شده ($P_c(g.cm^{-r})$ وابسته است [۲ و ۷]. محاسبات عددی اتزنی⁶ نشان می دهند که برای افروزش سریع سوخت به کمک باریک هٔ الکترونی نسبیتی و به ازای برد کمک انرژی های سریع، انرژی

۱. مقدمه
افروزش سریع روشی مؤثر برای همجوشی محصور سازی افروزش سریع روشی مؤثر برای همجوشی محصور سازی اینرسی به شمار میآید [۱ – ۴]. در این روش بر خلاف مدل افروزش مرکزی⁷، مرحلهٔ متراکم کردن سوخت تا مرحلهٔ افروزش سوخت فشرده شده جدا شده است و بدین ترتیب بهرهٔ انرژی از مرتبه ۱۰۰-G بهدست میآید [۴–۸].

^{1.} Fast ignition

۲. Central ignition

۳. Stagnation

۴. Ignition energy

۵. Atzeni

, $r_{opt} = \mathcal{F} \circ \hat{\rho}_c^{-\circ/4V}$ (µm) (۲) , $r_{opt} = \mathcal{F} \circ \hat{\rho}_c^{-\circ/4V}$ (µm) (۲)) که آن را با E_{if}^{opt} نشان میدهیم، انرژی آستانه برای آغاز افروزش سریع است و به کمترین مقدار بهرهٔ انرژی به ازای $\rho_c = \mathfrak{P} \circ \mathfrak{g.cm}^{-r}$ معلوم منجر می شود. برای چگالی $r_c = \mathfrak{P} \circ \mathfrak{g.cm}^{-r}$ ρ_c معلوم منجر می شود. برای چگالی $\eta_{if} = \circ/70$ انرژی لکهٔ داغ داریم:

 $E_{hf}^{opt} = \eta_{if} E_{if}^{opt} = 1 \wedge / \pi \text{ kJ.}$ ساخت محرکهای لیزری پیکو ثانیه ی با انرژی از مرتبه ۱۰۰ کیلو ژول مهم ترین معضل فنی برای اجرای روش افروزش سریع به شمار میآید. از سوی دیگر تمرکز باریکهٔ لیزر افروزنده ۲ تا شعاع کمتر از ۳۵ بر روی هدف نیز کار آسانی نیست. در روش افروزش شوکی ^۳ نیز دو مرحله تراکم سوخت و افروزش سوخت از یکدیگر جدا شده اند و همچنین در این روش نیازی به باریکههای پر انرژی پتا واتی و پیکوثانیه ای لیزر نمی باشد [۱۵–۱۸]. با این حال به نظر می رسد که بتوان با به کارگیری مزایای هر دو روش افروزش به می رسد که بتوان با به کارگیری مزایای هر دو روش افروزش به می رسد که بتوان با به کارگیری مزایای هر دو روش افروزش به می رسد که بتوان با به کارگیری مزایای هر دو روش افروزش به می رسد که بتوان با به کارگیری مزایای هر دو روش افروزش به می سریع و افروزش شوکی به همراه تفکیک مرحلهٔ افروزش به دو مرحله، مزیت بیشتری نسبت به اجرای هر روش به تنهایی

۲. افروزش سریع - شوکی

در روش پیشنهادی افروزش سریع – شوکی، همجوشی محصور سازی اینرسی در ۳ مرحله انجام میشود: تراکم ریزکره سوخت تا مرحلهٔ ایستایی و افروزش در دو مرحله به گونهای که در هر مرحله انرژی محرک افروزنده کمتر از آن است که بتواند سوخت متراکم شده را به تنهایی به نحو مؤثر و کارآمدی مشتعل سازد، شکل ۱. باریکهٔ افروزندهٔ سریع را می توان به روش اعمال تپ پر توان لیزر با پهنای در حد ۱۰۰ پیکوثانیه برای پس زنی سطح بحرانی پلاسمای سوخت متراکم شده [۱] باریکههای متراکم کننده و افروزندهٔ سوخت



شکل ۱. سازوکار افروزش سریع – شوکی. فرآیند همجوشی سوخت متراکم شده با چگالی ρ_c و شعاع *R*_c در دو مرحله و با تـأخیر زمـانی مناسب میان افروزش شوکی برای لکـهٔ داغ مرکـزی بـا شـعاع *R*_h و چگالی phs ، و افروزش سریع لکـهٔ داغ کنـاری بـا شـعاع *R*_h کـه بـا استفاده از باریکهٔ لیزر پر توان با پهنای تپ کوتاه و تولید الکترونهای نسبیتی و جذب آنها در سوخت انجام می شود.

مورد نیاز برای محرک لیزری با رابطهٔ (۱) داده می شود [۷]. ارتباط انرژی محرک E_{if} ، و انرژی لکهٔ داغ E_{hf} ، برابر است با $E_{if} = E_{hf} / \eta_{if}$ ضریب جفت شدگی باریکهٔ محرک لیزر با سوخت است.

$$E_{if} = \max(E_{\gamma}, E_{\gamma}) \tag{1}$$

$$E_{\gamma} = \frac{\Delta \mathcal{P} \circ}{\left(\hat{\eta}_{if}\right)} \left(\hat{\rho}_{c}\right)^{-\gamma/\Lambda\Delta} \times \max(\gamma, \frac{r_{b}}{r_{opt}}) (kJ),$$
$$E_{\gamma} = \gamma \gamma \gamma \circ \left(\hat{\rho}_{c}\right)^{-\circ/\gamma} \left[\frac{\gamma/\gamma}{R_{o}} \frac{f_{R} \hat{\lambda}_{if}}{\hat{\eta}_{if}}\right]^{\gamma} (kJ),$$

 R_{\circ} حد بالای برد الکترونها در سوخت است. برد الکترونها، R_{\circ} R_{\circ} حد بالای برد الکترونها در سوخت است. برد الکترونها، R_{\circ} R جه حسورت (r_{\circ} (g.cm⁻¹) R, R = R = R = R + R = R = R = R = R بسه دمیای الکترون، (MeV) f_{fast} (MeV) و ابسته است. ضریب f_{r} در حد I الکترون، (f_{rot} (f_{rot} $R = \frac{N_{if}}{N_{o}}$, $\hat{\eta}_{if} = \frac{N_{if}}{N_{o}}$ و $\frac{N_{if}}{N_{o}}$ $R = \frac{N_{if}}{N_{o}}$ $R = \frac{N_{if}}{N_$

```
۱. Hot spot
```

۲. Ignitor

۳. Shock ignition

Fast-shock ignition



شکل۲. رفتار نسبت حداقل انرژی افروزش برای ساز و کار افروزش سریع E_{hf}^{opt} به انرژی آستانهٔ همجوشی لکهٔ داغ E_T بر حسب چگالی سوخت متراکم شده، رابطهٔ (۳).

و ایجاد مسیری برای ارسال تپ کوتاه افروزنده سریع از مرتبهٔ ۲۰ پیکوثانیه، و یا نظیر شکل ۱ با استفاده از مخروط طلا، برای تولید لکهٔ داغ کناری از طریق جذب الکترونهای سریع نسبیتی پدید آمده در سوخت، تا نزدیکی لکهٔ داغ مرکزی هدایت نمود [۳].

