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)

چکیده

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 آنچه که در هر 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 عددی برای آستانهٔ 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 انرژی کل لازم برای افروزش سوخت در مقایسه با انرژی افروزش شوکی کاسته می‌شود. در این حال بهرهٔ انرژی تا ۱۵ درصد افزایش می‌یابد 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 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- شوکی در مقایسه با روش افروزش شوکی می‌تواند بهتر از ۱/۳ باشد.

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

۱. مقدمه

افروزش سریع[۱] روشی مؤثر برای همجوشی محصور سازی اینرسی به شمار می‌آید [۱ - ۴]. در این روش بر خلاف مدل افروزش مرکزی[۲]، مرحلهٔ متراکم کردن سوخت تا مرحلهٔ ایستایی[۳] از افروزش سوخت فشرده شده جدا شده است و بدین ترتیب بهرهٔ انرژی از مرتبه G~۱۰۰ به‌دست می‌آید [۴-۸]. محاسبات نشان می‌دهند که انرژی افروزش[۴] در ساز و کار افروزش سریع به صورت $E_{if} \sim \rho_c^{-2}$ به چگالی سوخت متراکم شده $\rho_c\,(g.cm^{-3})$ وابسته است [۲ و ۷]. محاسبات عددی اتزنی[۵] نشان می‌دهند که برای افروزش سریع سوخت به کمک باریکهٔ الکترونی نسبیتی و به ازای برد $0/3 \le R \le 1/2\ (g.cm^{-2})$ برای الکترون‌های سریع، انرژی

۱. Fast ignition

۲. Central ignition

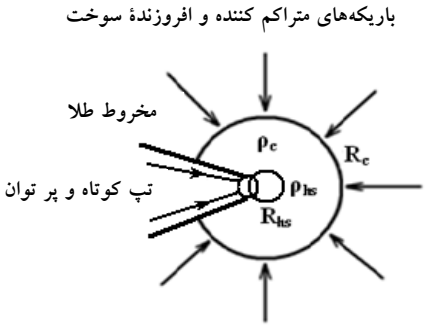
۳. Stagnation

۴. Ignition energy

۵. Atzeni

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. سازوکار افروزش سریع- شوکی. فرآیند همجوشی سوخت متراکم شده با چگالی ρ_c و شعاع R_c در دو مرحله و با تأخیر زمانی مناسب میان افروزش شوکی برای لکهٔ داغ مرکزی با شعاع R_{hs} و چگالی ρ_{hs} ، و افروزش سریع لکهٔ داغ کناری با شعاع R_{hf} که با 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 می‌شود [۷]. ارتباط انرژی محرک E_{if}، و انرژی لکهٔ داغ[۱] E_{hf}، برابر است با $E_{if} = E_{hf} / \eta_{if}$ که η_{if} ضریب جفت شدگی باریکهٔ محرک لیزر با سوخت است.

$$E_{if} = \max(E_1, E_2) \quad , \qquad (۱)$$

$$E_1 = \frac{560}{\left(\hat{\eta}_{if}\right)}\left(\hat{\rho}_c\right)^{-1/85} \times \max\left(1, \frac{r_b}{r_{opt}}\right) \text{(kJ)},$$

$$E_2 = 1120\left(\hat{\rho}_c\right)^{-0/9}\left[\frac{1/2}{R_0}\frac{f_R\hat{\lambda}_{if}}{\hat{\eta}_{if}}\right]^2 \text{(kJ)},$$

R_0 حد بالای برد الکترون‌ها در سوخت است. برد الکترون‌ها، R، به صورت $R \approx 0/6 f_R T_{fast}$ (g.cm^{-2}) به دمای الکترون، T_{fast} (MeV)، وابسته است. ضریب f_R در حد ۱ است. $\hat{\rho}_c = \frac{\rho_c(\text{g.cm}^{-3})}{100}$ ، $\hat{\eta}_{if} = \frac{\eta_{if}}{0/25}$ و $\hat{\lambda}_{if} = \frac{\lambda_{if}(\mu\text{m})}{1/06}$ به ترتیب چگالی، ضریب جفت شدگی و طول موج لیزر محرک سریع بهنجار شده می‌باشند. $\eta_{if} = 0/25$ با میانگین مقادیر تجربی و محاسبه شده برای الکترون‌های سریع با انرژی ۳~ MeV و چگالی ۲۰۰ g.cm^{-3} سازگاری دارد [۹-۱۱]. r_b شعاع لکهٔ باریکهٔ کانونی شده لیزر و r_{opt}، شعاع بهینهٔ لکهٔ کانونی شدهٔ درون سوخت است، رابطه (۲) [۷].

۱. Hot spot

$$r_{opt} = 60\hat{\rho}_c^{-0/97} \quad (\mu\text{m}) \quad , \qquad (۲)$$

E_1 که آن را با E_{if}^{opt} نشان می‌دهیم، انرژی آستانه برای آغاز افروزش سریع است و به کمترین مقدار بهرهٔ انرژی به ازای ρ_c معلوم منجر می‌شود. برای چگالی $\rho_c = 300$ g.cm^{-3}، $\eta_{if} = 0/25$ و پهنای زمانی تپ لیزر $\tau \sim 21$ ps، برای انرژی لکهٔ داغ داریم:

$$E_{hf}^{opt} = \eta_{if} E_{if}^{opt} = 18/3 \text{ kJ}.$$

ساخت محرک‌های لیزری پیکو ثانیه‌ای 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 از۲۰μm بر روی هدف نیز کار آسانی نیست. در روش افروزش شوکی[۳] نیز دو مرحله تراکم سوخت و افروزش سوخت از یکدیگر جدا شده‌اند و همچنین در این روش نیازی به باریکه‌های پر انرژی پتا واتی و پیکوثانیه‌ای لیزر نمی‌باشد [۱۵-۱۸]. با این حال به نظر می‌رسد که بتوان با به کارگیری مزایای هر دو روش افروزش سریع و افروزش شوکی به همراه تفکیک مرحلهٔ افروزش به دو مرحله، مزیت بیشتری نسبت به اجرای هر روش به تنهایی به‌دست آورد. روش ترکیبی را افروزش سریع-شوکی[۴] می‌نامیم.

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 می‌توان به روش اعمال تپ پر توان لیزر با پهنای در حد ۱۰۰ پیکوثانیه برای پس زنی سطح بحرانی پلاسمای سوخت متراکم شده [۱]

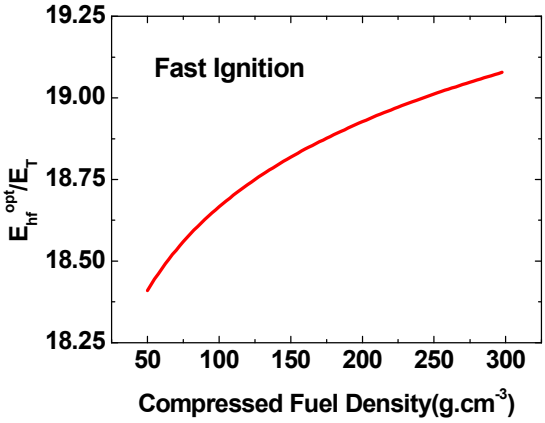
۲. Ignitor

۳. Shock ignition

۴. Fast-shock ignition

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲. 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 با سوخت متراکم شده با چگالی $\rho_c\,(\mathrm{g.cm^{-3}})$ محصور شده است به ۱ برسد $(G_{HS}=1)$، مطابق با رابطهٔ (۳) است [۱۳].

