

## بررسی کلاسیکی تاثیر جذب تابش ترمزی در انرژی آستانه گداخت به روش پیستون

### پلاسمایی توسط لیزر

محسن، خرم دل<sup>۱</sup>؛ بابک، مالکی نیا<sup>۲</sup>؛ محمود، قرآن نویس<sup>۳</sup>

۱. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات فارس

۲. دانشگاه آزاد اسلامی واحد گچساران

۳. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

چکیده:

باتوجه به معادلات چوانرزی آستانه گداخت برای چگالی حالت جامد دوتریم-تریتیوم در حدود  $E = 4.3 \times 10^{15} \text{ erg/cm}^2$  به دست می آید، اما از آنجا که بخشی از تابش ترمزی در محیط پلازما دوباره جذب می شود در این تحقیق برانیم تا اثر این انرژی دوباره جذب شده را بر انرژی آستانه گداخت بررسی کنیم که نتیجه آن کاهش انرژی آستانه است.

کلید واژه ها: تابش ترمزی، انرژی جذبی، آستانه گداخت، پیستون پلاسمایی، پراکندگی

مقدمه:

هنگامی که الکترونها در مجاورت یونها در یک محیط پلازما عبور میکنند، بخشی از این انرژی پراکنده شده و بخشی از آن نیز جذب می شود. بنابراین اگر کل انرژی الکترون  $Q_{ext}$  باشد انرژی جذب شده برابر است با:

$$Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{sca} \quad (1)$$

از آنجا که انرژی پراکنده شده و انرژی کل الکترون از رابطه زیر به دست می آید:

$$Q_{ext} = I_i \times \frac{2\pi}{k} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) R_e \{ |a_n|^2 + |b_n|^2 \} \quad (2)$$

$$Q_{sca} = I_i \times \frac{2\pi}{k} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \{ |a_n|^2 + |b_n|^2 \} \quad (3)$$

که در این روابط  $I_i$  شدت نور تابشی است، اگر نفوذپذیری ذره و محیط اطراف آنرا یکسان در نظر بگیریم، ضرایب پراکندگی یعنی  $a_n$  و  $b_n$  را میتوان از روابط زیر به دست آورد:

$$a_n = \frac{m \psi_n(mx) \psi_n'(x) - \psi_n(x) \psi_n'(mx)}{m \psi_n(mx) \varepsilon_n'(x) - \varepsilon_n(x) \psi_n'(mx)} \quad (4)$$

$$b_n = \frac{\psi_n(mx) \psi_n'(x) - m \psi_n(x) \psi_n'(mx)}{\psi_n(mx) \varepsilon_n'(x) - m \varepsilon_n(x) \psi_n'(mx)} \quad (5)$$

در روابط بالا  $\psi_n$  و  $\varepsilon_n$  توابع بسل و ریکاتی،  $m$  ضریب شکست نسبی و  $x$  برابر است با:

$$x = \frac{2\pi Na}{\lambda} \quad (6)$$

برای به دست آوردن  $N$  ضریب شکست پلاسما با توجه به شرایط می توان از رابطه زیر استفاده کرد :

$$N = \sqrt{1 - \frac{v_p^2}{v^2}} \quad (7)$$

اگر چگالی الکترونها در هر متر مکعب محیط پلاسما برابر  $n_e = 6 \times 10^{28}$  باشد فرکانس پلاسما به صورت زیر به دست می آید:

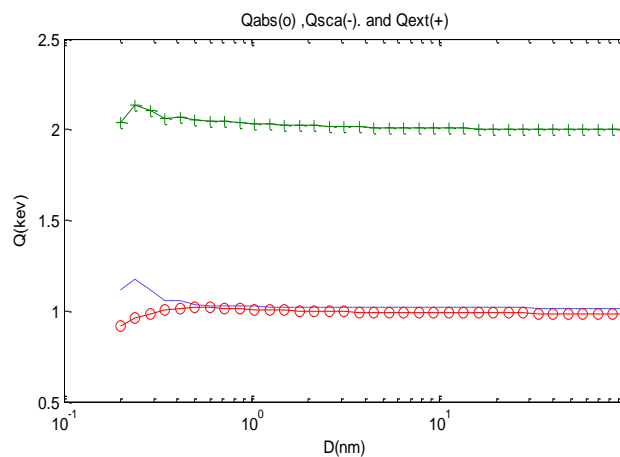
$$v_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m_e}} \approx 9n_e^{1/2} = 22 \times 10^{14} \text{ HZ} \quad (8)$$

با در نظر گرفتن فرکانس پرتوهای تابش ترمزی که از نوع ایکس سخت هستند، ضریب شکست پلاسما  $N \cong 0.9$  بدست می آید که همانگونه که پیش بینی می شد کمتر از یک است.