محاسبات عددی (۲۰۰۵) اسلاتز ^۱ نشان داده است که انرژی آستانهٔ ^۲ E_T برای آنکه بهرهٔ همجوشی تنها برای لکهٔ داغی که بـا سوخت متراکم شده بـا چگـالی (P_c (g.cm^{-۳} محصـور شـده است به ۱ برسد (۱ = G_{HS})، مطابق با رابطهٔ (۳) است [۱۳].

$$E_T = \mathbf{v} / \Delta \left(\frac{\rho_c}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}\right)^{-1/AV} \quad (kJ) \tag{(Y)}$$

طبق تعریف، انرژی E_T برای تولید موج سوختن و آغاز افروزش سوخت متراکم شده کافی نمیباشد. با تقسیم کردن $E_{hf}^{opt} = \eta_{if} E_{h} = 14^{\circ} \rho_c^{-1/\Lambda 0}$ بر رابطهٔ (۳) در می بایم که برای $P_c = (0^{\circ} - 0^{\circ})$ مقدار انرژی آستانه E_T به طور متوسط، ۱۸/۷۷ مرتبه از حداقل مقدار انرژی لازم برای افروزش سوخت کوچکتر است و بستگی کوچکی به ρ_c دارد، رابطهٔ

بشکل ۲ رفتار
$$rac{E_{hf}}{E_T}$$
 را بر حسب ho_c نشان میدهد. (۴). شکل ۲ رفتار ho_c

$$\frac{E_{hf}}{E_T} \approx v / \circ r \mathfrak{r} \rho_c^{\circ / \circ \mathfrak{r}} , \qquad (\mathfrak{r})$$

۱. Slutz

۲. Break-even energy

مدل نا هم فشار ⁷ [۱۰، ۱۰] و رابط ف (۵) به چگالی سوخت
متراکم شده و پارامترهای مدل وابسته است.

$$E_{hs} = \delta/Y^{4\times10^{11}} (\beta\gamma)^{7} c^{7} \alpha^{-7} \rho_{c}^{-7/17}$$
 (kJ).
(۵)
 $E_{hs} = \delta/Y^{4} \lambda^{10} (\beta\gamma)^{7} c^{7} \alpha^{-7} \rho_{c}^{-7/17}$ (kJ).
 ϵ (c) ابط ف (۵)، پارامتر آدیاباتیک ۵، برابر است با فشار سوخت
 δ مثرا کم شده به فشار فرمی و ٤ نسبت فشار سوخت متراکم شده
 $f^{8} m_{hs} = 0.7 \beta$ (g cm⁻⁷), (۶)
 $f^{8} m_{hs} = 0.7 \beta$ (g cm⁻⁷), (8)
 $f^{8} m_{hs} = 0.7 \beta$ (g cm⁻⁷), (9)
 $f^{8} m_{hs} = 0.7 \beta$ (g cm⁻⁷), (9)
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV). (10)
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV).
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV). (10)
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV).
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV). (10)
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV).
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV). (10)
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV).
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV). (10)
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV).
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV). (10)
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV).
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV). (10)
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV).
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV). (10)
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV).
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (keV) (10)
 $f^{10} m_{hs} = \delta\gamma$ (10)
 f^{10}

در ساز و کار افروزش شوکی، انرژی لکهٔ داغ مرکزی *E*_{hs} طبق

۳. Non-isobaric model

(g)
$$M_h = \frac{{}^{\mathbf{r}}\pi}{{}^{\mathbf{r}}} R_h{}^{\mathbf{r}} \rho_h = {}^{\mathbf{r}}/{}^{\mathbf{r}} \Lambda {}^{\mathbf{r}} \beta^{\mathbf{r}} \gamma^{\mathbf{r}} \varepsilon^{\mathbf{r}} P_c^{-\mathbf{r}}$$
, (17)

(Gbar)
$$P_c = \tau / \tau \times v e^{-\tau} \alpha \rho_c^{\frac{\alpha}{\tau}}$$
, (1°)

.
$$M_f = M_c + M_h$$
 یا جرم کل سوخت برابر است با: M_f No $_{\mathcal{S}^\prime}(B_{\mathcal{S}^\prime})^r$ s $^r P^{-r}$

$$E_{L} = \frac{(\eta \gamma (\rho_{f}) \epsilon^{\gamma} T_{c})}{\eta_{is}} + \frac{\tau / \gamma \alpha^{\circ/\varsigma} P_{c}^{\circ/\varsigma} M_{f} - \eta_{c} \wedge \beta \gamma \alpha^{\circ/\varsigma} \beta^{\tau} \gamma^{\tau} \epsilon^{\tau} P_{c}^{-\eta/\varsigma}}{\eta_{c}}.$$
 (14)

با صفر قرار دادن مشتق پارهای رابط ۱۹ (۱۴) نسبت به P_c و مرفنظر کردن از جملهٔ سوم در سمت راست رابط ۱۹ (۱۹) که مرف نظر کردن از جملهٔ سوم در سمت راست رابط ۱۹ (۱۹) که سبب خطایی در حد ۲ درصد برای E_L به ازای ۲ $\propto \gamma \propto \infty$ و مبب خطایی در حد ۲ درصد برای فشار بهینهٔ سوخت متراکم مدر کم $\eta_c \approx \eta_{is}$ می شود، رابطهٔ (۱۵) برای فشار بهینهٔ سوخت متراکم شده برای حداقل انرژی کل محرک لیزر به دست می آید. (Gbar) $P_c^{opt} = ۲۹/ \Lambda ۲۵ \alpha^{-0/10} (\beta \gamma)^{1/10} \varepsilon^{0/1777} M_f^{-0/159}$ (1۵) (Gbar) $P_c^{opt} = ۲۹/ \Lambda ۲۵ \alpha^{-0/10} (\beta \gamma)^{1/10} \varepsilon^{0/1777} M_f^{-0/159}$ (1۵) با قرار دادن P_c^{opt} در سمت چپ رابطهٔ (۱۳)، رابطهٔ (۱۶) برای $\frac{\partial E_L}{\partial P_c} = \pi c^{opt}$ تحت شرط $\sigma = \frac{2}{\rho_c^{opt}}$ به دست می آید. $\rho_c^{opt} = \pi c^{0/1} (\beta \gamma)^{0/10} \varepsilon^{0/10} (g.cm^{-7})$ (19) به دست می آید. $\rho_c^{opt} = \pi c^{0/10} (\beta \gamma)^{0/10} \varepsilon^{0/10} (g.cm^{-7})$ (19) ندرا برای ارابط هٔ (10) داده می شود. در این حالت η_f می تواند بزرگتر از یک باشد.

$$, \left(\frac{E_{hf}^{opt}}{\eta_{if}E_{if}}\right)\chi_{f} + \left(\frac{\left(E_{ho} + \left(E_{hs} - E_{ho}\right)\chi_{s}\right)}{E_{hs}}\right)\chi_{s} = 1 \qquad (1V)$$

انرژی لکهٔ داغ مرکزی است که طی فرآیند فشردن E_{ho} سوخت پدید میآید. E_{ho} به کمک رابطهٔ (۵) و روابط (۳۷) الی (۳۹) برای محاسبهٔ ضرایب β_o ، β_o و σ_o جهت افروزش مرکزی حاصل می شود.

