



## توان توقف الکترون های دو دمایی مگا الکترون ولتی درون سوخت پیش فشرده دتریم-تریتیم در مدل افروزش سریع-شوکی

سمیرا فقیه<sup>۱</sup>، سید ابوالفضل قاسمی<sup>۲\*</sup>، بابک خان بابایی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، دامغان-ایران

<sup>۲</sup> سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، تهران-ایران

چکیده:

توان توقف، زاویه انحراف میانگین و نفوذ الکترون ها با انرژی اولیه  $E_0 = 1-10 \text{ MeV}$  به درون سوخت پیش فشرده دتریم-تریتیم با چگالی  $\rho_c = 292-828 \text{ g cm}^{-3}$  و دمای زمینه  $T_e = 0.5-10 \text{ keV}$  به صورت تحلیلی و شبیه سازی مطالعه شده است. نتایج نشان می دهند که پراکندگی های بین ذرات باردار باعث کاهش نفوذ خطی الکترون ها به درون سوخت شده و مقایسه توان توقف الکترون ها با سه طیف تک انرژی، نمایی و شبه دو دمایی برای دو طول موج و شدت محرک افروزنده سریع نشان می دهد که با افزایش شدت و طول موج افروزنده سریع، توان توقف و کند شدگی پیوسته الکترون ها افزایش یافته و الکترون های شبه دو دمایی بیشتترین مقدار انرژی را به سوخت منتقل کرده و کند شدگی یکنواخت تری را در تحویل انرژی به سوخت از خود نشان داده اند. همچنین، محاسبه میزان انحراف میانگین از مسیر اولیه الکترون ها نشان می دهد با افزایش چگالی سوخت، میانگین زاویه انحراف تغییر موثری نمی کند در حالیکه با افزایش دما پراکندگی کولمبی بین ذرات افزایش یافته و میانگین انحراف افزایش می یابد. همچنین، بیشینه انحراف و پراکندگی در نزدیکی های انرژی باقی مانده بهنجار کوچک (کمتر از  $1 \text{ MeV}$ ) اتفاق می افتد که باعث انحراف موثر الکترون ها از راستای اولیه خود می شود. نتایج تحلیلی با کد شبیه سازی مونت کارلو MCNPX مورد راستی آزمایی قرار گرفته که با نتایج شبیه سازی سازگاری خوبی را نشان می دهند.

کلمات کلیدی: افروزش سریع-شوکی، زاویه انحراف میانگین، سوخت پیش فشرده، الکترون های دو دمایی، توان توقف

### Stopping power of mega electron-volt two temperature electrons in pre-compressed D-T fuel for fast-shock ignition scenario

S. Faghih<sup>1</sup>, S. A. Ghasemi<sup>2\*</sup>, B. Khanbabaei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Physics, Damghan University, Damghan-Iran

<sup>2</sup> Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran-Iran

#### Abstract

The stopping power, mean deflection angle and electrons penetration with initial energy  $E_0 = 1-10 \text{ MeV}$  into pre-compressed D-T fuel with density  $\rho_c = 292-828 \text{ g cm}^{-3}$  and



*background plasma temperature  $T_e = 0.5 - 10$  keV have been calculated analytically and numerically. The results indicate that scattering between charged particles reduces electron penetration into the fuel. Further, comparing stopping power of electrons with mono-energetic, exponential and two-temperature distribution functions for two fast ignitor wavelength and intensity show that by increasing intensity and wavelength, stopping power and continuous slowing down of electrons increase and two-temperature electrons have more uniform slowing down and deposit more energy into the fuel. Meanwhile, calculation of electron mean deflection from it's initial direction presents that with fuel density increment, the mean deflection angle dose' not change effectively, but temperature increment will improve the scattering between charged particles and enhance mean deflection angle. The maximum deflection and scattering occur around small normalised residual energy of the order of 1 MeV which lead effective deflection of electrons from their initial direction. Finally, the analytical results have been confirmed by MCNP X monte carlo code and show good consistency with simulations.*

**Keywords:** Fast-shock ignition, mean deflection angle, pre-compressed fuel, two- temperature electrons, stopping power

