

در نظر گرفتن امواج ضربه ای در گداخت سوخت حالت جامد واکنش دوتریوم تریتوم

توسط لیزر

فاطمه بساک^۱، محمد معرفی رمیله*^۲، بابک مالکی نیا^۳

^۱گروه فیزیک، واحد علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

^۲گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

^۳گروه فیزیک، واحد گچساران، دانشگاه آزاد اسلامی، گچساران، ایران

چکیده:

با تابش لیزر به سوخت جامد، امواج ضربه ای در اثر انفجار یک شوک دینامیکی حاصل می شود، با عبور موج ضربه ای، دمای ناحیه پلاسمای داغ پشت موج بالا می رود. ناحیه ی میانی (ناحیه اشتعال) بین پلاسمای داغ و سوخت جامد بوجود می آید. در این مقاله موج ضربه ای، معادله آهنگ دمای الکترون و همچنین محاسبه مشخصات منطقه میانی شامل دما و چگالی بررسی شده است. سرانجام با استفاده از نتایج عددی بدست آمده شرایط جوش و گداخت در سوخت جامد دوتریوم-تریتوم توسط لیزر مشخص گردیده است.

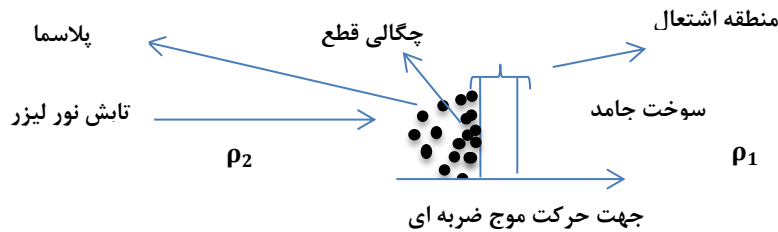
کلمات کلیدی

گداخت، امواج ضربه ای، سوخت حالت جامد، منطقه میانی، لیزر قطع، اشتعال

۱. مقدمه

زمانی که نور لیزر به سطح سرد یک ماده جامد برخورد می کند انرژی و شتاب آن از پرتو به ماده منتقل می شود و موجب گرم شدن ماده و حرکت آن می شود. اگر ماده در خلا قرار داشته باشد و لیزر به آن تابانده شود ضربه به ماده وارد شده و ماده حرکت خواهد کرد و همچنین اندکی امواج پراکنده ظاهر خواهد شد با این حال از آنجا که فشار بسیار بالا می رود امواج شاک در جهت تابش لیزر پخش می شود. در واقع با تابش لیزر به سوخت جامد سه ناحیه پلاسمای داغ، ناحیه میانی و ناحیه سوخت سرد بوجود خواهد آمد. یک انتشار موج ضربه ای از منطقه میانی به سوخت خواهیم داشت همچنین یک موج ضربه ای اشتعال آور یا

همان اشتعال از ناحیه پلاسمای داغ به منطقه میانی خواهیم داشت. هر دو موج به طرف داخل یعنی سوخت هدف انتشار می یابد.



شکل (۱). تابش لیزر به سوخت جامد و تولید موج ضربه ای

۲. معادله آهنگ دمای الکترون

نور لیزر به پلازما برخورد می کند در چگالی بحرانی که نور لیزر قطع می شود. انرژی لیزر به الکترون ها منتقل می شود. رابطه ی نهایی دمای الکترون با افزایش فاصله از مرز قطع لیزر به صورت زیر بدست می آید [۲].

$$T_e = \left(\frac{Q^2}{at}\right)^{\frac{2}{9}} f(\zeta) \quad (1)$$

در این رابطه Q انرژی ورودی به پلازما از طریق لیزر در زمان اولیه می باشد. a مقدار ثابت، t زمان می باشد.

$$f(\zeta) = \left[\frac{5}{18}(\zeta_0^2 - \zeta^2)\right]^{\frac{2}{5}} \quad (2)$$

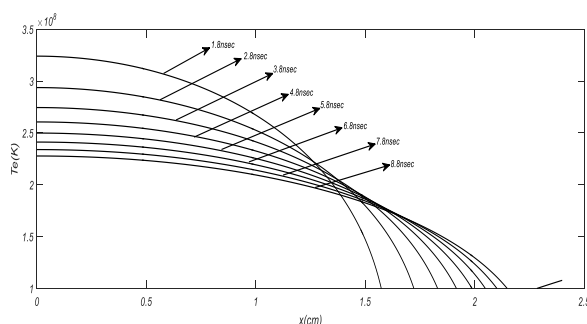
$$\zeta = \frac{x}{\left(\frac{5}{Q^2}\right)^{\frac{3}{9}}} \quad (3)$$

در این رابطه x عمق نفوذ موج حرارتی می باشد.

$$\zeta_0^2 = \frac{(9/2)^{7/2} 2^{-3/2}}{\frac{5}{2}\pi^{5/2}} \left[\frac{\Gamma(9/10)}{\Gamma(2/5)} \right]^{5/2} \quad (4)$$

در این رابطه Γ تابع گاما است. یک نمونه از محاسبه عددی رابطه (۱) برای الکترون‌ها در شکل (۲) رسم

شده است.