رفتار χ_f بر حسب χ_s مطابق با رابطهٔ (۱۰) و (۱۷) برای معدار متفاوت M_f ، متناظر با مقادیر مدل نا هم فشار جدول ۱ در شکل ۳ نشان داده شده است. ضرایب مدل نا هم فشار را به نحوی تنظیم نمودهایم تا رفتار بهرهٔ انرژی انرژی الکترونهای سریع پدید آمده از تپ کوتاه لیزر در مرحلهٔ دوم افروزش، صرف گرمایش لکهٔ داغ کناری می شود و مطابق با شکل ۱ لکه داغ مرکزی ناشی از افروزش شوکی و لکهٔ کناری جمعاً لکهٔ داغ معادلی را پدید می آورند که انرژی آن پلاسمای چگال و متراکم در مرحلهٔ افروزش سریع به قدر کافی عمیق باشد به نحوی که برد الکترونهای داغ پدید آمده در حدی باشد که دو لکهٔ داغ عملاً در هم ادغام شوند، آنگاه رابطهٔ (۹) تا حد زیادی صحیح است. با قرار دادن مقادیر انرژی در رابطهٔ (۹)، رابطهٔ (۱۰) برای آستانهٔ افروزش ترکیبی با انرژی رابطهٔ (۹)، رابطهٔ (۱۰) برای آستانهٔ افروزش ترکیبی با انرژی

 $\chi_f + v/\delta rq \times v^{\circ}(\beta \gamma)^r \varepsilon^r \alpha^{-r} (\rho_c^{opt})^{-v/r} \chi_s = v.$ (1.) ρ_c^{opt} برای یافتن مقادیر مناسب $\chi_s e \chi_s$ ضروری است تا ρ_c^{opt} د مىدل نا معلوم باشد. برای یافتن ρ_c^{opt} ، از شرط $e = \frac{\partial E_L}{\partial P_c}$ در مىدل نا هم فشار برای یافتن حداقل انرژی محرک لیزر نسبت به فشار $E_L = \frac{E_{hs}}{\eta_{is}} + \frac{E_c}{\eta_c}$. محرک لیزر نسبت به فشار سوخت متراکم شده P_c استفاده می کنیم. $\frac{1}{\eta_{is}} + \frac{E_c}{\eta_c}$ انرژی انرژی کل محرک لیزری برای متراکم کردن و افروزش سوخت در مدل نا هم فشار برای افروزش شوکی است. E_c انرژی سوخت سرد متراکم شده و η و η_i به ترتیب بازدهی جفت مشدگی باریکهٔ لیزر با سوخت متراکم شده و لکهٔ داغ است. متراکم کردن و افروزش سوخت محرکهای لیزری برای متراکم کردن و افروزش سوخت میباشند. طبق مدل نا هم فشار M_c میراک متراکم متراکم به فشار برای متراکم کردن جرم تا چگالی ρ_c ، و اتراط چگالی به فشار برای گاز فرمی تبهگن طبق رابطه (۱۱) میباشد[10]

 $E_c = \circ / \operatorname{Tr} \alpha \, M_c \, \rho_c^{\circ / \varphi \varphi} \quad \text{(kJ)}, \tag{11}$

با توجه به روابط (۵) و (۶) برای E_{hs} و چگالی سطحی لکهٔ داغ و رابطهٔ (۱۲) برای جرم لکهٔ داغ، M_h ، به پارامترهای مدل ناهم فشار، و فرض گاز ایده ال برای معادلهٔ حالت لکهٔ داغ مرکزی و همچنین بستگی چگالی به P_c با فرض گاز فرمی برای سوخت متراکم شده که معادلهٔ حالت مربوط به آن با رابطهٔ (۱۳) داده می شود [۱۴]، رابطهٔ لازم برای بستگی انرژی کل

M_c (mg)		۰/۲۶۱	°/6737	1/310	7/094	4/191
$E_L(kJ)$		۲۳۰	۳۹۰	٧٢٧	1014	۱۷۰۰
α		٢	٢	١/٩	١/٨٥	١/٨
β		۰/٩۶	١/١	1/144	1/291	1/VV
γ		۶/۱	۱/۱۳	١/٥٥	1/110	•/VV
3		۰/۳۲۶	0/Y0¥	0/19¥	٥/٥٩۵	•/•AA۵
η_c		•/•V9۵	۰/۰۷۷۹	۰/۰۸۲	۰/۰V۵۹	•/•VQ•Q
η_{is}		٥/٥٧٢	۰/۰۶۵۵	٥/٥۶٥۵	۰/۰۵۸۹	৽/৽۶٩
$\rho_c^{\min} (g.cm^{-r})$		۸۲۸	۶۵۸	490	409	797
$V_{imp}(\times \circ^{\vee} cm / s)$		۲/۸	۲/۶	۲/۲	7/7	١/٩
$\frac{E_{is}}{E_L}$	پژوهش حاضر	°/199	°/199	•/199	•/199	°/199
	مرجع[١۵]	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲۱	•/17	۰/۲
$\rho R (g.cm^{-\gamma})$	پژوهش حاضر	۲/۵۸	٣	٣/۵	۳/۸۷	۴
	مرجع[١۵]	۲/۴	۲/۹	۳/۴	٣/۴	۴
G _{opt}	پژوهش حاضر	١٠٢	188	۲۰۲	۲۳۲	٣٠٢
	مرجع[١۵]	١٠١	144	۲۱۰	744	٣.٩
))		

جدول ۱. پارامترهای به کار رفته برای مدل نا هم فشار جهت افروزش شوکی.



شکل ۳. بستگی سهم هر یک از دو محرک افروزش سریع χ_f و افروزش شوکی _۶% در روش افروزش ترکیبی به جرم سوخت به ترتیب از چپ به راست: الف) E_{if} ≤ E₁ ، ب) . E_{if} ≤ E₁ . در این حالت μm ۵۳ / ۵۰ – ۸ است.

 $G_{T} = \frac{E_{F}}{E_{L}} = G_{T}^{\max} / (1 + E_{ig} / E_{cd}) . \tag{1A}$ $c_{T} = \frac{E_{F}}{E_{cd}} = \frac{E_{F}}{E_{cd}} \cdot (1 \wedge 1), \quad (1 \wedge 1)$ $e_{T} = \frac{E_{F}}{E_{cd}} \cdot (1 \wedge 1), \quad (1 \wedge 1) + \frac{1}{2} \cdot (1 \wedge 1), \quad (1 \wedge 1) + \frac{1}{2} \cdot (1 \wedge 1) + \frac{1}{2}$

هدف بر حسب انرژی محرک لیزر کمترین تفاوت را با مقادیر حاصل از محاسبات عددی مرجع [۱۵] داشته باشد، شکل۴.

۳. محاسبهٔ بهرهٔ انرژی برای ساز و کار افروزش ترکیبی تعریف عمومی بهره هدف G_T، مستقل از چگونگی ساز و کـار افروزش سوخت با رابطهٔ (۱۸) داده می شود. $G_T \approx \eta_c G_F = C_c$ با است، در این صورت: $G_T \approx \eta_c G_F \approx C_c$. با استفاده از تعریف $\frac{F_F}{E_{cd}} = \frac{E_F}{E_{cd}}$ برای حداکثر بهرهٔ هدف ساز و کار افروزش شروکی، رابطهٔ (۱۶) بررای ρ_c^{opt} ، و محاسبهٔ کرار افروزش شروکی، رابطهٔ (۱۶) برای ρ_c^{opt} ، و محاسبهٔ مدل نا هم فشار [۱۲]، ابتدا $\rho(\rho R)$ به کمک روابط موجود برای مدل نا هم فشار [۱۲]، ابتدا (ρR) و سپس رابطه (۱۳) برای حداکثر بهرهٔ هدف برای ساز و کار افروزش شروکی به دست.