#### مقدمه :

مدل ترکیبی افروزش سریع - شوکی اخیراً<sup>۱</sup> به عنوان یک مدل جدید برای انجام فرایند گداخت محصورسازی اینرسی معرفی شده است [۱, ۲]. در این مدل هنگام اعمال باریکه لیزر افروزنده سریع از میان کانال حفر شده به درون کرونا کم چگال سوخت، به واسطه برهمکنش این لیزر با پیش پلاسمای زمینه<sup>۱</sup> الکترون های نسبیتهی به وجود می آیند که این الکترون های نسبیتهی با انرژی از مرتبه مگا الکترون ولت باید فاصله بین محل تولید این الکترونها در کرونا تا سطح سوخت که از مرتبه چند ده میکرون می باشد را طی کنند تا به سطح سوخت رسیده و انرژی خود را درون سوخت اصلی تخلیه کنند، هر چند مشکلاتی از قبیل پراکندگی باریکه الکترونی به صورت رشته رشته شدن و یا شاخه شاخه شدن اتفاق می افتد که انتقال موثر انرژی این الکترون ها را به سطح سوخت به طور جدی مختل می کند، با این وجود بخشی از انرژی این الکترون ها به درون سوخت راه یافته و در آن تخلیه می شود. رفتار تخلیه انرژی الکترون های پر انرژی و توان توقف این الکترون ها درون پلاسمای چگال در مرجع های [۱, ۳-۶] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، مقادیر توان توقف، میزان انحراف و عمق نفوذ الکترون های نسبیتهی با سه طیف انرژی نمایی، تک انرژی و شبه دو دمایی در محدوده انرژی  $E_e = 1 - 10$  MeV درون سوخت چگال با محدوده دمایی زمینه  $T_e = 0.5 - 10$  keV و گستره چگالی  $\rho_e = 292 - 828$  g cm<sup>-3</sup> به طور تحلیلی و شبیه سازی مطالعه شده و نشان داده شده که الکترون ها با طیف انرژی شبه دو دمایی عمق نفوذ بیشتری درون سوخت داشته و مقدار بیشتری انرژی به درون سوخت انتقال می دهند. بنابراین، الکترون ها با طیف شبه دو دمایی می تواند کاندید مناسبی برای انجام بهینه افروزش سریع - شوکی و سریع باشند.

<sup>1</sup> Pre-plasma

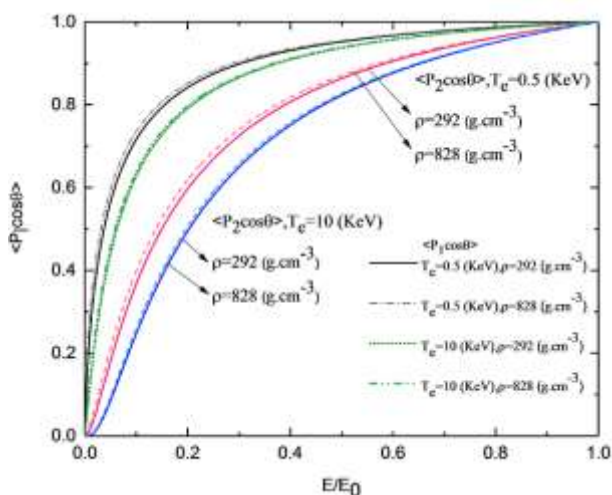


محاسبه توان توقف و برد الکترون های نسبی درون سوخت چگال :

باریکه الکترون های نسبی ایجاد شده از برهمکنش پالس افروزنده سریع بعد از نفوذ به درون سوخت چگال دچار پراکندگی هایی شده و از مسیر اولیه منحرف می شوند، مقدار متوسط زاویه انحراف باریکه الکترونی از رابطه زیر به دست می آید [۶]:

$$\langle P_\ell \cos\theta \rangle = \exp \left[ - \int_{E_0}^E K_\ell E \cdot \left( \frac{dE}{ds} \right)^{-1} dE \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $K_\ell(E)$  سطح مقطع ترابرد مؤثر بر پراکندگی باریکه الکترونی است و  $\left( \frac{dE}{ds} \right)$  طبق رابطه مرجع [۶] بیانگر توان توقف پلاسما می باشد. شکل (۱) نمودار مربوط به زاویه انحراف باریکه الکترونی را نشان می دهد که به عنوان تابعی از انرژی باقی مانده در پلاسما D-T برای باریکه الکترونی رسم شده است.