شکل (۲) دمای الکترون بر حسب مختصه اولیه موج حرارتی

از شکل مشاهده می‌شود که دمای الکترون با دور شدن از مرز کاهش پیدا می‌کند مفهومی این است که

با مکانیسم رسانش دمای الکترون‌ها به یون‌ها منتقل می‌شود. همچنین هر قدر زمان برهم کنش لیزر با ماده

کوتاه‌تر باشد الکترون‌ها دمای بیشتری را کسب می‌کنند.

۳. محاسبه مشخصات منطقه میانی شامل دما و چگالی

پلاسمای در عقب و در جلوی شوک در حالت پایدار فرض شده‌اند. فرض شده پلاسمای جلوی شوک

که با P_0 و ρ_0 توصیف شده در حال سکون باشد (یعنی، $u_0 = 0$) و در عقب شوک (P_1, ρ_1) پلاسمای

سرعت آغازین u_1 حرکت می‌کند. معادله ی بقای جرم، معادله ی پایستگی ممتوم، معادله ی پایستگی

انرژی توسط روابط زیر داده می‌شوند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(p + \rho u^2) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho c_v kT + \frac{\rho u^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\rho u \left(C_v kT + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho}\right)\right] = 0 \quad (7)$$

در این رابطه u سرعت ذره، p فشار، ρ چگالی، C_v گرمای ویژه در حجم ثابت، k ثابت بولتزمن، T دمای منطقه میانی می باشد.

در حالت پایدار مشتقات زمانی می توانند صرفنظر شوند. در چنین موردی سیستم معادلات (۵)، (۶) و (۷) به معادلات زیر ساده می شوند.

$$\rho_0 u_0 = \rho_1 u_1 \quad (8)$$

$$p_0 + \rho_0 u_0^2 = p_1 + \rho_1 u_1^2 \quad (9)$$

$$c_v kT + \frac{u_0^2}{2} + \frac{p_0}{\rho_0} = c_v kT + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} \quad (10)$$

این معادلات به روابط رانکین-هوگنیت مشهورند.

سطوح حالت جامد در منطقه یک قرار دارند. شفافیت منطقه ۲ باید طوری باشد که پرتو تابش در مرز جذب شود T_2 و p_2 باید نسبتاً بالا باشد. پس p_2 بسیار بزرگتر از فشار اولیه در حالت جامد است. بنابراین یک موج شوک در مرز به خاطر اختلاف فشار و چگالی به وجود می آید، دمای منطقه میانی از رابطه ی زیر محاسبه می شود [۳].

$$T = \left(\frac{5}{2} (J) \frac{5\gamma-1}{2(\gamma-1)} \frac{k}{m_j a}\right)^{\frac{2}{5}} (X_0 - x)^{\frac{2}{5}} \quad (12)$$

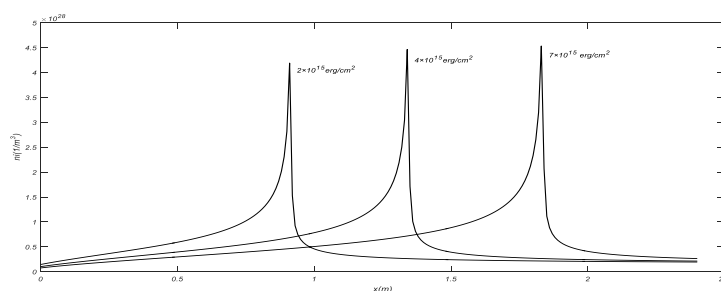
$$X_0 = \frac{2}{5|j|} \frac{2(\gamma-1)}{5\gamma-1} \frac{m_i a}{k} T_2^{\frac{5}{2}} = \frac{4}{5} \left(\frac{m_i}{k}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\gamma-1}{5\gamma-1} a \frac{T_2^2}{\rho_C} \quad (13)$$

رابطه (۱۲) یک پروفایل دمایی در اشتعال می باشد. طول ویژه X_0 ضخامت منطقه اشتعال را تعریف می کند، γ ضریب اتمسیتیته، ρ_C چگالی بحرانی و T_2 دمای پلاسما می باشد. در منطقه میانی پلاسما متشکل از دو نوع ذرات الکترون و یون است که طبق رابطه ی (۱۲) با محاسبات امواج ضربه ای دماهای آنها محاسبه می شود همچنین میتوان دمای الکترونها رو از رابطه ی (۱) از طریق معادلات هیدرودینامیک سیالی چو بدست آورد که برای الکترون ها رابطه ی (۱) و رابطه ی (۱۲) یک نتیجه را در بر خواهد داشت چون هر دو رابطه توصیف دمای کسب شده توسط الکترون بوسیله ی محرک لیزر در لحظه اولیه می باشد. یک نمونه از محاسبات عددی مربوط به رابطه (۱۲) در شکل (۲) برای الکترونها رسم شده است.