 $G_{s}^{\max} = \pi\pi \Lambda f / \Im(\beta\gamma)^{-\circ/Y\Delta} M_{c}^{\circ/Y\Delta} \alpha^{-\circ/Y\Delta} \varepsilon^{-\circ/Y\Delta}$ (۲۳) G_{f}^{\max} رابطهٔ ارائه شده در مرجع [۲] برای G_{f}^{\max} رابطهٔ (۲۴) از رابطهٔ ارائه شده در مرجع (۲] برای مده است حداکثر بهرهٔ هدف ساز و کار افروزش سریع به دست آمده است و حداکثر بهره را تحت شرط $E_{if}^{opt} > E_{if}^{opt}$ ، برای ساز و کار افروزش سریع به صورت تابعی از طول موج لیزر افروزندهٔ سریع λ_{if} به صورت (λ_{if}) نشان می دهد.

$$\begin{split} G_{f}^{\max} &= A\eta_{c}^{\frac{v}{\varphi}}\eta_{if}^{\frac{v}{\varphi}} \left(\frac{E_{cd} + E_{if}}{\alpha^{v}}\right) \left(\frac{E_{cd} + E_{if}}{\alpha^{v}}\right)^{\frac{v}{\lambda}} \\ &\times \left(E_{cd} + E_{if}\right)^{\beta_{f}/4} \left(\frac{-\beta_{f}}{v}\right), \end{split} \tag{Yf}$$

ضرایب A و $\gamma \beta_{f}$ به ترتیب ۲۱۰۰۰ و ۲۰برای بهترین تطبیق نتایج حاصل از رابطهٔ (۲۴) با محاسبات مرجع [۶] برای بهرهٔ ساز و کار افروزش سریع به ازای m μ ۲۵/۰۰ = λ انتخاب شدند. α و γ_{r} مطابق با مقادیر جدول ۲ میباشند. روابط شدند. α و γ_{r} مطابق با مقادیر جدول ۳ میباشند. روابط (۲۳) و (۲۴) را جهت محاسبهٔ مزیت روش افروزش ترکیبی مورد استفاده قرار میدهیم. G_{fs}^{max} یا حداکثر بهره هدف در ساز و کار افروزش ترکیبی را با توجه به رابطهٔ عمومی (۱۸)، طبق رابطهٔ (۲۵) تعریف میکنیم. (۲۵) بهرهٔ انرژی برای مدل افروزش ترکیبی، G_{fs} ، نیز طبق رابطهٔ (۲۵). نظیر، بهرهٔ انرژی برای افروزش سریع و افروزش شوکی

$$G_{fs} = G_{fs}^{\max} / \left(1 + E_{ifs} / E_{cd} \right) \quad , \tag{14}$$

نیزر و $G_{fs}^{\max}(E_{cd}, \lambda_{if}, \lambda_c)$ تابعی از طول موج باریکه های لیـزر و انرژی باریکهٔ متراکم کننده لیزر E_{cd} است. E_{hfs} یا انرژی لکه داغ در ساز و کار افروزش سریع– شوکی طبق رابطهٔ (۲۷) برابر



شکل ۴. نتایج حاصل از مدل نا هم فشار متناظر با مقادیر مذکور در جدول ۱ و مقایسهٔ آن با محاسبات عددی اشمیت [۱۵] برای بستگی بهرهٔ انرژی به انرژی کل محرک لیزری برای افروزش شوکی، به ازای ۵ مقدار متفاوت جرم سوخت متراکم شده از ۲۶۱۱، تا ۴/۱۹ میلی گرم.

D-T آزاد شده بر واحد جرم به ازای سوختن مخلوط ۵۰:۵۰ سوخت D-T $\langle D+ \langle T \rightarrow \rangle n + \langle He + v / s \operatorname{MeV} \rangle$ در طی واکنش همجوشی محموط $\partial P = v + \rho R$ $\partial (\rho R) \approx \frac{\rho R}{v + \rho R} \approx \sigma_0$ باشد. برای همجوشی دتریوم -تریتیوم $\frac{\rho R}{v + \rho R} \approx (\rho R)$

جفت شدگی میانگین باریکهٔ لیزر با سـوخت، η، را مطـابق با مرجع [۲] تعریف میکنیم.

$$\eta E_L = E_c + E_h \tag{19}$$

با توجه به رابطهٔ (۱۹) و تعریف ضرایب جفت شدگی باریکههای متراکم کنندهٔ η_c و افروزندهٔ η_{ig} ، میتوان جفت شدگی میانگین و بهرهٔ سوخت را به صورت زیر نوشت.

$$\eta = \eta_c \, \frac{E_{cd}}{E_L} + \eta_{ig} \, \frac{E_{ig}}{E_L} \tag{(Y \circ)}$$

در این صورت بهرهٔ هدف بر حسب بهرهٔ سوخت، G_F، مطابق با رابطهٔ (۲۱) و (۲۲) می باشد.

$$G_F = \frac{E_F}{E_c + E_h} = \frac{\left(E_F / E_c\right)}{1 + \frac{E_h}{E_c}} = \frac{G_F^{\max}}{1 + \frac{E_h}{E_c}}, \qquad (\Upsilon1)$$

$$G_T = \frac{E_F}{E_L} = \eta \frac{E_F}{E_c + E_h} = \eta G_F . \tag{(YY)}$$

491

www.SID.ir

$$\theta_{fs} = \frac{\int\limits_{-\infty}^{R_c} \rho dr}{\frac{R_c}{V + \int \rho dr}} , \qquad (\Upsilon\Upsilon)$$

$$, \quad \int_{\circ}^{R_c} \rho dr = \int_{R'_{hs}}^{R_c} \rho_c dr + \int_{\circ}^{R'_{hs}} \rho'_{hs} dr + \int_{\circ}^{R'_{hf}} \rho_c dr \qquad (\Upsilon\Upsilon)$$

کمیتهای R'_hs، R'_hf و P'_hs به ترتیب متناظر با شعاع لکههای داغ ساز و کارهای سریع و شـوکی و چگـالی لکـهٔ داغ بـه ازای انرژی X_fE_{hf} و X_fE_{hs} می باشد.