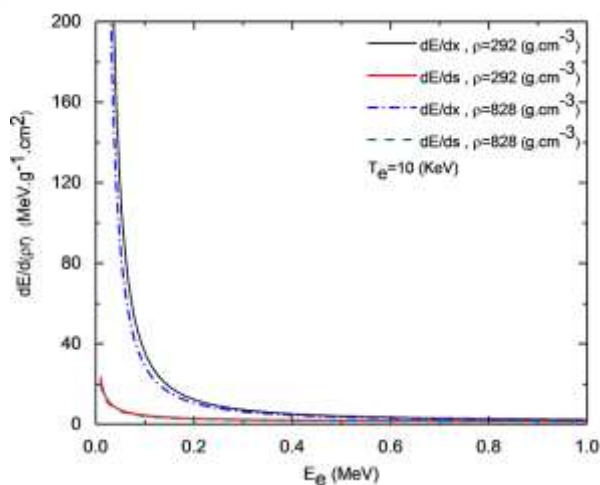
شکل ۱: متوسط زاویه انحراف الکترون ها در نفوذ به ناحیه چگالی  $\rho_c = 292 - 828 \text{ g cm}^{-3}$  بر حسب انرژی باقی مانده درون پلاسما با دمای

$$T_e = 0.5 - 10 \text{ keV} \text{ برای باریکه الکترونی با انرژی اولیه } 10 \text{ MeV}$$

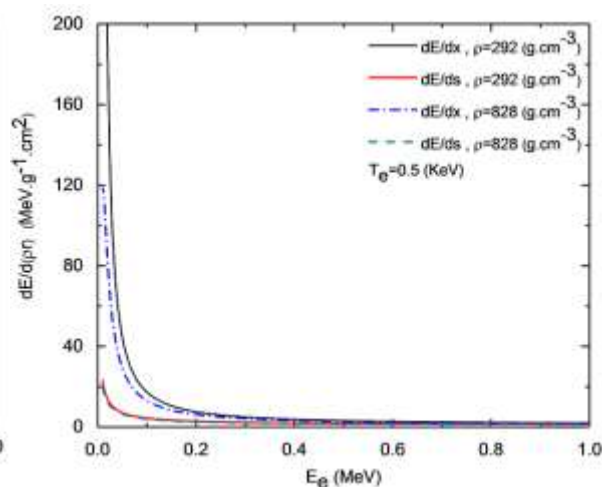
توان توقف خطی در جهت سرعت اولیه الکترون و میانگین بُرد خطی ، به ترتیب با روابط زیر تعریف می شوند [۶]:

$$\frac{dE}{dx} = \langle \cos\theta \rangle^{-1} \frac{dE}{ds} \quad (2)$$

$$\langle x \rangle = \int_{E_0}^E \langle \cos\theta \rangle \left( \frac{dE}{ds} \right)^{-1} dE \quad (3)$$



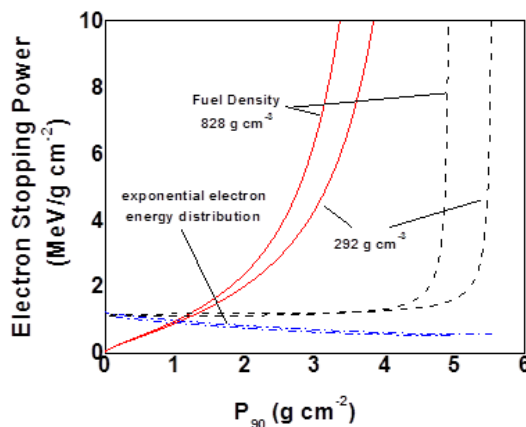
(ب)