$$E_T = 7/5\left(\frac{\rho_c}{100}\right)^{-1/87}\ (\mathrm{kJ}), \qquad (3)$$

طبق تعریف، انرژی E_T برای تولید موج سوختن و آغاز افروزش سوخت متراکم شده کافی نمی‌باشد. با تقسیم کردن $E_{hf}^{opt}=\eta_{if}E_1=140\hat{\rho}_c^{-1/85}$ بر رابطهٔ (۳) در می‌یابیم که برای $\rho_c\in(50-300)\ \mathrm{g.cm^{-3}}$ 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 (۴). شکل ۲ رفتار $\frac{E_{hf}^{opt}}{E_T}$ را بر حسب ρ_c نشان می‌دهد.

$$\frac{E_{hf}^{opt}}{E_T}\approx 17/024\,\rho_c^{0/02}, \qquad (4)$$

در ساز و کار افروزش شوکی، انرژی لکهٔ داغ مرکزی E_{hs} طبق مدل نا هم فشار[۳] [۱۴، ۱۵] و رابطهٔ (۵) به چگالی سوخت متراکم شده و پارامترهای مدل وابسته است.

$$E_{hs} = 5/29\times10^{11}(\beta\gamma)^3\varepsilon^2\alpha^{-2}\rho_c^{-3/33}\quad(\mathrm{kJ}). \qquad (5)$$

در رابطهٔ (۵)، پارامتر آدیاباتیک α، برابر است با فشار سوخت متراکم شده به فشار فرمی و ε نسبت فشار سوخت متراکم شده به فشار لکهٔ داغ است. β طبق رابطهٔ (۶) به چگالی سطحی لکهٔ داغ مربوط می‌شود [۱۴].

$$\rho_{hs}R_{hs} = 0/4\beta\quad(\mathrm{g.cm^{-2}}), \qquad (6)$$

γ نسبت بهنجار شدهٔ دمای لکهٔ داغ به ۵ کیلو الکترون ولت است، رابطهٔ (۷).

$$T_{hs} = 5\gamma\quad(\mathrm{keV}). \qquad (7)$$

در ساز و کار افروزش شوکی، لکهٔ داغ مرکزی با سوخت سرد و چگال محصور شده است، لذا رابطهٔ (۳) برای انرژی آستانهٔ همجوشی در مدل شوکی نیز برقرار است. به کمک رابطهٔ (۵) و رابطهٔ (۳) بستگی $\frac{E_{hs}}{E_T}$ به ρ_c به دست می‌آید.

$$\frac{E_{hs}}{E_T} = 1/2835\times10^{7}(\beta\gamma)^3\varepsilon^2\alpha^{-2}\rho_c^{-1/463}. \qquad (8)$$

برای روش ترکیبی افروزش سریع- شوکی، فرض تشکیل لکهٔ داغ مؤثر با انرژی E_{hfs} منجر به نسبت $E_{hfs}^{opt}/E_T\approx 17/024\,\rho_c^{0/02}$ برای آغاز افروزش سوخت می‌شود. اگر χ_f و χ_s به ترتیب کسری از حداقل انرژی لازم برای آغاز افروزش سوخت که به تنهایی برای هر یک از دو روش افروزش سریع و افروزش شوکی به کار می‌رود باشد، در این صورت برای $E_{if}=E_{if}^{opt}=E_1$، $0\le(\chi_s,\chi_f)\le 1$ است و ارتباط χ_f و χ_s با حداقل چگالی سوخت سرد متراکم شده، ρ_c^{opt}، در مدل ترکیبی به کمک رابطهٔ (۹) به‌دست می‌آید.

$$\frac{E_{hfs}^{opt}}{E_T}=\left.\frac{\chi_f E_{hf}^{opt}+\chi_s E_{hs}}{E_T}\right|_{\rho=\rho_c^{\min}}\approx 17/024\left(\rho_c^{opt}\right)^{0/02}. \qquad (9)$$

در نوشتن رابطهٔ (۹) برای مدل ترکیبی فرض بر آن است که

۱. Slutz

۲. Break-even energy

۳. Non-isobaric model

Archive of SID

www.SID.ir

انرژی الکترون‌های سریع پدید آمده از تپ کوتاه لیزر در مرحلهٔ دوم افروزش، صرف گرمایش لکهٔ داغ کناری می‌شود و مطابق با شکل ۱ لکه داغ مرکزی ناشی از افروزش شوکی و لکهٔ کناری جمعاً لکهٔ داغ معادلی را پدید می‌آورند که انرژی آن E_{hfs} است. اگر کانال حفر شده به کمک باریکه لیزر در 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 $E_{if} \le E_{if}{}^{opt}$ به دست می‌آید.

$$\chi_f + ۷/۵۳۹\times۱۰^{۵}(\beta\gamma)^{۳}\varepsilon^{۲}\alpha^{-۲}(\rho_c{}^{opt})^{-۱/۴۸۳}\chi_s = ۱ . \quad (۱۰)$$

برای یافتن مقادیر مناسب χ_f و χ_s، ضروری است تا $\rho_c{}^{opt}$ معلوم باشد. برای یافتن $\rho_c{}^{opt}$، از شرط $\frac{\partial E_L}{\partial P_c}=۰$ در مدل نا هم فشار برای یافتن حداقل انرژی محرک لیزر نسبت به فشار سوخت متراکم شده P_c استفاده می‌کنیم. $E_L = \frac{E_{hs}}{\eta_{is}} + \frac{E_c}{\eta_c}$ 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_c و η_{is} به ترتیب بازدهی جفت شدگی باریکهٔ لیزر با سوخت متراکم شده و لکهٔ داغ است. $E_{cd} = \frac{E_c}{\eta_c}$ و $E_{ig} = \frac{E_{hs}}{\eta_h}$ نیز انرژی محرک‌های لیزری برای متراکم کردن و افروزش سوخت می‌باشند. طبق مدل نا هم فشار برای افروزش شوکی، انرژی لازم برای متراکم کردن جرم M_c تا چگالی ρ_c ، و ارتباط چگالی به فشار برای گاز فرمی تبهگن طبق رابطه (۱۱) می‌باشد[۱۷].

$$E_c = ۰/۳۲\alpha M_c \rho_c{}^{۰/۶۶} \ \text{(kJ)}, \quad (۱۱)$$

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 می‌شود [۱۴]، رابطهٔ لازم برای بستگی انرژی کل محرک‌های لیزری را با حذف ρ_c می‌توان طبق رابطهٔ (۱۴) به‌دست آورد.

$$\text{(g)}\ M_h = \frac{۴\pi}{۳}R_h{}^{۳}\rho_h = ۴/۲۸۹\beta^{۳}\gamma^{۲}\varepsilon^{۲}P_c{}^{-۲} , \quad (۱۲)$$

$$\text{(Gbar)}\ P_c = ۲/۲\times۱۰^{-۳}\alpha\rho_c{}^{\frac{۵}{۳}} , \quad (۱۳)$$

M_f یا جرم کل سوخت برابر است با: $M_f = M_c + M_h$.