با توجه به رابطهٔ (۱) مشاهده می شود که برای E_{if} = E_۱ داریم:

$$E_{hf}^{\prime} = E_{hf}^{opt} \chi_{f} = \mathbb{N} \cdot \left(\frac{\chi_{f}^{\prime}}{\mathbb{N} \cdot \mathbb{N}} \rho_{c}}{\mathbb{N} \cdot \mathbb{N}} \right)^{-1/N0} = \mathbb{N} \cdot \left(\frac{\chi_{f}^{-\circ/0^{\mathsf{F}}} \rho_{c}}{\mathbb{N} \cdot \mathbb{N}} \right)^{-1/N0}$$

$$= \mathbb{N} \cdot \left(\frac{\chi_{f}^{-\circ/0^{\mathsf{F}}} \rho_{c}}{\mathbb{N} \cdot \mathbb{N}} \right)^{-1/N0}$$

$$= \mathbb{N} \cdot \left(\frac{\chi_{f}^{-\circ/0^{\mathsf{F}}} \rho_{c}}{\mathbb{N} \cdot \mathbb{N}} \right)^{-1/N0}$$

$$= \mathbb{N} \cdot \left(\frac{\chi_{f}^{-\circ/0^{\mathsf{F}}} \rho_{c}}{\mathbb{N} \cdot \mathbb{N}} \right)^{-1/N0}$$

$$= \mathbb{N} \cdot \left(\frac{\chi_{f}^{-\circ/0^{\mathsf{F}}} \rho_{c}}{\mathbb{N} \cdot \mathbb{N}} \right)^{-1/N0}$$

$$= \mathbb{N} \cdot \left(\frac{\chi_{f}^{-\circ/0^{\mathsf{F}}} \rho_{c}}{\mathbb{N} \cdot \mathbb{N}} \right)^{-1/N0}$$

$$= \mathbb{N} \cdot \left(\frac{\chi_{f}^{-\circ/0^{\mathsf{F}}} \rho_{c}}{\mathbb{N} \cdot \mathbb{N}} \right)^{-1/N0}$$

$$= \mathbb{N} \cdot \left(\frac{\chi_{f}^{-\circ/0^{\mathsf{F}}} \rho_{c}}{\mathbb{N} \cdot \mathbb{N}} \right)^{-1/N0}$$

(۳۴) نقش ساز و کار افروزش سریع در ∫pd طبق رابطهٔ (۳۵) بهدست می آید.

$$\int^{R'_{hf}} \rho_c dr = \chi_f^{\circ/\Delta\Upsilon\Upsilon} \rho_c R_{hf} . \tag{(4.1)}$$

برای محاسبهٔ سهم لکهٔ داغ مربوط به ساز و کار شوکی روش، کاملاً متفاوت است زیرا در حین متراکم شدن سوخت لکهٔ داغ مرکزی همواره پدید میآید اما انرژی و سایر ویژگیهای آن به DT حکونگی متراکم کردن سوخت وابسته است. برای سوخت DT، متناظر با $1 > \beta$ و $\beta < 1$ متناظر با $1 > \beta$ و $0.0 > \gamma$ اشتعال چندانی از طریق افروزش مرکزی سوخت صورت نمی گیرد زیرا دمای لکهٔ داغ کمتر از آن است تا خود گرمایش از طریق تولید و جذب ذرات آلفا به نحو مؤثر انجام شود. بنابراین بستگی $\gamma + 0$ با مجموع انرژی جذب شده دو ساز و کار برای تشکیل لکهٔ داغ است.

,
$$E_{hfs} = \chi_s E_{hs} + \chi_f E_{hf} = \chi_s \eta_{is} E_{is} + \chi_f \eta_{if} E_{if}$$
 (۲۷)
و $T_{is} E_{is}$ به ترتیب انرژی محرک افروزش شوکی و سریع G_{fs} میرباشند. به کمک رابطهٔ (۲۶) و (۲۷) نتیجهٔ زیر برای

$$,G_{fs} = \frac{G_{fs}^{\max}}{1 + \frac{\chi_s E_{is}}{E_{cd}} + \frac{\chi_f E_{if}}{E_{cd}}} = \frac{G_{fs}^{\max}}{1 + \frac{\chi_s E_{hs}}{E_c} \frac{\eta_c}{\eta_{is}} + \frac{\chi_f E_{hf}}{E_c} \frac{\eta_c}{\eta_{if}}}$$
(YA)

$$G_{fs}^{\max}$$
 با توجه به رابطه (۲۵) برابر است ب
 G_{fs}^{\max} $G_{fs}^{\max} = \eta_c q_f M_f \theta_{fs} / E_c$ یا ضریب جفت شدگی
میانگین باریکهٔ لیزر با هدف نیز نظیر رابطهٔ (۱۹) نسبت مجموع
انرژی سوخت متراکم شده و انرژی لکههای داغ به انرژی کل
محرکهای لیزری طبق رابطهٔ (۲۹) است.
 $E_{a} + \gamma_c E_{ba} + \gamma_c E_{ba}$

$$\eta_{fs} = \frac{E_c + \chi_s E_{hs} + \chi_f E_{hf}}{E_L} , \qquad (14)$$

$$E_L = \frac{E_c}{\eta_c} + \chi_s \frac{E_{hs}}{\eta_{is}} + \chi_f \frac{E_{hf}}{\eta_{if}} \ , \qquad (\Upsilon \circ)$$

 η_{fs} با ترکیب کردن روابط (۲۹) و (۳۰) نتیجهٔ زیر برای η_{fs} بهدست میآید.

$$\eta_{fs} = \eta_c + \chi_s \frac{E_{hs}}{E_L} (1 - \frac{\eta_c}{\eta_{is}}) + \chi_f \frac{E_{hf}}{E_L} (1 - \frac{\eta_c}{\eta_{if}}) . \tag{(11)}$$

با توجه به رابطهٔ (۳۱)، تقریب $\eta_c \approx \eta_c$ برای $\eta_{fs} \approx \eta_c$ برای $E_L > (E_{if}, E_{is})$ برقرار است. برای $\kappa_s = \chi_s$ و $\kappa_s = \chi_s$ رابطه (۳۱) به ترتیب به بازدهی افروزش سریع و شوکی کاهش می یابد که نتیجه صحیحی است.

در ساز و کار افروزش ترکیبی لازم است محاسبهٔ بازدهی سوختن، *θ_{fs}*، با انتگرال گیری چگالی بر روی تمام اجزای سوخت از جمله لکهٔ داغ ناشی از الکترون های سریع حاصل از باریکهٔ پر توان کانونی شدهٔ لیزر طبق رابطهٔ (۳۳) و رابطهٔ (۳۳) صورت گیرد.

www.SID.ir

M _c (mg)	۰/۲۶۱	°/0737	1/310	7/094	4/191
β _o	٥/۶۰۵	°/999	۰/۷۳۱	•/X7F	۰/ <i>۸۶</i> ۴
γ_{o}	°/017	۰/۴۸۵	°/414	۰/۴۲V	۰/۳۶۸
ε _o	۰/۱۸۹	۰/۲۱۳	۰/۲۸	•/۲۸	۰/۳۵۴

جدول ۲. مقادیر محاسبه شده جهت برآورد بستگی پارامترهای مدل ناهم فشار به x_s .

$$P_{hso} \approx \frac{\Upsilon f_{\Delta}}{\alpha^{\circ/9}} \left(\frac{V_{imp}}{\Upsilon \times 10^{\circ}} \right)^{1/\Lambda\Delta}.$$
 (fo)

 $P_{co} = \frac{\rho_{co}}{P_{hso}} \quad \rho_{o} = \frac{\rho_{R_{hso}}}{\rho_{hso}} \quad \rho_{o} = \frac{\sigma_{hso}}{\rho_{hso}}$ با استفاده از مقادیر δ $E_L = \rho_{hso}$ ارائه شده در جدول ۱ برای انرژی کل محرک لیزری I_{c} و رابطه محینین $\frac{E_{is}}{E_L}$, m_{m} r_{c} σ_{c} کل محرک لیزری Λ و رابطه محینین $\frac{E_{is}}{E_L}$, P_{co} ρ_{av} و رابطه (۱۵) برای $\rho_{c} = \rho_{av}$ و $\rho_{c} = \rho_{av}$ $\rho_{c} = \rho_{av}$ (1۵) (10) الی ($\rho_{c} = \rho_{c}$ ρ_{c} ρ_{c}