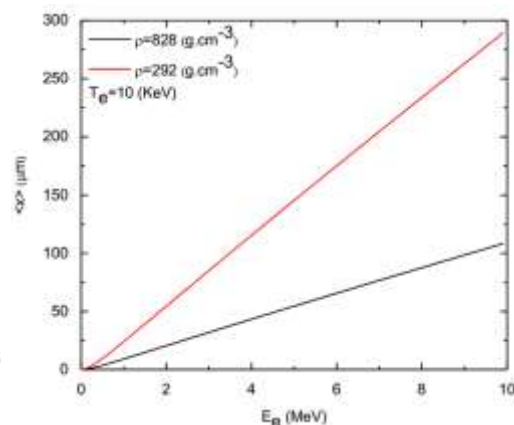
(الف)

شکل ۲: توان توقف رابطه‌نمایی مرجع [۶] برای محدوده چگالی  $\rho_c = 292 - 828 \text{ g cm}^{-3}$  (الف) برای دمای زمینه ۰/۵ و (ب) برای دمای زمینه ۱۰ کیلو الکترون ولت.

نمودار بُرد خطی، رابطه (۳) که در محدوده  $T_e = 0.5 - 10 \text{ keV}$  وابستگی ناچیزی به دمای پلاسما دارد با افزایش چگالی کاهش می‌یابد در شکل ۳-الف) ترسیم شده است. طیف انرژی‌نمایی و تک انرژی طبق مرجع [۷] و طیف دودمایی طبق مرجع [۸] سه طیف انرژی در نظر گرفته شده برای باریکه الکترونی می‌باشند، که این سه طیف در شکل (۴) به عنوان تابعی از انرژی باریکه الکترونی رسم شده است.



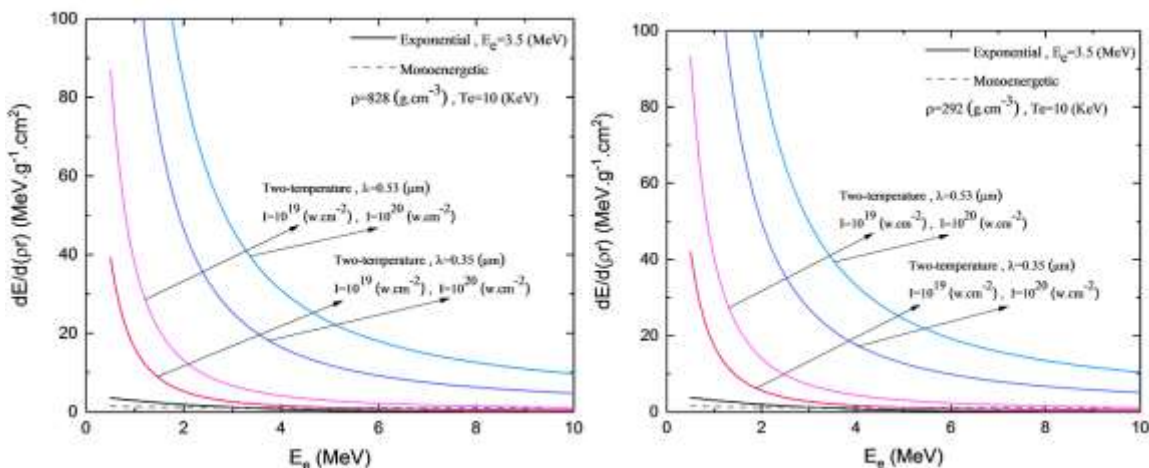
(ب)



(الف)

