

بهره انرژی هدف های پوسته ای نازک در همجوشی محصور شده لختی

سهیل خوشبین فر ، عباس قاسمی زاد *

گروه فیزیک ، دانشکده علوم ، دانشگاه گیلان

چکیده

هزینه انجام آزمایشات همجوشی محصور شده لختی، به طور مستقیم با انرژی صرف شده برای احتراق ساچمه سوخت وابسته است. در این مقاله، با استفاده از یک مدل ساده هیدروپنایمیکی، بهره انرژی برای شرایط اولیه مشخص بدست آمده است. نتایج حاصل مبتنی بر یک ساختار جعبه ای برای فشار و چگالی ناحیه درونی و ساختاری خود - مانا برای ناحیه سرد بیرونی است. سپس، بهره انرژی با تعریف و بازچینش معادلات بر حسب پارامترهای α , U_{im} , H_{HS} , T_{HS} و χ_{HS} بدست آمده است.

کلید واژه: همجوشی محصور شده لختی، بهره انرژی، هدف پوسته ای نازک، ساختار خود - مانا.

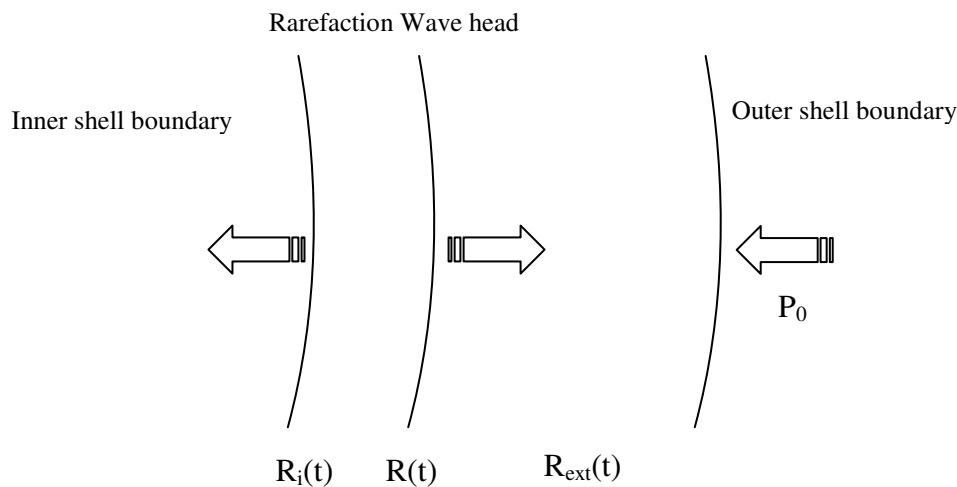
۱- انفجار درونی هدف پوسته ای کروی

پیکربندی اصلی ساچمه سوخت به وسیله دو تپ فشاری پله ای که خود نماینده دسته پیچیده ای از تپ ها است تشکیل می شود، به این ترتیب که موج نخست از داخل پوسته، گذر کرده و هنگامی که به مرز فصل مشترک پوسته - خلاء رسید، یک موج بازتابی رقیق انعکاس می یابد. این موج، هنگامی که ضربه موج دوم در این ناحیه به راه می افتد، موجب ایجاد یک شیب چگالی مثبت خواهد شد. موج اخیر در سوخت، باعث ایجاد یک توزیع آنتروپی می گردد که به صورت شعاعی کاهش می یابد [۱]. از آن پس فرض می شود که فرآیند انفجار درونی به صورت همسانگرد ادامه می یابد و توزیع آنتروپی تا هنگام احتراق، ثابت نگه داشته خواهد شد [۲].

اینگونه فرض می شود که پیش - تپ اولیه در زمان $t=0$ آغاز می شود و در یک بازه زمانی نسبتاً کوتاه به مقدار فشار P_{pre} می رسد و تا زمان رها سازی تپ اصلی با فشار P_0 در این مقدار ثابت باقی می ماند، در مقابل، تپ اصلی در بازه ای حدود $1ns$ به مقدار اصلی می رسد و تا پایان انفجار درونی در این مقدار باقی می ماند. فشار پیش - تپ و تپ اصلی به ترتیب، در بازه ۱-۵ مگا بار و ۱۰-۱۰۰ مگا بار تغییر می کند. حالت اولیه ساچمه، زمانی در نظر گرفته می شود که قطع کننده به طور کامل تبخیر شده و این مطلب تقریب مناسبی برای انفجار درونی است [۳].