با توجه به
$$\int_{R_{hs}}^{R_c} \rho_c dr = \rho_c (R'_c - R'_{hs})$$
 چگالی سطحی کل
سوخت طبق رابطهٔ (۴۱) بهدست می آید.
 $\int_{r_c}^{R_c} \rho dr = \rho_c (R'_c - R'_{hs}) + \circ/(\gamma \beta' + \chi_f^{*/\delta \gamma \beta r} \rho_c R_{hf})$ (۴۱)

° در رابطهٔ (۴۱) شعاع بیرونی سوخت متراکم شده به صورت زیر به *R*hs وابسته است.

$$R_{c}^{\prime \tau} \approx R_{hs}^{\prime \tau} + \frac{\tau}{\tau \pi} \frac{M_{f}}{\rho_{c}}$$
(*7)

محاسبات مرجع [۴] نشان می دهند که برای محاسبات مرجع [۴] نشان می دهند که برای $E_{if} = E_{if}^{opt} < 100 \text{ kJ}$ اف روزش سریع تنها برای $R_{hf} \approx 10 \ \mu \text{ m}$ میسر است. برای $E_{if}^{opt} > E_{if}^{opt}$ نیز محاسبات را برای $R_{hf} = 10 \ \mu \text{ m}$ متناظر با بیشترین بهره برای مقادیر کوچک انرژی کل محرکهای لیزری (کمتر از ۵۰۰ کیلوژول)، انجام دادیم. نقش عدم تقارن و کرویت لکهٔ داغ ترکیب شده از تقریب خطی از حالت آستانهٔ افروزش مرکزی $s = \chi_s$ تا افروزش شروکی $s = \chi_s$ به ترتیب متناظر با $\beta_o = \beta_o$ و افروزش شروکی $s = \chi_s$ به ترتیب متناظر با $\beta = \beta_o$ و $\beta = \beta$ به صورت $\chi_s = (\beta - \beta_o) + (\beta - \beta_o) + \beta' = \beta$ نشان داد. به طور مشابه برای دمای لکهٔ داغ (keV) $\gamma_b = \delta T_h g$ و نسبت فشار سوخت متراکم شده به فشار لکهٔ داغ نیز به ترتیب تقریب سوخت متراکم شده به فشار لکهٔ داغ نیز به ترتیب تقریب سوخت مراکم شده به فشار لکهٔ داغ نیز به ترتیب تقریب سوخت مراکم شده به فشار لکهٔ داغ نیز به ترتیب تقریب مرکزی با رابطهٔ (۳۶) داده می شود.

$$R'_{hs} = \operatorname{vrv}\varepsilon'\beta'\gamma'\alpha^{-\nu}\rho_c^{-\frac{\delta}{r}}.$$
 (re)

ضریب α و چگالی سوخت متراکم شده، ρ_c ، به مرحله قبل از افروزش مربـوط مـیشـود و مسـتقل از چگـونگی افـروزش سوخت است و به _۲_s بستگی ندارند.

تحلیل های مرجع [۲۰] بر پایهٔ مدل هـم فشـار و محاسـبات عددی برای تحریک مستقیم سوخت' در محدودهٔ گستردهای از انـرژی محـرک متـراکم کننـده لیـزر (kJ) (۲۵,۲۵۰) $\in E_{cd}$ ، ســـرعت متـــراکم شـــدن پوســـــتهٔ ســـوخت ســرعت متــراکم شــدن پوســــتهٔ ســوخت ای (۳۷) مان×(۵,۵) $= V_{imp}$ و (۲/۰, ۰) $= \alpha$ ، به روابط (۳۷) تا (۴۰) به ترتیب برای میانگین چگالی سـوخت، دما، چگـالی سطحی و فشار لکهٔ داغ منجر شده است.

$$, \rho_{av} = \frac{\mathrm{fr}}{\alpha^{1/1}} I_{10} \left(\frac{V_{imp}}{\mathrm{r} \times 10^{\circ}}\right) \left(\frac{\circ / \mathrm{r}}{\lambda_c}\right)^{\circ / \mathrm{r}}$$
(TV)

$$T_{hs\circ} \approx \frac{r}{\alpha^{\circ/\backslash \Delta}} \left(\frac{E_L - E_{is}}{\backslash \circ \circ} \right)^{\circ/\circ \vee} \left(\frac{V_{imp}}{r \times \backslash \circ^{\vee}} \right)^{\backslash/\uparrow \Delta}, \qquad (r \wedge)$$

$$\rho R_{hso} \approx \frac{\circ/\tau}{\alpha^{\circ/\Delta\Delta}} \left(\frac{E_L - E_{is}}{\upsilon} \right)^{\circ/\tau} \left(\frac{V_{imp}}{\tau \times \upsilon^{\circ}} \right)^{\circ/\varsigma\tau}, \qquad (\tau q)$$

1. Direct-drive

$$\int_{\circ}^{R_c} \rho dr = \rho_c (R'_c - R'_{hs} - C_f \chi_f^{\delta} R_{hf}) + \circ / \mathfrak{F} \beta' + \chi_f^{\delta} \rho_c R_{hf}.$$
(FT)

۴. نتایج حاصل از مدل تحلیلی

جهت ارزیابی مدل ارائه شده در بخـش ۲و۳، نتایج حاصـل از محاسبات عددی کد ہی۔درودینامیکی یک بع۔دی مرجع [۱۵] برای افروزش شوکی مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور پارامترهای ۵ نقطهٔ محاسباتی مرجع مـذکور مـورد توجـه قـرار گرفتند. جرم سوخت متراکم شده، M_c ، و انـرژی کـل محـرک ليزرى، Ε_L، به عنوان معلومات اوليه براى تنظيم ۳ پارامتر: β، γ و ٤ مدل نا هم فشار به نحوى مورد استفاده قرار گرفتنـد تـا بـا حفظ مقادیر α و نسبت انرژی افروزنده به انـرژی کـل محـرک لیزر Eis / EL، کمترین اختلاف با نتایج محاسبات عددی مرجع [۱۵] بهدست آید و نسبت $\frac{E_{hf}}{E_T}$ برای E_{if} و و همچنین $rac{E_{hs}}{E_T}$ مطابق بـــا شــکل ۳ در (g.cm^{-r}) حد ۱۹/۲ باقی بمانند. تنظیم مدل برای دستیابی به مقادیر مورد نظر برای ho R و بهرهٔ انرژی با استفاده از تغییرβ و نسبت فشـار سوخت متراكم شده به فشار لكهٔ داغ يا همان ٤ صورت گرفته است. در جدول ۱ نتایج بهدست آمده به همراه مقادیر ارائه شده در مرجع [10] آورده شده است. اختلاف میان محاسبات عددی و مدل تحلیلی حاصل از روابط (۱۸) و (۲۳) برای بهرهٔ انرژی در حد ۵ درصد است. شکل ۴ رفتار بهرهٔ انرژی را برحسب انرژی کل محرک لیزری، برای محاسبات مرجع [۱۵] و مدل نـا هم فشار نشان می دهد.