$$E_L = \frac{۲۵۶۰(\beta\gamma)^{۳}\varepsilon^{۲}P_c{}^{-۲}}{\eta_{is}} + \frac{۳/۷\alpha^{۰/۶}P_c{}^{۰/۴}M_f - ۱۵/۸۶۹۳\alpha^{۰/۶}\beta^{۳}\gamma^{۲}\varepsilon^{۲}P_c{}^{-۱/۶}}{\eta_c} . \quad (۱۴)$$

با صفر قرار دادن مشتق پاره‌ای رابطهٔ (۱۴) نسبت به P_c، و صرف‌نظر کردن از جملهٔ سوم در سمت راست رابطهٔ (۱۴) که سبب خطایی در حد ۲ درصد برای E_L به ازای $\alpha \approx \gamma \approx ۲$ و $\eta_c \approx \eta_{is}$ می‌شود، رابطهٔ (۱۵) برای فشار بهینهٔ سوخت متراکم شده برای حداقل انرژی کل محرک لیزر به‌دست می‌آید.

$$\text{(Gbar)}\ P_c{}^{opt} = ۲۹/۸۲۵\alpha^{-۰/۲۵}(\beta\gamma)^{۱/۲۵}\varepsilon^{۰/۸۳۳۳}M_f{}^{-۰/۴۱۶۶} . \quad (۱۵)$$

با قرار دادن $P_c{}^{opt}$ در سمت چپ رابطهٔ (۱۳)، رابطهٔ (۱۶) برای چگالی سوخت متراکم شده $\rho_c{}^{opt}$ تحت شرط $\frac{\partial E_L}{\partial P_c}=۰$ به‌دست می‌آید.

$$\rho_c{}^{opt} = ۳۰۱/۵\alpha^{-۰/۷۵}(\beta\gamma)^{۰/۷۵}\varepsilon^{۰/۵}M_f{}^{-۰/۲۵} \ (\text{g.cm}^{-۳}) . \quad (۱۶)$$

برای $E_{if} > E_{if}{}^{opt}$ شرط آستانه برای افروزش ترکیبی با رابطهٔ (۱۷) داده می‌شود. در این حالت χ_f می‌تواند بزرگتر از یک باشد.

$$\left(\frac{E_{hf}{}^{opt}}{\eta_{if}E_{if}}\right)\chi_f + \left(\frac{\left(E_{ho} + (E_{hs} - E_{ho})\chi_s\right)}{E_{hs}}\right)\chi_s = ۱ , \quad (۱۷)$$

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

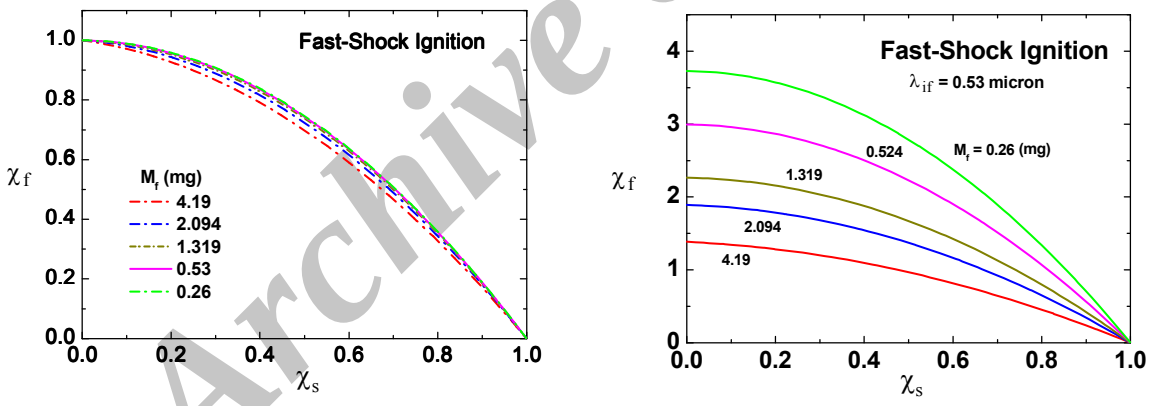
رفتار χ_f بر حسب χ_s مطابق با رابطهٔ (۱۰) و (۱۷) برای $\rho_c{}^{opt}$ به ازای ۵ مقدار متفاوت M_f، متناظر با مقادیر مدل نا هم فشار جدول ۱ در شکل ۳ نشان داده شده است. ضرایب مدل نا هم فشار را به نحوی تنظیم نموده‌ایم تا رفتار بهرهٔ انرژی

Archive of SID

www.SID.ir

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

M_c (mg)		۰/۲۶۱	۰/۵۲۳۸	۱/۳۱۵	۲/۰۹۴	۴/۱۹۱
E_L(kJ)		۲۳۰	۳۹۰	۷۲۷	۱۰۷۴	۱۷۰۰
α		۲	۲	۱/۹	۱/۸۵	۱/۸
β		۰/۹۶	۱/۱	۱/۱۴۳	۱/۳۹۱	۱/۷۷
γ		۱/۰۶	۱/۱۳	۱/۰۵	۱/۱۱۵	۰/۷۷
ε		۰/۳۲۶	۰/۲۰۴	۰/۱۶۴	۰/۰۹۵	۰/۰۸۸۵
η_c		۰/۰۷۶۵	۰/۰۷۷۹	۰/۰۸۲	۰/۰۷۵۹	۰/۰۷۵۰۵
η_{is}		۰/۰۷۲	۰/۰۶۵۵	۰/۰۶۰۵	۰/۰۵۸۹	۰/۰۶۹
$\rho_c^{\min}$ $(g.cm^{-۳})$		۸۲۸	۶۵۸	۴۹۰	۴۰۶	۲۹۲
$V_{imp}(\times ۱۰^{۷} cm/s)$		۲/۸	۲/۶	۲/۲	۲/۲	۱/۹
$\frac{E_{is}}{E_L}$	پژوهش حاضر	۰/۱۶۶	۰/۱۶۶	۰/۱۶۶	۰/۱۶۶	۰/۱۶۶
	مرجع[۱۵]	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۱۳	۰/۲
ρR $(g.cm^{-۲})$	پژوهش حاضر	۲/۵۸	۳	۳/۵	۳/۸۷	۴
	مرجع[۱۵]	۲/۴	۲/۹	۳/۴	۳/۴	۴
G_{opt}	پژوهش حاضر	۱۰۲	۱۳۶	۲۰۲	۲۳۲	۳۰۲
	مرجع[۱۵]	۱۰۱	۱۴۳	۲۱۰	۲۴۳	۳۰۹



شکل ۳. بستگی سهم هر یک از دو محرک افروزش سریع χ_f و افروزش شوکی χ_s در روش افروزش ترکیبی به جرم سوخت به ترتیب از چپ به راست: الف) $E_{if} \le E_۱$ ، ب) $E_{if} \le E_۲$. در این حالت $\lambda_{if} = ۰/۵۳\ \mu m$ است.