اکنون تصویر ساده ای از شکل گیری پیکربندی هدف در طول زمان هدایت تپ خارجی ارائه می کنیم. هنگامی که ضربه موج به مرز پوسته - خلاء می رسد، فشار در سراسر درون پوسته P_{pre} است و موج بازتابی

رقیقی ایجاد شده و مرز به سمت مرکز هدف حرکت می‌کند. اگر سر جبهه این موج بازتابی در هر لحظه t را با $R(t)$ مشخص کنیم و ناحیه درونی $R_i(t) \leq r \leq R(t)$ را تحت تاثیر قرار می‌دهد که در آن شعاع $R_i(t)$ لحظه ای مرز داخلی پوسته است و موجب افزایش چگالی و فشار با افزایش شعاع می‌گردد. این توزیع شعاعی به کمک انبساط خود - مانای فصل مشترک پوسته - خلاء ایجاد می‌شود. ناحیه درون $R(t) \leq r \leq R_{ext}(t)$ که در آن شعاع $R_{ext}(t)$ لحظه ای مرز بیرونی پوسته - خلاء است، از موج بازتابی تاثیر پذیر نمی‌باشد (شکل ۱).



شکل (۱): وضعیت موج ضربه ای اول و دوم در زمان $t > 0$ در برش عرضی هدف

پس از حرکت موج ضربه ای اصلی، در $R(t)=R_c$ با سر جبهه بازتابی برخورد می‌نماید. هنگامی که این موج به مرز داخلی پوسته برسد، فشار در سراسر پوسته P_0 خواهد شد و در این هنگام موج بازتابی دوم به سمت عقب انعکاس می‌یابد. فرآیند های بازتاب و فشرده سازی در زمانهای بعدی ادامه می‌یابد و فرض می‌شود که آنتروپی از این پس ثابت بماند. توزیع همسانگرد تر زمانی رخ می‌دهد که ضربه موج دوم دقیقاً هنگامی شروع به حرکت نماید و به مرز داخلی پوسته برسد که موج بازتابی رقیق اول شروع به حرکت نموده است. در مقابل، بدترین موقعیت هنگامی ایجاد می‌شود که زمان رها سازی موج دوم مصادف با رسیدن موج بازتابی اول به مرز خارجی پوسته باشد [۴].

۲- پارامترهای احتراقی سوخت فشرده

در یک انفجار درونی بهینه برای رسیدن به بالاترین درجه تراکم، می‌بایست (۱) ناحیه سردی با آن

آنتروپی ویژه پایین با هدایت کاملاً کنترل شده موج خارجی ایجاد نمود و (۲) در شتابی بی دررو به بالاترین مقدار سرعت انفجار درونی دست یافت. حالت اولیه هدف مطابق با انبساط خود - مانای فصل مشترک پوسته - خلاء برای چگالی به صورت زیر داده می شود [۵]:

$$\rho(r) = \rho_0 \left(\frac{r - R_i}{R_0 - R_i} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (1)$$

که در آن فرض می شود که سوخت گاز ایده آلی با ضریب آنتالپی $\gamma=5/3$ است. در ضمن فرض می شود که ناحیه مرکزی $0 \leq r \leq R_{HS}$ گاز ایده آلی با توزیع پله ای فشار و چگالی باشد. برای توصیف حالت اولیه از شش پارامتر زیر استفاده شده است:

$$H_{HS}[\text{kg/m}^2], T_{HS}[\text{KeV}], \chi_{HS}, \alpha, U_{im}[\times 10^7 \text{ m/s}], \mu_{HS}$$

که در آن H_{HS} پارامتر ناحیه داغ، T_{HS} دمای ناحیه داغ بر حسب KeV ، χ_{HS} شعاع کسری ناحیه داغ و به صورت نسبت شعاع ناحیه داغ به شعاع سوخت تعریف می شود، α آنتروپی ویژه (پارامتر آیزنتروپ) که بنا به تعریف نسبت فشار ناحیه سرد به فشار گاز تبهگن می باشد، μ_{HS} نسبت جرم ناحیه داغ به جرم سوخت و U_{im} سرعت انفجار درونی است. بنابراین، پیکربندی اولیه چگالی و فشار هدف را می توان اینگونه بیان نمود:

$$\rho(r) = \begin{cases} \rho_{HS} & 0 < r < \chi_{HS} \\ \rho_0 \left(\frac{\chi - \chi_i}{1 - \chi_i} \right)^{\frac{3}{2}} & \chi_{HS} < r < 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$P(r) = \begin{cases} P_{HS} & 0 < r < \chi_{HS} \\ A \alpha \rho_0^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\chi - \chi_i}{1 - \chi_i} \right)^{\frac{5}{2}} & \chi_{HS} < r < 1 \end{cases} \quad (3)$$