حاصل محاسبات بخش ۳ برای به رهٔ روش ترکیبی در شکل ۵ به صورت بهرهٔ انرژی بر حسب انرژی کل محرکهای لیزری ترسیم شده است. برای انجام محاسبات مذکور $\eta_{if} = 0/70$ متناظر با جفت شدگی الکترونهای سریع پدید آمده با طیف انرژی ۱/۵ تا ۵ مگا الکترون ولت ناشی از محرک سریع کوتاه لیزری در نظر گرفته شده است که مطابق با میانگین مقدار مورد انتظار برای η_{if} در مراجع [۹–۱۱] میباشد. در شکل ۵ محدوده محصور میان مرز روش افروزش سریع و



شکل ۵. بستگی بهرهٔ هدف به انرژی کل محرکهای لیزری. طول موج لیزر متراکم کنندهٔ سوخت ۲۴۸ میکرون و طول موج لیزر محرک سریع ۵۳% میکرون است. برای افروزش شوکی از محاسبات عـددی اشمیت استفاده شده است[۵۵]. بهبود مؤثر بهرهٔ انرژی برای روش افروزش سریع – شوکی در مقایسه با روش افروزش شوکی برای میشود. روش افروزش سریع – شوکی به سطح میان دو نمودار افروزش سریع(خط – مربع)، و افروزش شوکی(خط – دایره)، مربوط میشود. مکان هندسی بهره به ازای جرم ثابت سوخت برای روش افروزش سریع – شوکی با خطوط ممتد میان دو نمودار افروزش سریع و افروزش شوکی نشان داده شده است.

لکهٔ مربوط به محرک سریع و لکهٔ داغ مرکزی می تواند به صورت محرک سریع و لکهٔ داغ مرکزی می تواند به صورت صورت $R'_c - R'_{hs} - C_f \chi_f^{\ \delta} R_{hf}$ منظور شود. اندازهٔ ضرایب تصحیحی C_f وابسته به طول موج محرک سریع $|-|| C_f(\lambda_{if})|$ است. مقادیر دقیق T_f برای سازگاری با نمودارهای بهره مرجع [۷] به ازای $r = f\chi$ به دقت تنظیم شده است. برای $F_{if} = K_i$ شرط $r = K_i$ به دقت تنظیم شده δ در معادله (۲۳) لزوماً برابر با ۲۹۳۳ می استفاده کنیم، در این δ مر معادله (۲۳) لزوماً برابر با ۲۹۳۳ می استفاده کنیم، در این $\sigma_{c} - \chi_f Z_f = \chi_f (\chi_f^{-1/1})^2$ است که معادل است با $\sigma^{-1/1} \rho_c = \chi_f - \gamma^2$ ، در این صورت شعاع بهینهٔ لکهٔ داغ مطابق با رابطهٔ (۲) برابر است با

$$R'_{hf} = \circ / \Delta \Upsilon \Upsilon \Delta A \left(\chi_f^{-1/1} \rho_c \right)^{\circ/4V} = \chi_f^{1/\circ VV} R_{hf}$$

 $= \chi_f^{\delta} R_{hf} \approx \chi_f R_{hf} ,$
ىنابراين براى $E_{if} > E_{if}^{opt}$ مقدار δ عملاً برابر با ۱ است.

500

400

M,= 4.19 mg

Target Gain



شکل ۷. بستگی نسبت انرژی کل محرکهای لیزری به مقادیر متناظر برای افروزش شوکی بر حسب سهم محرک شوکی _۲۶ در روش افروزش سريع- شوكي به جرم سوخت. نمودارها نشان ميدهند كه با کاهش _x و افزایش جرم سوخت، انرژی کـل مـورد نیـاز بـرای روش ترکیبیی در مقایسیه با افروزش شوکی در محدوده می یابد. $\chi_{s} \in (\circ/\gamma, \circ/\gamma)$



شکل ۸ رفتار بهرهٔ انرژی برای روش افروزش سریع- شوکی به ازای مقادیر گوناگون جرم سوخت. به ترتیب از چپ به راست: بهرهٔ بهنجار شده ساز وکار ترکیبی به بهرهٔ افروزش شوکی بر حسب سهم محرک شوکی _۶٪ و بهره بر حسب انرژی کل افروزش. بهرهٔ افروزش شوکی از محاسبات مرجع [16] گرفته شده است.

روش افروزش شوکی به خوبی مشاهده مے شود. انرژی کا مورد نیاز و بهرهٔ انرژی بهنجار شده به مقادیر متناظر برای روش افروزش شوکی بر حسب نقش محرک شوکی χ_s و انرژی کل افروزنده ها برای روش ترکیبی در دو شکل ۷ و ۸ ترسیم شده است. نمودارها نشان میدهند که با کاهش ۲٫۶ و افزایش جـرم سوخت بهره انرژی از ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش می یابد. این رفتار با توجه به نمودارهای شکل ۳ ناشبی از افزایش سهم

افروزش شوكي، حوزهٔ افروزش تركيبي را نشان مي دهـد. مكـان هندسی متناظر با ۵ مقدار جرم سوخت مشابه با جـرم مـورد استفاده در محاسبات مرجع [۱۵] نیـز در شـکل ۵ آورده شـده است. بستگی بهره به انرژی کل محرکهای افروزنده و جرم $E_{if} > E_{if}^{opt}$ سوخت در شکل ۶ آمـده است. برای و $M_f > r mg$ و $M_f > r mg$ ، بهبود بهرهٔ هدف برای روش $M_f > r mg$ افروزش ترکیبی در حد ۱۵ درصد برای $\chi_{s} \sim 0.7$ در مقایسه با

Fast-Shock Ignition

 λ_{if} = 0.53 micron

 $\lambda_{\rm c}$ = 0.25 micron



شکل ۹. بستگی مزیت روش افروزش سریع– شوکی نسبت به روش افروزش شوکی بر حسب نقش محرک شوکی _کر به ازای مقادیر گوناگون جرم سوخت.



شکل ۱۰. رفتار نمایهٔ مزیت و سهم محرکهای سریع و شوکی به ازای دو هدف با جرم سوخت ۴/۱۹ و ۲/۰۹۴ میلیگرم برای روش افروزش سریع – شوکی. برای ۱ = *۲۲* به ترتیب برای دو جرم مذکور در حد ۲۰ و ۱۵ درصد مزیت کلی بهدست میآید. با افزایش ۲٫۶ تا ۱/۲ برای M_f = ۴/۱۹ mg نمایهٔ مزیت تا بیش از ۱/۳ افزایش مییابد.

افروزندهٔ سریع ۲_۲، و سوق روش ترکیبی به سوی ساز و کـار افروزش سریع است که دارای بهرهٔ انرژی بیشتری است. جهـت ارزیـابی بهتـر نمایـهٔ مزیـت'، *FM* را بـه صـورت

بهت الروید بی بهتر نامیت الریت با الله واب مسروت حاصل ضرب نسبت بهتره هندف در نسبت انترژی کتل بترای اجترای دو روش افتروزش ترکیبی و شتوکی تعریف و متورد استفاده قرار می دهیم، رابطهٔ (۴۴).

$$, FM = \frac{G_{fs}}{G_s} \times \frac{E_{s_total}}{E_{fs_total}} \times \frac{E_{is_pure}}{E_{ifs}}$$
(**)

1. Figure of merit

کوچک $_{S} \chi$ و بیشترین مزیت را برای $=_{S} \chi$ متناظر با روش افروزش سریع برای $F_{if} = E_{if}$ بر آورد می کند، شکل ۹. با افزایش جرم سوخت مزیت، روش ترکیبی فزونی می گیرد. برای دو هدف با جرم ۹/۱۹ و ۲۰۹۴ میلی گرم و $I = f \chi$ ، به ترتیب ۳۳ و ۱۰ درصد مزیت کلی به دست می آید. با کاستن از سهم محرک شوکی تا ۷/۰۰ $f \chi$ ، مزیت به ترتیب ۲۲ و ۶ درصد می باشد، شکل ۱۰. با ۱۰ و ۲۰ درصد افزایش سهم محرک می باشد، شکل ۱۰. با ۱۰ و ۲۰ درصد افزایش سهم محرک اشاره شده به ترتیب (۲۷, ۱۲) و (۳۵, ۳۱) درصد ارتقاء می یابد. برای و ۲ روش ترکیبی مزیت چندانی نسبت به



شکل ۱۱. رفتار نسبت انرژی افروزندهها برای افروزش سریع- شوکی به افروزش صرفاً شوکی، $\frac{E_{ifs}}{E_{is}^{pure}}$ ، بر حسب سهم انرژی محرک شوکی، _۲۶، به ازای مقادیر گوناگون جرم سوخت متراکم شده.