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

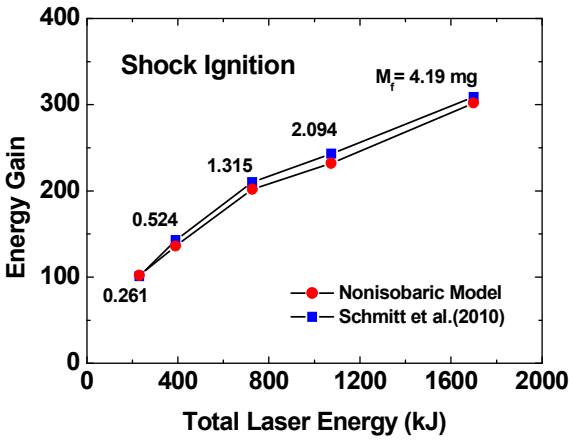
تعریف عمومی بهره هدف G_T، مستقل از چگونگی ساز و کار افروزش سوخت با رابطهٔ (۱۸) داده می‌شود.

$$G_T = \frac{E_F}{E_L} = G_T^{\max} / (۱ + E_{ig} / E_{cd}) \quad (۱۸)$$

در رابطهٔ (۱۸)، بهرهٔ بیشینهٔ هدف $G_T^{\max} = \frac{E_F}{E_{cd}}$ و $E_L = E_{cd} + E_{ig}$ انرژی کل محرک‌های لیزری است. $E_F = q_f M_f \theta(\rho R)$ انرژی سوخت و $\theta(\rho R)$ کسری از سوخت است که می‌سوزد. $q_f = ۳۳۵$ (MJ/ mg) مقدار انرژی

Archive of SID

www.SID.ir



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 ۰/۲۶۱ تا ۴/۱۹ میلی‌گرم.

آزاد شده بر واحد جرم به ازای سوختن مخلوط ۵۰:۵۰ سوخت D-T در طی واکنش همجوشی ${}_{1}^{2}D+{}_{1}^{3}T\rightarrow{}_{0}^{1}n+{}_{2}^{4}He+17/6\,\mathrm{MeV}$ می‌باشد. برای همجوشی دتریوم-تریتیوم $\theta(\rho R)\approx\frac{\rho R}{7+\rho R}$ است[۵].

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

$$\eta E_L = E_c + E_h \qquad (19)$$

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.

$$\eta = \eta_c \frac{E_{cd}}{E_L} + \eta_{ig}\frac{E_{ig}}{E_L} \qquad (20)$$

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

$$G_F = \frac{E_F}{E_c+E_h} = \frac{(E_F/E_c)}{1+\frac{E_h}{E_c}} = \frac{G_F^{\max}}{1+\frac{E_h}{E_c}}, \qquad (21)$$

$$G_T = \frac{E_F}{E_L} = \eta\frac{E_F}{E_c+E_h} = \eta G_F . \qquad (22)$$

با توجه به رابطهٔ (۲۰)، در صورتی که $E_L >> E_{ig}$ باشد، $E_L \approx E_{cd}$ و $\eta \approx \eta_c$ است، در این صورت: $G_T \approx \eta_c G_F$. با استفاده از تعریف $G_s^{\max}=\frac{E_F}{E_{cd}}$ برای حداکثر بهرهٔ هدف ساز و کار افروزش شوکی، رابطهٔ (۱۶) برای ρ_c^{opt}، و محاسبهٔ $\rho R = 0/4\beta + (R_c - R_{hs})\rho_c^{opt}$ به کمک روابط موجود برای مدل نا هم فشار [۱۲]، ابتدا $\theta(\rho R)$ و سپس رابطه (۲۳) برای حداکثر بهرهٔ هدف برای ساز و کار افروزش شوکی به‌دست می‌آید. R_c شعاع سوخت متراکم شده است.

$$G_s^{\max} = 3384/9(\beta\gamma)^{-0/25} M_c^{0/25}\alpha^{-0/75}\varepsilon^{-0/25} \qquad (23)$$

رابطهٔ (۲۴) از رابطهٔ ارائه شده در مرجع [۲] برای $G_f^{\max}$ حداکثر بهرهٔ هدف ساز و کار افروزش سریع به‌دست آمده است و حداکثر بهره را تحت شرط $E_{if} > E_{if}^{opt}$، برای ساز و کار افروزش سریع به صورت تابعی از طول موج لیزر افروزندهٔ سریع λ_{if} به صورت $E_{if}(\lambda_{if})$ نشان می‌دهد.

$$G_f^{\max} = A\eta_c^{\frac{7}{6}}\eta_{if}^{2/9\left(1-\frac{\beta_f}{2}\right)}\left(\frac{E_{cd}+E_{if}}{\alpha^3}\right)^{\frac{7}{18}} \times\left(E_{cd}+E_{if}\right)^{\beta_f/9\left(1-\frac{\beta_f}{2}\right)}, \qquad (24)$$

ضرایب A و β_f به ترتیب ۲۱۰۰۰ و ۱ برای بهترین تطبیق نتایج حاصل از رابطهٔ (۲۴) با محاسبات مرجع [۶] برای بهرهٔ ساز و کار افروزش سریع به ازای $\lambda_c = 0/25\ \mu\mathrm{m}$ انتخاب شدند. α و η_c مطابق با مقادیر جدول ۱ 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.

$$G_{fs}^{\max} = \eta_c E_F^{fs}/E_c . \qquad (25)$$

بهرهٔ انرژی برای مدل افروزش ترکیبی، G_{fs}، نیز طبق رابطهٔ (۲۶). نظیر، بهرهٔ انرژی برای افروزش سریع و افروزش شوکی تعریف می‌شود.

$$G_{fs} = G_{fs}^{\max}/(1+E_{ifs}/E_{cd}) , \qquad (26)$$

$G_{fs}^{\max}(E_{cd}, \lambda_{if}, \lambda_c)$ تابعی از طول موج باریکه‌های لیزر 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

Archive of SID

www.SID.ir

با مجموع انرژی جذب شده دو ساز و کار برای تشکیل لکهٔ داغ است.

$$E_{hfs} = \chi_s E_{hs} + \chi_f E_{hf} = \chi_s \eta_{is} E_{is} + \chi_f \eta_{if} E_{if} , \qquad (۲۷)$$

E_{is} و E_{if} به ترتیب انرژی محرک افروزش شوکی و سریع می‌باشند. به کمک رابطهٔ (۲۶) و (۲۷) نتیجهٔ زیر برای G_{fs} به‌دست می‌آید.

$$G_{fs} = \frac{G_{fs}^{\max}}{1+\frac{\chi_s E_{is}}{E_{cd}}+\frac{\chi_f E_{if}}{E_{cd}}} = \frac{G_{fs}^{\max}}{1+\frac{\chi_s E_{hs}}{E_c}\frac{\eta_c}{\eta_{is}}+\frac{\chi_f E_{hf}}{E_c}\frac{\eta_c}{\eta_{if}}} , \qquad (۲۸)$$

$G_{fs}^{\max}$ با توجه به رابطهٔ (۲۵) برابر است با $G_{fs}^{\max} = \eta_c q_f M_f \theta_{fs} / E_c$. η_{fs} 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.

$$\eta_{fs} = \frac{E_c + \chi_s E_{hs} + \chi_f E_{hf}}{E_L} , \qquad (۲۹)$$

انرژی کل محرک‌های لیزری نیز با توجه به ضرایب جفت شدگی طبق رابطهٔ (۳۰) قابل محاسبه است.

$$E_L = \frac{E_c}{\eta_c} + \chi_s \frac{E_{hs}}{\eta_{is}} + \chi_f \frac{E_{hf}}{\eta_{if}} , \qquad (۳۰)$$

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

$$\eta_{fs} = \eta_c + \chi_s \frac{E_{hs}}{E_L}\left(1-\frac{\eta_c}{\eta_{is}}\right) + \chi_f \frac{E_{hf}}{E_L}\left(1-\frac{\eta_c}{\eta_{if}}\right) . \qquad (۳۱)$$