چگالی در منطقه میانی را می توان از اطلاعات مربوط به دمای منطقه میانی که همان دمای اشتعال است محاسبه کرد. رابطه زیر مربوط به محاسبه چگالی در منطقه میانی است [۴].

$$\rho = \rho_C \{3T_2 + [T_2(9T_2 - 8T)]^{1/2}\} / 4T \quad (14)$$

یک نمونه از محاسبات عددی رابطه (۱۴) در شکل (۳) برای چگالی منطقه میانی بر حسب مختصه اولیه موج حرارتی رسم شده است.



شکل (۳) چگالی منطقه میانی بر حسب مختصه اولیه موج حرارتی

از شکل مشاهده می شود که در یک فاصله معین یک پیکی در منحنی به علت جذب انرژی لیزر و انتشار موج ضربه ای دیده می شود، با افزایش انرژی ورودی دوباره پیک ها به مقدار بالاتر انتقال پیدا می کنند.

۴. نتیجه گیری

پالس لیزر در یک چگالی بحرانی پلاسما، ρ_c قطع می شود و جذب پلاسما می شود. و گرما به طرف منطقه چگال تر انتقال می یابد که ضخامت آن وابسته به رسانش گرمایی الکترون ها است. دمای الکترون با دور شدن از مرز کاهش پیدا می کند. با تابش لیزر به سوخت جامد سه ناحیه پلاسما داغ، ناحیه میانی و ناحیه سوخت سرد خواهیم داشت یابد. یک انتشار موج ضربه ای از منطقه میانی به سوخت خواهیم داشت. همچنین یک موج ضربه ای اشتعال آور یا همان اشتعال از ناحیه پلاسما داغ به منطقه میانی خواهیم داشت. هر دو موج به طرف داخل یعنی سوخت هدف انتشار می یابد. دمای منطقه میانی تابع رسانش گرمایی الکترون هاست. چگالی منطقه میانی به علت جذب انرژی ورودی لیزر و انتشار موج ضربه ای دیده می شود که با افزایش انرژی ورودی افزایش می یابد. معیار لوسون جهت انجام گداخت برای سوخت دوتریوم-تریتیوم $n\tau > 10^{20} \text{ s/m}^3$ می باشد که شرط لازم برای شروع واکنش های گداخت می باشد. در انرژی $E = 7.5 \times 10^{15} \text{ erg/cm}^2$ ، زمان $\tau = 3.8 \times 10^{-9}$ و چگالی $n = 1.2769 \times 10^{28}$ مقدار معیار لوسون 4.8522×10^{19} و در انرژی $E = 4.5 \times 10^{15} \text{ erg/cm}^2$ ، زمان $\tau = 3.8 \times 10^{-9}$ و چگالی $n = 1.2189 \times 10^{28}$ مقدار معیار لوسون 4.63182×10^{19} بدست می آید. همچنین در انرژی $E = 2.5 \times 10^{15} \text{ erg/cm}^2$ ، زمان $\tau = 3.8 \times 10^{-9}$ و چگالی $n = 1.1979 \times 10^{28}$ مقدار معیار لوسون 4.5520×10^{19} محاسبه می شود. مقدارهای معیار لوسون در انرژی های مختلف به ما نشان می دهد که همجوشی و گداخت سوخت جامد دوتریوم-تریتیوم با تک پالس لیزر پتاوات امکان پذیر نمی باشد و معیار لوسون ارضا نمی شود مگر اینکه سوخت جامد را به اندازه حداقل دو برابر متراکم کنیم تا معیار لوسون برقرار شود. متراکم کردن چگالی سوخت جامد به اندازه دو برابر با یک سری لیزرهای دارای توان کمتر از پتاوات که قبل پالس اصلی تابش می شوند انجام می شود. ابتدا پالسهای اولیه برای متراکم کردن سوخت جامد تابش می شود، بعد پالس اصلی لیزر پتاوات تابش می شود. در اینصورت می توان به عملی شدن گداخت لیزری در نیروگاههای تجاری امیدوار شد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد و با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز می باشد.



رفرنس ها

- [1] Zeldovich, Y.B., Raizer, Y.B., " Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena", Vols.1 and 2, Academic, New York,1966.
- [2] Chu, M.S. Phys. Fluids, Columbia University, pp. 413-422, 1972.
- [3] Ercole, G. "Delta-Shock Wave as Self-Similar Viscosity Limits,Quar", Appl, No. 1, pp. 177-199, 2000.
- [4] Dawson, J. and Oberman, C. Phys. Fluids 5, 517, 1962.