به نظر میرسد که ترتیب زمانی میان لحظهٔ اعمال تپهای افروزش شوکی و سریع به شرط آنکه تأخیر زمانی میان آغاز دو ساز و کار کوچکتر از $\frac{R_h}{\epsilon_s}$ یا زمان لازم برای انتشار امواج اکوستیکی از میان لکهٔ داغ باشد ، نقش اصلی در انجام فرآیند ترکیبی به عهده نداشته باشد. حساسیت روش افروزش ترکیبی به ناپایداریهای هیدرودینامیکی و بستگی آن به سهم هر ساز و کار نیازمند محاسبات عددی است، اما با توجه به اینکه فرآیند متراکم کردن سوخت در روش ترکیبی با سرعتی قابل مقایسه با

شده برای محرک افروزندهٔ شوکی در روش ترکیبی کمتر از افروزش شوکی است، پیش بینی میشود که احتمال بروز و رشد ناپایداریها نسبت به افروزش شوکی کمتر و از این منظر روش ترکیبی برتری نسبی داشته باشد.

۵. نتیجه گیری

روش های پیشرفتهٔ همجوشی لیزری نظیر افروزش سریع و به ویژه افروزش شوکی، گامهای بلندی در جهت تحقق همجوشی محصورسازی اینرسی به شمار میآیند. افروزش شوکی از دیدگاه فناوری لیزر، ساخت هدف و همچنین اجرا، ساده تر از افروزش سریع به نظر میرسد. اما کاستن از انرژی محرکهای لیزری و افزایش بهرهٔ انرژی همچنان از اهمیت قابل ملاحظهای برای ساخت محرکهای لیزری جهت احداث نیروگاههای همجوشی هستهای برخوردار است.

پژوهش حاضر برای نخستین بار نشان میدهد که روش افروزش ترکیبی متشکل از هر دو ساز و کار افروزش سریع و افروزش شوکی می تواند به نحو مؤثری در راستای کاستن از انرژی کل محرکهای افروزندهٔ لیزری برای دستیابی به بهرهٔ انرژی از مرتبهٔ ۱۰۰ و بیشتر مورد استفاده قـرار گیـرد. نحلیل کامل و دقیق ساز و کار ترکیبی نیازمند انجام محاسبات هیدرودینامیکی و ذرهای است. با این حال استفادهٔ مناسب از محاسبات عددی موجود برای افروزش سریع و مدل نا هم فشار برای افروزش شوکی به همراه محاسبات مربوط به انرژی آستانه همجوشی لکهٔ داغ محصور شده درون سوخت متراکم، امکان برآورد مزایای روش افروزش ترکیبی را از طریق یک مدل تحلیلی فراهم می آورد. نتایج مدل تحلیلی برای روش ترکیبی نشان میدهـد کـه تنهـا بـا استفاده از حدود ۷۰ درصد انرژی محرک لیزری برای صرفاً افروزش شوكي، مزيت قابل توجهي بـراي اشـتعال سـوخت متراکم شده بهدست می آید. تحت شرایط مناسب و برای M_f > r mg مجموع انرژی افروزنده های شوکی و سریع برای ساز و کار ترکیبی می تواند کمتر از ۸۰ درصد انرژی محرک افروزنده برای ساز و کار افروزش شوکی باشد. به نظر می رسد که مدل تحلیلی ارائه شده، ویژگی های عمومی ۳۵۸

۲/۵×۱۰^۷ سرعت انتشار صوت درون سوخت متراکم شده در حد $c_s.1$ سرعت انتشار صوت درون سوخت متراکم شده در حد $c_s.1$ سانتیمتر برثانیه است. با توجه به $R_h \sim R_h$ ، تأخیر زمانی از مرتبه \circ

روش افروزش ترکیبی به شمار میآیند.

روش ترکیبی افروزش سریع-شوکی را به خوبی نشان 🦳 انرژی مورد نظر به ازای جرم سوخت معلوم از مزایای بارز میدهد. کاسته شدن از انرژی کال محرکهای لیزری افروزنده سوخت و محرک سریع برای دستیابی به بهرهٔ

مراجع

- 13. S A Slutz and R A Vesey, Phys. Plasmas 12 (2005) 062702.
- 14. M D Rosen, J D Lindl, and A R Thiessen, LLNL Laser Program Annual Report, UCRL-50021-83, (1983) 3-5.
- 15. A J Schmitt, J W Bates, S P Obenschain, S T Zalesak, and D E Fyfe, Phys. Plasmas 17 (2010) 042701.
- 16. R Betti, C D Zhou, K S Anderson, L J Perkins, W Theobald, and A A Solodov, Phys. Rev. Lett. 95 (2007) 155001.
- 17. M Lafon, X Ribeyre, and G Schurtz, Phys. Plasmas 17 (2010) 052704.
- 18. J W Bates, A J Schmitt, D E Fyfe, S P Obenschain, and S T Zalesak, High Energy Density Physics 6 (2010) 128.
- 19. B Canaud and M Temporal, New J. Phys. 12 (2010) 043037.
- 20. C D Zhou and R Betti, Phys. Plasmas 14 (2007) 072703.

- 1. Max Tabak et al., Phys. Plasmas 1, 5 (1994) 1626.
- 2. S Atzeni, Phys. Plasmas 6, 8 (1999) 3316.
- 3. P A Norreys et al., Phys. Plasmas 9 (2000) 3721.
- 4. M Tabak, D Hinkel, S Atzeni, E M Campbell, and K Tanaka, Fusion Science and Technology 49 (2006) 254.
- 5. C D Zhou et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 025004.
- 6. T Johzaki, K Mima, and Y Nakao, Plasma and Fusion Research 2 (2007) 041.
- 7. S Atzeni and M Tabak, Plasma Phys. Controlled Fusion 47 (2005) B769.
- 8. M Tabak and D Callaham, Nucl. Instrum. Methods A 544 (2005) 48.
- 9. J J Honrubia and J Meyer-ter Vehn, Journal of Physics: Conference Series 112 (2008) 022055.
- 10. S Atzeni, C Bellei, and A Schiavi, 33rd EPS Conference on Plasma Phys., Rome, 19-23 June 30I (2006).
- 11. R Kodama et al., Nature 418 (2002) 933.
- 12. W Theobald et al., Phys. Plasmas 18 (2011) 056305.