با توجه به رابطهٔ (۳۱)، تقریب $\eta_{fs} \approx \eta_c$ برای $E_L > \left(E_{if}, E_{is}\right)$ برقرار است. برای $\chi_s = 0$ و $\chi_f = 0$ رابطهٔ (۳۱) به ترتیب به بازدهی افروزش سریع و شوکی کاهش می‌یابد 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 الکترون‌های سریع حاصل از باریکهٔ پر توان کانونی شدهٔ لیزر طبق رابطهٔ (۳۲) و رابطهٔ (۳۳) صورت گیرد.

$$\theta_{fs} = \frac{\int_0^{R_c} \rho dr}{7 + \int_0^{R_c} \rho dr} , \qquad (۳۲)$$

$$\int_0^{R_c} \rho dr = \int_{R'_{hs}}^{R_c} \rho_c dr + \int_0^{R'_{hs}} \rho'_{hs} dr + \int_0^{R'_{hf}} \rho_c dr , \qquad (۳۳)$$

کمیت‌های R'_{hf}، R'_{hs} و ρ'_{hs} به ترتیب متناظر با شعاع لکه‌های داغ ساز و کارهای سریع و شوکی و چگالی لکهٔ داغ به ازای انرژی $\chi_f E_{hf}$ و $\chi_s E_{hs}$ می باشد.

با توجه به رابطهٔ (۱) مشاهده می‌شود که برای $E_{if} = E_1$ داریم:

$$E'_{hf} = E_{hf}^{opt}\chi_f = 140\left(\frac{\chi_f^{\frac{1}{1.85}}\rho_c}{100}\right)^{-1.85} = 140\left(\frac{\chi_f^{-0.54}\rho_c}{100}\right)^{-1.85}$$ ، بنابراین

کاسته شدن از سهم انرژی محرک سریع هم ارز است با $\rho_c \to \rho'_c = \chi_f^{-0.54}\rho_c$. با استفاده از تبدیل اخیر و رابطهٔ (۲)، بستگی R'_{hf} به χ_f به صورت زیر می‌باشد.

$$R'_{hf} = 0.52258\left(\chi_f^{-0.54}\rho_c\right)^{-0.97} = 0.52258\chi_f^{0.5243}\rho_c^{-0.97} = \chi_f^{0.5243}R_{hf} , \qquad (۳۴)$$

نقش ساز و کار افروزش سریع در $\int \rho d$ طبق رابطهٔ (۳۵) به‌دست می‌آید.

$$\int_0^{R'_{hf}} \rho_c dr = \chi_f^{0.5243}\rho_c R_{hf} . \qquad (۳۵)$$

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 چگونگی متراکم کردن سوخت وابسته است. برای سوخت DT، $\rho_h R_h < 0.4$ $(\mathrm{g\,cm^{-2}})$ و $T_h < 2.5$ keV متناظر با $\beta < 1$ و $\gamma < 0.5$ اشتعال چندانی از طریق افروزش مرکزی سوخت صورت نمی‌گیرد 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 $\rho'_{hs}R'_{hs} = 0.4\beta'$ به χ_s را می‌توان با

Archive of SID

www.SID.ir

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

M_c (mg)	۰/۲۶۱	۰/۵۲۳۸	۱/۳۱۵	۲/۰۹۴	۴/۱۹۱
β_o	۰/۶۰۵	۰/۶۶۶	۰/۷۳۱	۰/۸۲۴	۰/۸۶۴
γ_o	۰/۵۱۲	۰/۴۸۵	۰/۴۱۴	۰/۴۲۷	۰/۳۶۸
ε_o	۰/۱۸۹	۰/۲۱۳	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۳۵۴

تقریب خطی از حالت آستانهٔ افروزش مرکزی $\chi_s = ۰$ تا افروزش شوکی $\chi_s = ۱$ به ترتیب متناظر با $\beta' = \beta_o$ و $\beta' = \beta$ به صورت $\beta' = \beta_o + (\beta - \beta_o)\chi_s$ نشان داد. به طور مشابه برای دمای لکهٔ داغ $T_{hs} = ۵\gamma'$ (keV) و نسبت فشار سوخت متراکم شده به فشار لکهٔ داغ نیز به ترتیب تقریب $\gamma' = \gamma_o + (\gamma - \gamma_o)\chi_s$ و $\varepsilon' = \varepsilon_o + (\varepsilon - \varepsilon_o)\chi_s$ را مورد استفاده قرار می‌دهیم. در این صورت بستگی شعاع لکهٔ داغ مرکزی با رابطهٔ (۳۶) داده می‌شود.

$$R'_{hs} = ۷۲۷\varepsilon'\beta'\gamma'\alpha^{-۱}\rho_c^{-\frac{۵}{۳}} . \qquad (۳۶)$$

ضریب α و چگالی سوخت متراکم شده، ρ_c، به مرحله قبل از افروزش مربوط می‌شود و مستقل از چگونگی افروزش سوخت است و به χ_s بستگی ندارند.

تحلیل‌های مرجع [۲۰] بر پایهٔ مدل هم فشار و محاسبات عددی برای تحریک مستقیم سوخت[۱] در محدودهٔ گسترده‌ای از انرژی محرک متراکم کننده لیزر $E_{cd} \in (۲۵,۲۵۰۰)$ (kJ)، سرعت متراکم شدن پوستهٔ سوخت $V_{imp} \in (۱/۵, ۵)\times ۱۰^{۷}$ (cm/s) و $\alpha \in (۰/۷, ۴)$، به روابط (۳۷) تا (۴۰) به ترتیب برای میانگین چگالی سوخت، دما، چگالی سطحی و فشار لکهٔ داغ منجر شده است.

$$, \rho_{av} = \frac{۴۲۵}{\alpha^{۱/۱۲}} I_{۱۵}^{۰/۱۳} \left(\frac{V_{imp}}{۳\times ۱۰^{۷}}\right)\left(\frac{۰/۳۵}{\lambda_c}\right)^{۰/۱۳} \qquad (۳۷)$$

$$T_{hs۰} \approx \frac{۳}{\alpha^{۰/۱۵}}\left(\frac{E_L - E_{is}}{۱۰۰}\right)^{۰/۰۷}\left(\frac{V_{imp}}{۳\times ۱۰^{۷}}\right)^{۱/۲۵} , \qquad (۳۸)$$

$$\rho R_{hs۰} \approx \frac{۰/۳۱}{\alpha^{۰/۵۵}}\left(\frac{E_L - E_{is}}{۱۰۰}\right)^{۰/۲۷}\left(\frac{V_{imp}}{۳\times ۱۰^{۷}}\right)^{۰/۶۲} , \qquad (۳۹)$$

$$P_{hs۰} \approx \frac{۳۴۵}{\alpha^{۰/۹}}\left(\frac{V_{imp}}{۳\times ۱۰^{۷}}\right)^{۱/۸۵} . \qquad (۴۰)$$

$\gamma_o = \frac{T_{hs۰}}{۵}$، $\beta_o = \frac{\rho R_{hs۰}}{۰/۴}$ و $\varepsilon_o = \frac{P_{c۰}}{P_{hs۰}}$، با استفاده از مقادیر ارائه شده در جدول ۱ برای انرژی کل محرک لیزری E_L و همچنین $\frac{E_{is}}{E_L}$، V_{imp} و α در روابط (۳۷) الی (۴۰)، و رابطه (۱۵) برای $P_{c۰}$ به ازای $\rho_c = \rho_{av}$ و $\lambda_c = ۰/۲۴۸\ \mu m$ به دست می‌آیند، جدول۲. با توجه به رابطهٔ $I_{۱۵} \approx ۱۰^{-۱۵}\left(\frac{E_c}{\eta_c}\right)\frac{۱}{۴\pi R_c^{۲}}\frac{۱}{\tau_c}$، شدت بهنجار شده به $۱۰^{۱۵}\ \mathrm{W.cm^{-۲}}$ بر روی سطح سوخت اندکی قبل از مرحلهٔ افروزش و به ازای پهنای زمانی تپ متراکم کننده $\tau_c \approx ۱\ ns$ در حد $I_{۱۵} \sim ۱$ است.