در معادله (۶) مقدار  $a$  همان طول دبای می باشد که با توجه به شرایط گداخت یعنی دمای ۸۰۰۰ الکترون ولت برابر است با:

$$a = \lambda_d = 7430 \sqrt{\frac{kT}{n_e}} = 2.7 \text{ nm}$$

حال با استفاده از محاسبات کامپیوتری نمودار تغییرات انرژی ها بر حسب طول دبای به شکل زیر خواهد بود:



شکل (۱) - نمودار تغییرات انرژی جذبی، پراکندگی و انرژی کل بر حسب طول دبای

حال انتشار و توسعه گداخت برای یک نور لیزر که به یک قرص سوخت دوتریوم - تریتیوم با چگالی حالت جامد می‌تابد را با استفاده از معادلات (( چو )) بررسی خواهیم کرد [۱]، که این معادلات شامل معادله پیوستگی چگالی، میزان واکنش، معادله حرکت و معادله دمای یون و الکترون است.

معادله پیوستگی چگالی و میزان واکنش با در نظر گرفتن معادله واکنش هسته ای معمول عبارتند از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + u \frac{\partial Y}{\partial x} = W \quad (10)$$

که  $\rho$  چگالی جرمی،  $u$  سرعت جرمی،  $Y$  کسر سوختی مواد و  $W$  میزان واکنش است

$$Y = \frac{n_\alpha + n_n}{n_D + n_T + n_\alpha + n_n} \quad (11) \quad \text{و} \quad W = \frac{1}{2} n (1 - Y)^2 \langle \sigma v \rangle \quad (12)$$

معادله بالانس هنگ دمای الکترون که از معادله پیوستگی ناشی می شود برابر است با:

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} + u \frac{\partial T_e}{\partial x} = \frac{-2}{3} T_e \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2}{3nk_b} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) + \frac{(T_i - T_e)}{\tau} + W_e - AT_e^{1/2} \quad (13)$$

در سمت راست این معادله، جمله اول مربوط به انبساط، جمله دوم مربوط به هدایت گرمایی، جمله سوماتلاف گرما ناشی از اختلاف دمای یون و الکترون، جمله چهارم افزایش دمای ناشی از کس جذب ذرات الفا و جمله اخر اتلاف دما ناشی از تابش ترمزی است که برای یونها هم به طور مشابه معادله زیر به دست می اید اما جمله تابش ترمزی در آن وجود ندارد:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} + u \frac{\partial T_i}{\partial x} = \frac{-2}{3} T_i \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2}{3nk_b} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{(T_e - T_i)}{\tau} + W_i \quad (14)$$

در لحظه اولیه با در نظر گرفتن شرایط زیر معادله (۱۳) به معادله (۱۵) تبدیل میشود:

$$u = 0, T = 0, Y = 0, W = 0, \rho = 0.1964 \frac{gr}{cm^3} \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{2m_i}{3\rho k_b} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right)$$

از آنجا که ماکزیمم حالت گداخت در نقطه  $x=0$  رخ می دهد، با در نظر گرفتن هم دمایی الکترونها و یونها هنگام گداخت و جمع دو معادله (۱۳) و (۱۴) در این نقطه و نیز با صرف نظر از هدایت گرمایی یونها معادله بالانس به صورت زیر در می اید:

$$W_i + W_e = \frac{4}{3} T_e \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2m_i}{3\rho k_b} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) + AT_e^{1/2} \quad (16)$$

جمله دوم که مربوط به هدایت گرمایی است را می توان از معادله (۱۵) و جمله اول که مربوط به انبساط است را از معادلات پایستگی و پیوستگی به شکل زیر در آورد:

$$W_i + W_e = \frac{2}{9} \frac{T_e}{t} + \frac{8}{9} \frac{k_b}{m_i} \left( \frac{1}{aT_e^{1/2}} \right) + AT_e^{1/2} \quad (17)$$

سمت چپ معادله نیز عبارت است از:

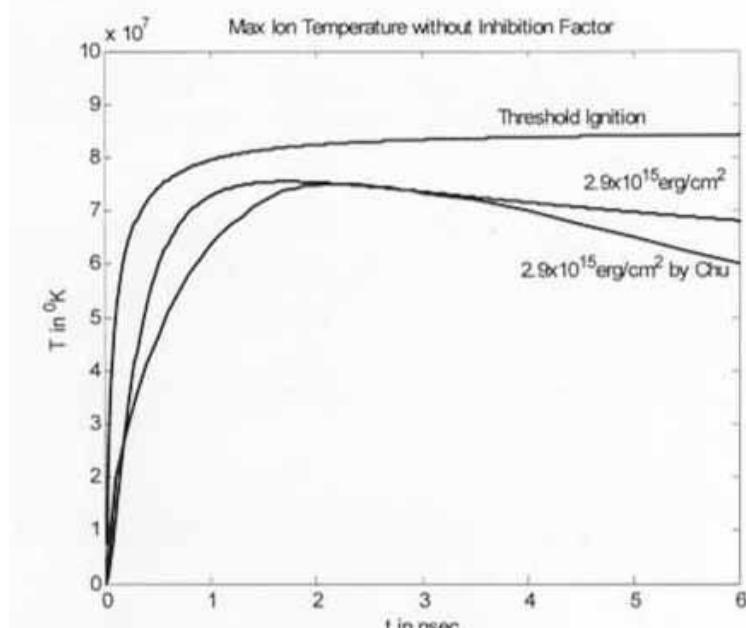


$$W_i + W_e = \frac{2W}{3k_b} = \frac{2}{3k_b} \times \frac{1}{8} n \langle \sigma v \rangle = \frac{1}{12k_b} n \times 3.7 \times 10^{-12} T_i^{-2/3} \exp(-20T_i^{-1/3}) \quad (18)$$

بنا بر این معادله به شکل زیر در می آید:

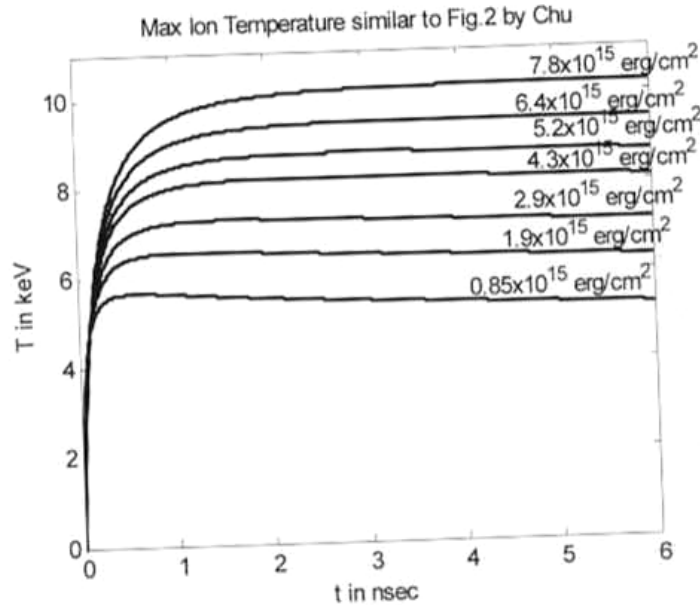
$$\frac{1}{12k_b} n \times 3.7 \times 10^{-12} T_i^{-2/3} \exp(-20T_i^{-1/3}) = \frac{2 T_e}{9 t} + \frac{8 k_b}{9 m_i} \left( \frac{1}{a T_e^{1/2}} \right) + A T_e^{1/2} \quad (19)$$

البته این معادله کمی با معادله چو متفاوت است، چون در معادله چو و بوبین در طرف اول معادله دمای الکترون در نظر گرفته شده است که رسیدن به شرایط گداخت مستقیم جامد دوتریوم - تریتیوم غیر ممکن بود و از آنجا که دانشمندان با استفاده از تابش مستقیم لیزر به گداخت چگالیهای بالاتر روی آوردند، ما نیز با ادامه دادن کار **chu** و در نظر گرفتن انتقال حرارت توسط یونهای جامد در طرف اول این معادله، انرژی مورد نیاز برای استانه گداخت را فراهم کرده ایم. [۲]



شکل (۲) - مقایسه تفاوت‌های منحنی چو با منحنی های تصحیح شده [۲]

حال اگر منحنی دمای ماکزیمم یون بر حسب زمان برای شار انرژی های مختلف را رسم کنیم، مشاهده می کنیم که در انرژی  $E = 4.3 \times 10^{15} \text{ erg/cm}^2$  منحنی به صورت افقی در می آید که در این حالت اتلاف تابش ترمزی و هدایت گرمایی با هم برابر میشوند و منحنی فوق استانه گداخت را نشان می دهد. [۳]



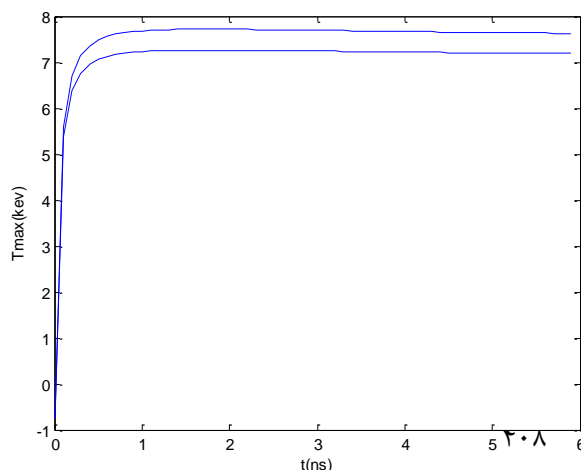
شکل (۳) - منحنی تغییرات دمای ماکزیمم یون بر حسب زمان برای شار انرژیهای مختلف [۲]