که ρ_0 چگالی اولیه هدف، P_{HS} فشار ناحیه داغ و ثابت $A = 2.18 \times 10^3 \text{ Pa.m}^5 \cdot \text{Kg}^{-5/3}$ است. به علت پیوستگی فشار در فصل مشترک دو ناحیه، با تساوی قرار دادن مقادیر فشار درست در بالا و زیر مرز $\chi = \chi_{HS}$ داریم:

$$P_{HS} = A \alpha \rho_0 \left(\frac{r - R_i}{R_m - R_i} \right)^{\frac{5}{3}} \quad (4)$$

به علت اینکه انرژی درون سوخت در حال انفجار درونی به نسبت $\mu_{HS} = M_{HS}/M$ است بنابراین در هدفهای پوسته ای نازک، کار خارجی انجام شده نیز دارای همین نسبت است، لذا این امر کمک می کند تا بتوان مقدار χ_{HS} را محاسبه نمود:

$$\chi_i = \frac{\chi_{HS} - \mu_{HS}^{2/5}}{1 - \mu_{HS}^{2/5}} \quad (5)$$

که در آن μ_{HS} نسبت جرم ناحیه داغ به سوخت است. بنابراین به کمک پارامتر بندی بالا، اکنون روابط مربوط به جرم و انرژی سوخت متراکم را بدست می آوریم:

$$M_f = \int_0^{R_m} \rho(r) dV = 4\pi R_m^3 \left(\frac{\rho_{HS} \chi_{HS}^3}{3} + \frac{\rho_0}{(1 - \chi_i)^{3/2}} \{F_M(1) - F_M(\chi_{HS})\} \right) \quad (6)$$

$$E_f = \frac{3}{2} \int_0^{R_m} P(r) dV = 6\pi R_m^3 \left(\frac{K\rho_{HS} T_{HS} \chi_{HS}^2}{3} + \frac{A\alpha\rho_0^{5/3}}{(1 - \chi_i)^{5/2}} \{F_E(1) - F_E(\chi_{HS})\} \right) \quad (7)$$

که در آن $F_M(\chi)$ و $F_E(\chi)$ توابع جبری بر حسب شعاع کسری ناحیه داغ هستند. با حل معادله توازن انرژی جنبشی، می توان معادله ای وابسته به سرعت برای چگالی اولیه محاسبه نمود:

$$\rho_0 = \left(\frac{(1 - \chi_i) F_M(1) - F_M(\chi_{HS})}{3A\alpha F_E(1) - F_E(\chi_{HS})} \right)^{3/2} U_{im}^3 \quad (8)$$

در گام آخر، اگر معادلات (۴)، (۵) و (۸) را در روابط جرم و انرژی سوخت قرار دهیم، در نهایت روابط جبری نسبتاً پیچیده ای را که صرفاً بر حسب شش کمیت احتراقی معرفی شده بدست خواهیم آورد.

۳- بهره انرژی و منحنی بهره حدی

مشکل اصلی در سهولت دستیابی به همجوشی محصور شده لختی (ICF) رسیدن به بهره انرژی G بالا برای کاربرد آن در مقیاس اقتصادی است [۶]:

$$G = \frac{E_{TN}}{E_B} \quad (9)$$

که در آن E_{TN} انرژی گرما هسته ای آزاد شده خروجی و E_B انرژی هزینه شده اولیه راه انداز است. گام بعدی در تحقیقات ICF پیش بینی بهره انرژی مبتنی بر محاسبات شبیه سازی عددی پیچیده است که با دقت بالایی بر تجارب آزمایشگاهی منطبق است [۳]. اما در این راستا، محاسبات تحلیلی یا نیمه-تحلیلی دانشمندان با وجود عدم تطابق دقیق با آزمایش، موجب درک عمیق تری از پدیده های فیزیکی دخیل در مسئله و شفاف کردن چهره معادلات قرار گرفته در پس محاسبات عددی خواهد شد. رابطه (۹) را می توان به شکل زیر نوشت:

$$G = \epsilon_{DT} f_B \frac{M_f}{E_f} \quad (10)$$

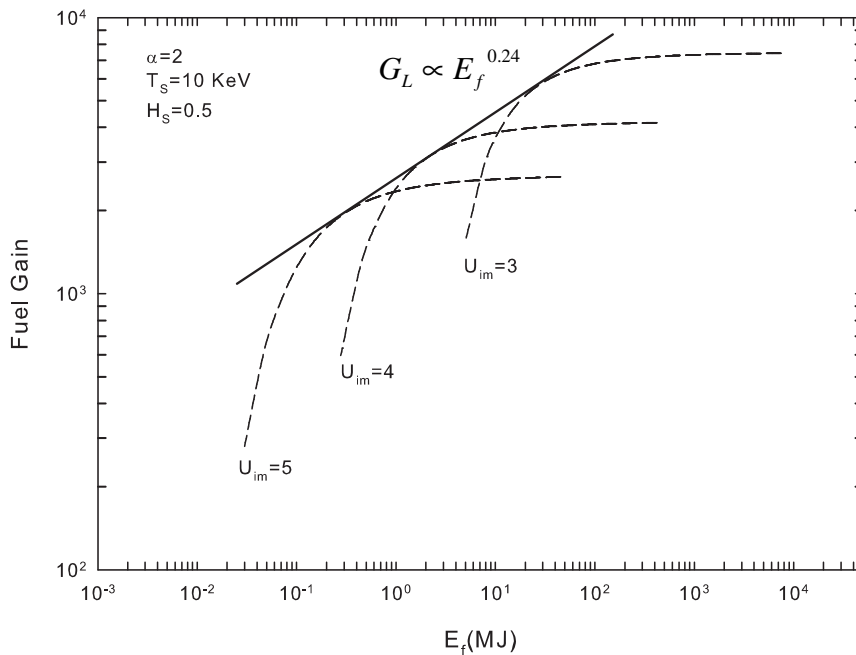
که در آن $\epsilon_{DT}=3.4 \times 10^5 \text{ MJ/g}$ و f_B کسر مصرف سوخت است. پیش از تعریف کسر مصرف، ابتدا پارامتر محصور شدگی سوخت سرد H_C را مطابق زیر معرفی می‌کنیم:

$$H_C = \int_{R_{HS}}^{R_m} \rho(r) dr = \frac{2\rho_0 R_m}{5(1-\chi_i)^{3/2}} \left((1-\chi_i)^{5/2} - (\chi_{HS} - \chi_i)^{5/2} \right) \quad (11)$$

بنابراین کسر مصرف با صرف نظر از H_{HS} ($H_C \gg H_{HS}$) به صورت زیر است:

$$f_B = \frac{H_C}{H_C + 7.0} \quad (12)$$

اکنون برای بازه تغییرات شعاع کسری ۰/۲ تا ۰/۸ و مقادیر ثابت پارامتر آیزنتروپ، α ، دمای ناحیه داغ، پارامتر ناحیه داغ و $\mu_{HS} = 0.001$ ، خانواده منحنی‌های بهره انرژی برای سه مقدار سرعت انفجار درونی ۳، ۴ و ۵ محاسبه و ترسیم شده است (شکل ۲).



شکل (۲): خانواده منحنی‌های بهره انرژی بر حسب پارامترهای احتراقی

پوش منحنی‌های بهره به ازای سرعت‌های انفجار درونی متفاوت منحنی بهره حدی، G_L ، نامیده می‌شود. با مقایسه نتایج بدست آمده در چارچوب مدل همفشار متناظر [۷]، در می‌یابیم که معرفی توزیع خود-مانا برای

ناحیه بیرونی سوخت موجب تعدیل شیب منحنی حدی بهره از $0/32$ به $0/24$ و در نتیجه چند گام نزدیک شدن به واقعیت می گردد.

۴- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله با گذر از مفاهیم در برگرفته چارچوب استاندارد همفشار و با استفاده از توزیع خود - مانای چگالی و فشار ناحیه سرد بیرونی، بهره انرژی و منحنی بهره حدی محاسبه و تعدیل شیب منحنی بهره حدی در نتیجه اعمال توزیع واقعی تر چگالی و فشار ناحیه سرد نشان داده شد.

۵- مراجع

- [1] J. Meyer-Ter-Vehn, C. Schalk, *Z. Naturforsch*, vol. 37a, 1982, pp. 955-969.
- [2] A.R. Piriz, *Physics of Fluids*, **B 1**, 1989, pp. 1477-1482.
- [3] A.R. Piriz, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion*, vol. 33, No.5, 1991, pp. 531-538.
- [4] N.Metzler, J. Meyer-Ter-Vehn, *Laser Part. Beams*, Vol. 2, 1984, pp.27.
- [5] M.M. Basko, J. Meyer-Ter-Vehn, *Physical Review Letters*, vol.88, No.24, 2002, pp. 244502
- [6] R.J. Mason, R.L. Morse, *Phys. Fluids*, Vol. 18, 1975, pp.814.
- [7] A. Ghasemizad, S.Khoshbinfar, *Proc. Int. Conf. Nuclear Energy for new Europe '06*, Bled, Slovenia, Sep. 5-8, 2005.