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 می‌آید.

$$, \int_{۰}^{R_c} \rho dr = \rho_c(R'_c - R'_{hs}) + ۰/۴\beta' + \chi_f^{۰/۵۲۴۳}\rho_c R_{hf} \qquad (۴۱)$$

در رابطهٔ (۴۱) شعاع بیرونی سوخت متراکم شده به صورت زیر به R'_{hs} وابسته است.

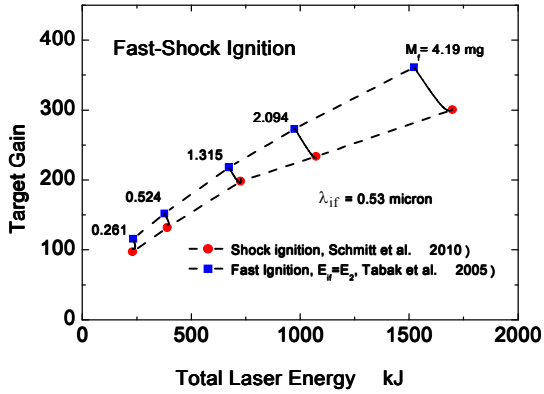
$$. R_c'^{۳} \approx R_{hs}'^{۳} + \frac{۳}{۴\pi}\frac{M_f}{\rho_c} \qquad (۴۲)$$

محاسبات مرجع [۴] نشان می‌دهند که برای $E_{if} = E_{if}^{opt} < ۱۰۰$ kJ افروزش سریع تنها برای $R_{hf} \approx ۱۰\ \mu\mathrm{m}$ میسر است. برای $E_{if} > E_{if}^{opt}$ نیز محاسبات را برای $R_{hf} = ۱۰\ \mu\mathrm{m}$، 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

۱. Direct-drive

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۵. بستگی بهرهٔ هدف به انرژی کل محرک‌های لیزری. طول موج لیزر متراکم کنندهٔ سوخت ۰/۲۴۸ میکرون و طول موج لیزر محرک سریع ۰/۵۳ میکرون است. برای افروزش شوکی از محاسبات عددی اشمیت استفاده شده است[۱۵]. بهبود مؤثر بهرهٔ انرژی برای روش افروزش سریع- شوکی در مقایسه با روش افروزش شوکی برای $E_{if} \le E_۲$ با افزایش انرژی محرک و جرم سوخت به خوبی مشاهده 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 می‌تواند به صورت $R'_c - R'_{hs} - C_f \chi_f{}^{\delta} R_{hf}$ در رابطهٔ (۴۱) منظور شود. اندازهٔ ضرایب تصحیحی C_f وابسته به طول موج محرک سریع $|C_f(\lambda_{if})| \sim ۱$ است. مقادیر دقیق C_f برای سازگاری با نمودارهای بهره مرجع [۷] به ازای $\chi_f = ۱$ به دقت تنظیم شده است. برای $E_{if} > E_{if}{}^{opt}$ شرط $E_{if} = E_۲$ برقرار است و مقدار δ در معادله (۴۳) لزوماً برابر با ۰/۵۲۴۳ نیست. اگر قرار دهیم $E'_{if} = \chi_f E_۲$ و از عبارت مربوط به $E_۲$ استفاده کنیم، در این صورت $E'_{if} \propto \chi_f \rho_c{}^{-۰/۹} = \left(\chi_f{}^{-۱/۱۱} \rho_c\right)^{-۰/۹}$ است که معادل است با $\rho_c \to \rho'_c = \chi_f{}^{-۱/۱۱} \rho_c$، در این صورت شعاع بهینهٔ لکهٔ داغ مطابق با رابطهٔ (۲) برابر است با

$$R'_{hf} = ۰/۵۲۲۵۸ \left(\chi_f{}^{-۱/۱۱} \rho_c\right)^{۰/۹۷} = \chi_f{}^{۱/۰۷۷} R_{hf}$$
$$= \chi_f{}^{\delta} R_{hf} \approx \chi_f R_{hf} \ ,$$

بنابراین برای $E_{if} > E_{if}{}^{opt}$ مقدار δ عملاً برابر با ۱ است.

$$\int_{۰}^{R_c} \rho dr = \rho_c (R'_c - R'_{hs} - C_f \chi_f{}^{\delta} R_{hf}) + ۰/۴\beta' + \chi_f{}^{\delta} \rho_c R_{hf} \, . \qquad (۴۳)$$

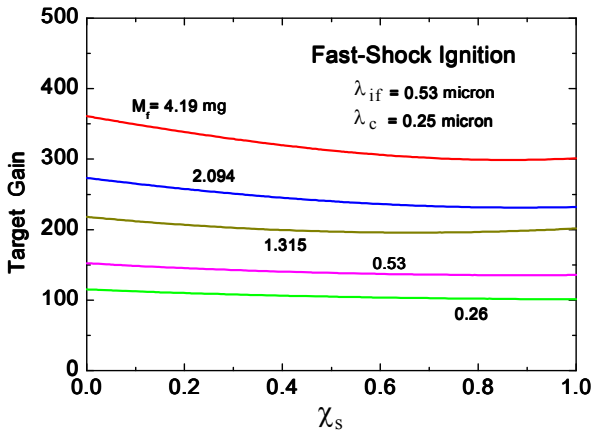
۴. نتایج حاصل از مدل تحلیلی

جهت ارزیابی مدل ارائه شده در بخش۲و۳، نتایج حاصل از محاسبات عددی کد هیدرودینامیکی یک بعدی مرجع [۱۵] برای افروزش شوکی مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور پارامترهای ۵ نقطهٔ محاسباتی مرجع مذکور مورد توجه قرار گرفتند. جرم سوخت متراکم شده، M_c، و انرژی کل محرک لیزری، E_L، به عنوان معلومات اولیه برای تنظیم ۳ پارامتر: β، γ و ε مدل نا هم فشار به نحوی مورد استفاده قرار گرفتند تا با حفظ مقادیر α و نسبت انرژی افروزنده به انرژی کل محرک لیزر E_{is} / E_L، کمترین اختلاف با نتایج محاسبات عددی مرجع [۱۵] به‌دست آید و نسبت $\frac{E_{hf}}{E_T}$ برای $E_{if} = E_{if}{}^{opt}$ و $\rho_c \ge ۳۰۰$ $(\mathrm{g.cm^{-۳}})$، و همچنین $\frac{E_{hs}}{E_T}$ مطابق با شکل ۳ در حد ۱۹/۲ باقی بمانند. تنظیم مدل برای دستیابی به مقادیر مورد نظر برای ρR و بهرهٔ انرژی با استفاده از تغییرβ و نسبت فشار سوخت متراکم شده به فشار لکهٔ داغ یا همان ε صورت گرفته است. در جدول ۱ نتایج به‌دست آمده به همراه مقادیر ارائه شده در مرجع [۱۵] 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 نا هم فشار نشان می‌دهد.