#### تاثیر دوباره جذب تابش ترمزی بر انرژی آستانه:

از آنجا که بخشی از انرژی گرما هسته ای به هنگام پراکندگی الکترونها در محیط پلاسما دوباره جذب خواهد شد بنابراین اگر فرض کنیم این انرژی با همان ضریب تابش جذب خواهد شد می توان جمله جذبی را به معادله (۱۹) اضافه کرد:

$$\frac{1}{12k_b} n \times 3.7 \times 10^{-12} T_i^{-2/3} \exp(-20T_i^{-1/3}) = \frac{2 T_e}{9 t} + \frac{8 k_b}{9 m_i} \left( \frac{1}{a T_e^{1/2}} \right) + A T_e^{1/2} - A Q_{abs}^{1/2} \quad (20)$$

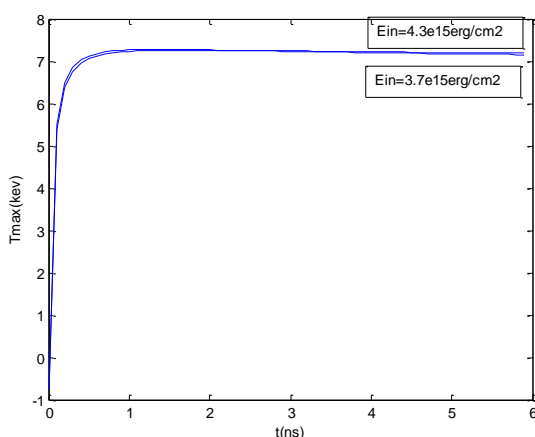
با قرار دادن  $Q_{abs} = 0.99 \text{ keV}$  از معادله (۱) و با استفاده از محاسبات کامپیوتری نمودار جدیدی برای دمای ماکزیمم یون در شار انرژی  $E = 4.3 \times 10^{15} \text{ erg/cm}^2$  به دست می آید که قدری از نمودار قبلی بالاتر است.



شکل (۴) - مقایسه نمودار دمای ماکزیمم یون با در نظر گرفتن انرژی دوباره جذبی تابش ترمزی



اما ماکزیمم دمای مورد نیاز برای گداخت همان دمای قبلی یعنی در حدود ۷ کیلو الکترون ولت است، پس می توانیم انرژی آستانه را انقدر کاهش دهیم تا منحنی جدید نیز با منحنی قبلی یکی شود و به همان دمای قبلی برسد، که این امر در شار انرژی  $E = 3.7 \times 10^{15} \text{ erg/cm}^2$  تحقق می یابد:



شکل (۵) - مقایسه دو نمودار با انرژی های ورودی متفاوت که در یکی از آنها انرژی دوباره جذب در نظر گرفته شده است.

#### نتیجه گیری:

برطبق معادلات **chu** که در آنها اثر دوباره جذب تابش ترمزی در نظر گرفته نشده است، انرژی آستانه گداخت در حدود  $E = 4.3 \times 10^{15} \text{ erg/cm}^2$  به دست آمده که کمتر از این مقدار سوختن ساده می باشد و بالاتر از آن، حالت گداخت را نشان می دهد که همواره در حال افزایش دما می باشد. اما با در نظر گرفتن اثر انرژی دوباره جذبی در پلازما، انرژی آستانه در حدود ۰/۶ کیلو الکترون ولت کاهش می یابد و به  $E = 3.7 \times 10^{15} \text{ erg/cm}^2$  میرسد که البته این کاهش چندان قابل ملاحظه نیست، ولی با در نظر گرفتن تاثیرات دیگر مانند فاکتور ممانعت، اثر تجمعی ذرات آلفا و اثر پاشندگی گرمایی می تواند در دستیابی به انرژی قابل کنترل مورد نیاز بشریت با راندمان بالا همراه با صرفه جویی اقتصادی حایز اهمیت باشد.

#### منابع:

- [۱] CHU, M.S. Thermonuclear reaction waves at high densities. Phys. Fluids ۱۵, ۴۱۳. (۱۹۷۲).  
 [۲] HORA, H. New aspects for fusion energy using inertial confinement Laser Part. Beams ۲۵, ۳۷-۴۵. (۲۰۰۷).  
 [۳] MALEKYNIA, B., HORA, H., GHORANNEVISS, M. & MILHY, G. H. Collective alpha particle stopping for reduction of the threshold for laser fusion using nonlinear force driven plasma blocks. Laser Part. Beams ۲۷, ۲۳۳-۲۴۱. (۲۰۰۹).