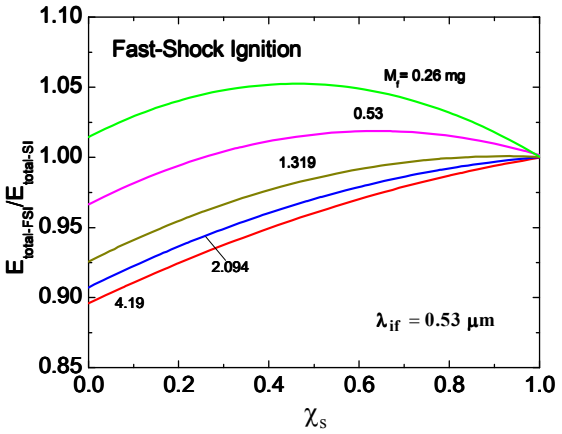
حاصل محاسبات بخش ۳ برای بهرهٔ روش ترکیبی در شکل ۵ به صورت بهرهٔ انرژی بر حسب انرژی کل محرک‌های لیزری ترسیم شده است. برای انجام محاسبات مذکور $\eta_{if} = ۰/۲۵$ متناظر با جفت شدگی الکترون‌های سریع پدید آمده با طیف انرژی ۱/۵ تا ۵ مگا الکترون ولت ناشی از محرک سریع کوتاه لیزری در نظر گرفته شده است که مطابق با میانگین مقدار مورد انتظار برای η_{if} در مراجع [۹-۱۱] می‌باشد. در شکل ۵ محدوده محصور میان مرز روش افروزش سریع و

Archive of SID

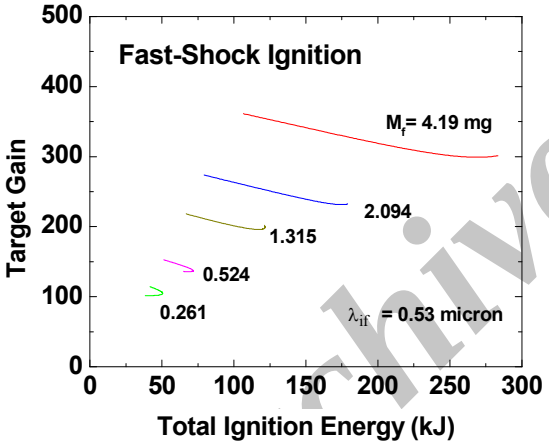
www.SID.ir

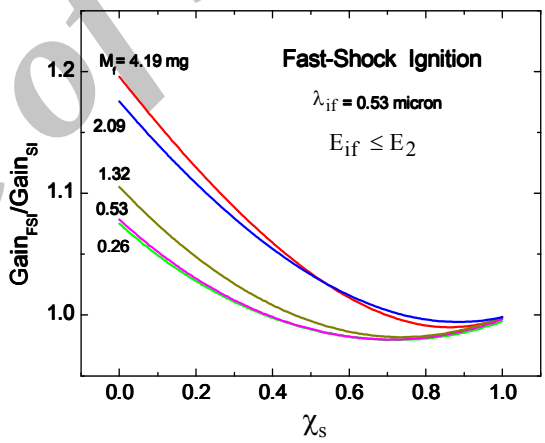


شکل ۶. رفتار بهرهٔ هدف به سهم ساز وکار افروزش شوکی χ_s، برای افروزش سریع- شوکی و $E_{if} > E_{if}^{opt}$ به ازای مقادیر گوناگون جرم سوخت. در تمام حالات، طول موج محرک سریع، $\lambda_{if} = ۰/۵۳\ \mu m$ است و طول موج محرک متراکم کننده، $\lambda_c = ۰/۲۵\ \mu m$ است.



شکل ۷. بستگی نسبت انرژی کل محرک‌های لیزری به مقادیر متناظر برای افروزش شوکی بر حسب سهم محرک شوکی χ_s در روش افروزش سریع- شوکی به جرم سوخت. نمودارها نشان می‌دهند که با کاهش χ_s و افزایش جرم سوخت، انرژی کل مورد نیاز برای روش ترکیبی در مقایسه با افروزش شوکی در محدوده $\chi_s \in (۰/۲ ، ۰/۷)$ حدود ۵ درصد کاهش می‌یابد.



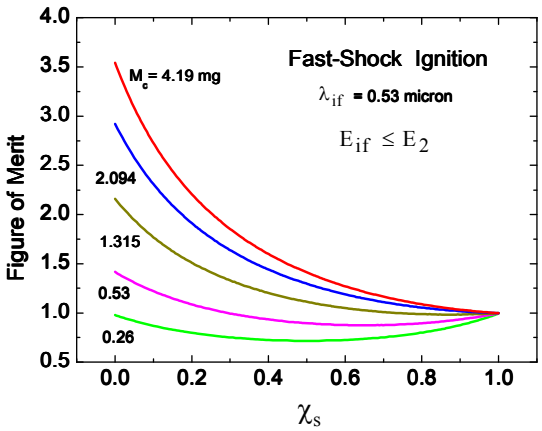


شکل ۸. رفتار بهرهٔ انرژی برای روش افروزش سریع- شوکی به ازای مقادیر گوناگون جرم سوخت. به ترتیب از چپ به راست: بهرهٔ بهنجار شده ساز وکار ترکیبی به بهرهٔ افروزش شوکی بر حسب سهم محرک شوکی χ_s، و بهره بر حسب انرژی کل افروزش. بهرهٔ افروزش شوکی از محاسبات مرجع [۱۵] گرفته شده است.

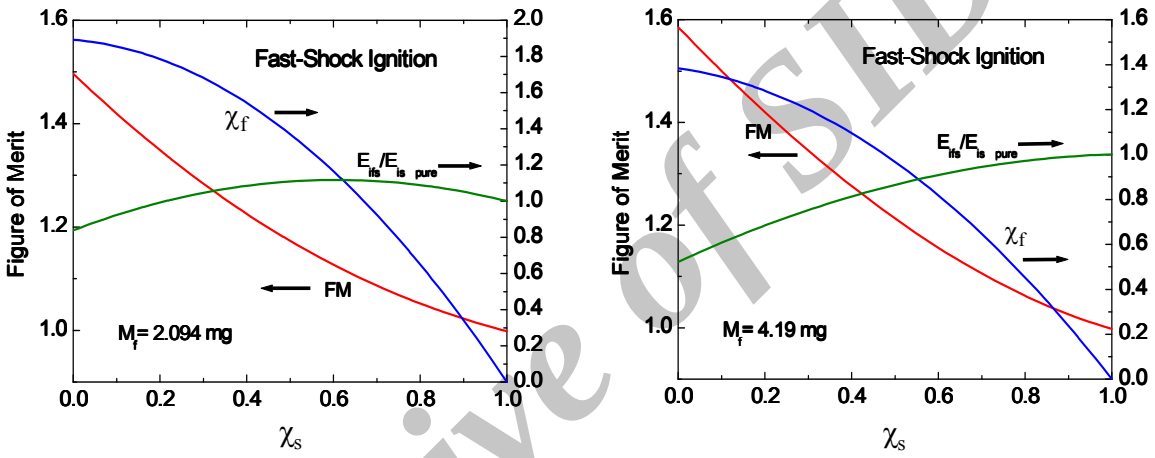
افروزش شوکی، حوزهٔ افروزش ترکیبی را نشان می‌دهد. مکان هندسی متناظر با ۵ مقدار جرم سوخت مشابه با جرم مورد استفاده در محاسبات مرجع [۱۵] نیز در شکل ۵ آورده شده است. بستگی بهره به انرژی کل محرک‌های افروزنده و جرم سوخت در شکل ۶ آمده است. برای $E_{if} > E_{if}^{opt}$، $M_f > ۲\ mg$ و $\lambda_{if} = ۰/۵۳\ \mu m$، بهبود بهرهٔ هدف برای روش افروزش ترکیبی در حد ۱۵ درصد برای $\chi_s \sim ۰/۳$ در مقایسه با روش افروزش شوکی به خوبی مشاهده می‌شود. انرژی کل مورد نیاز و بهرهٔ انرژی بهنجار شده به مقادیر متناظر برای روش افروزش شوکی بر حسب نقش محرک شوکی χ_s و انرژی کل افروزنده‌ها برای روش ترکیبی در دو شکل ۷ و ۸ ترسیم شده است. نمودارها نشان می‌دهند که با کاهش χ_s و افزایش جرم سوخت بهره انرژی از ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. این رفتار با توجه به نمودارهای شکل ۳ ناشی از افزایش سهم

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۹. بستگی مزیت روش افروزش سریع- شوکی نسبت به روش افروزش شوکی بر حسب نقش محرک شوکی χ_s به ازای مقادیر گوناگون جرم سوخت.



شکل۱۰. 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 χ_f =۱ به ترتیب برای دو جرم مذکور در حد ۲۰ و ۱۵ درصد مزیت کلی به‌دست می‌آید. با افزایش χ_f تا ۱/۲ برای M_f =۴/۱۹ mg نمایهٔ مزیت تا بیش از ۱/۳ افزایش می‌یابد.

افروزندهٔ سریع χ_f، و سوق روش ترکیبی به سوی ساز و کار افروزش سریع است که دارای بهرهٔ انرژی بیشتری است.

جهت ارزیابی بهتر نمایهٔ مزیت[۱]، FM را به صورت حاصل‌ضرب نسبت بهره هدف در نسبت انرژی کل برای اجرای دو روش افروزش ترکیبی و شوکی تعریف و مورد استفاده قرار می‌دهیم، رابطهٔ (۴۴).

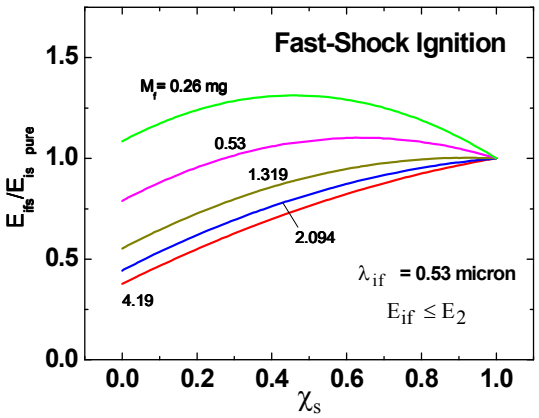
$$, FM = \frac{G_{fs}}{G_s} \times \frac{E_{s_total}}{E_{fs_total}} \times \frac{E_{is_pure}}{E_{ifs}} \qquad (۴۴)$$

نمایهٔ مزیت، برتری روش افروزش ترکیبی را برای مقادیر کوچک χ_s و بیشترین مزیت را برای χ_s = ۰ متناظر با روش افروزش سریع برای $E_{if} = E_۲$ برآورد می‌کند، شکل ۹. با افزایش جرم سوخت مزیت، روش ترکیبی فزونی می‌گیرد. برای دو هدف با جرم ۴/۱۹ و ۲/۰۹۴ میلی گرم و χ_f =۱، به ترتیب ۲۳ و ۱۰ درصد مزیت کلی به‌دست می‌آید. با کاستن از سهم محرک شوکی تا χ_f =۰/۷، مزیت به ترتیب ۱۲ و ۶ درصد می‌باشد، شکل ۱۰. با ۱۰ و ۲۰ درصد افزایش سهم محرک سریع، χ_f =۱/۱ و χ_f =۱/۲، نمایهٔ مزیت برای دو جرم اشاره شده به ترتیب (۲۷, ۱۲) و (۳۵, ۱۳) درصد ارتقاء می‌یابد. برای M_f < ۲ mg روش ترکیبی مزیت چندانی نسبت به

۱. Figure of merit

Archive of SID

www.SID.ir



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، χ_s، به ازای مقادیر گوناگون جرم سوخت متراکم شده.

افروزش شوکی از خود نشان نمی‌دهد. برای $\chi_s \in (۰/۴,۰/۷)$ که محدوده مناسب برای اجرای روش ترکیبی به شمار می‌آید، روش افروزش سریع- شوکی مزیت کلی ۲۰ تا ۳۰ درصدی برای $M_f > ۲$ mg نسبت به افروزش شوکی از خود نشان می‌دهد. نسبت انرژی افروزنده کل برای روش ترکیبی به انرژی افروزنده صرفاً شوکی، E_{is}^{pure}، در شکل ۱۱ نشان داده شده است که مزیت روش ترکیبی را در محدودهٔ جرم $M_f > ۲$ mg و $\chi_s \in (۰/۴,۰/۷)$ تایید می‌کند.

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 $\frac{R_h}{۴c_s}$ ~ یا زمان لازم برای انتشار امواج اکوستیکی از میان لکهٔ داغ باشد[1]، 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 روش افروزش شوکی صورت می‌گیرد و مقدار انرژی صرف 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. نتیجه‌گیری

روش‌های 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، ساده‌تر 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 می‌تواند به نحو مؤثری در راستای کاستن از انرژی کل محرک‌های افروزندهٔ لیزری برای دستیابی به بهرهٔ انرژی از مرتبهٔ ۱۰۰ و بیشتر مورد استفاده قرار گیرد. تحلیل 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 می‌آورد. نتایج مدل تحلیلی برای روش ترکیبی نشان می‌دهد که تنها با استفاده از حدود ۷۰ درصد انرژی محرک لیزری برای صرفاً افروزش شوکی، مزیت قابل توجهی برای اشتعال سوخت متراکم شده به‌دست می‌آید. تحت شرایط مناسب و برای $M_f > ۲$ mg مجموع انرژی افروزنده‌های شوکی و سریع برای ساز و کار ترکیبی می‌تواند کمتر از ۸۰ درصد انرژی محرک افروزنده برای ساز و کار افروزش شوکی باشد. به نظر می‌رسد که مدل تحلیلی ارائه شده، ویژگی‌های عمومی

---

۱. c_s سرعت انتشار صوت درون سوخت متراکم شده در حد $۲/۵\times۱۰^{۷}$ سانتیمتر برثانیه است. با توجه به $cm \sim R_h$ $۱۰^{-۳}$، تأخیر زمانی از مرتبه ۵۰ پیکوثانیه برآورد می شود.

Archive of SID

www.SID.ir

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

مراجع

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.
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.

Archive of SID

www.SID.ir