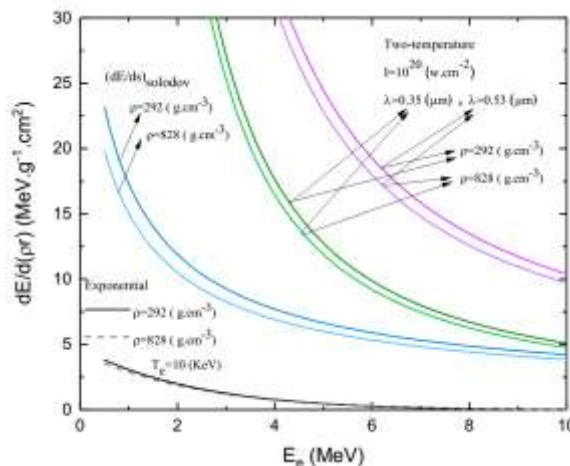


شکل ۳: الف: مقادیر برد خطی برای  $\rho_c = 292 - 828 \text{ g cm}^{-3}$  و دمای  $10$  کیلوکترون ولت و ب) توان توقف الکترون‌ها بر اساس عمق نفوذ درون سوخت با چگالی  $\rho_c = 292 - 828 \text{ g cm}^{-3}$ . نمودار خط پر مربوط به توزیع شبه دو دمایی الکترون‌ها، نمودار خط چین مربوط به توان توقف نمایی مرجع [۶] و نمودار خط چین-نقطه مربوط به توان توقف طیف نمایی مرجع [۶] می‌باشد.



(ب)

(الف)



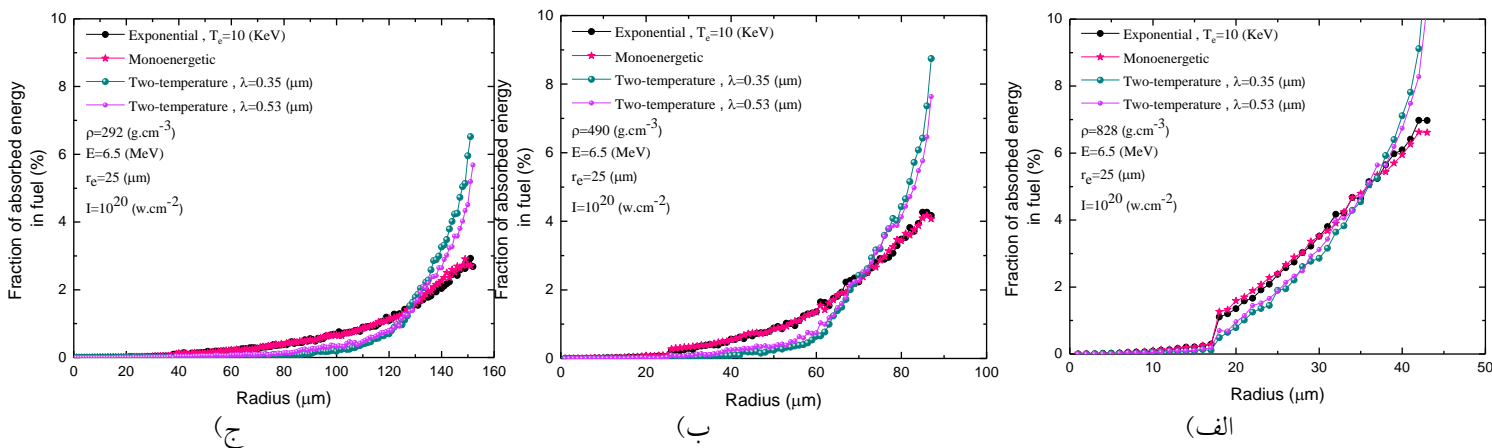
(ج)

شکل (۴): توان توقف الکترون‌ها با سه توزیع تک انرژی، نمایی مرجع [۷] و دودمایی درون پلاسمای با دمای زمینه  $10$  کیلوکترون ولت، دو طول موج افروزنده سریع  $0.35$  و  $0.53$  میکرون و شدت لیزر محرک افروزنده  $10^{19}$  و  $10^{20}$  وات بر سانتی متر مربع، طیف نمایی با انرژی اولیه  $3/5$  مگا الکترون ولت. الف) برای چگالی  $\rho_c = 292 \text{ g cm}^{-3}$  ب) برای چگالی  $\rho_c = 828 \text{ g cm}^{-3}$  ج) برای دو چگالی و سه توزیع نمایی مرجع [۷]، نمایی مرجع [۶] و دودمایی

محاسبات شبیه سازی:



با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX و با در نظر گرفتن سه طیف انرژی دو دمایی، طیف انرژی نمایشی و تک انرژی برای باریکه الکترونی، نفوذ و انتقال انرژی الکترون ها به درون سوخت برای هندسه کروی با در نظر گرفتن شعاع باریکه الکترونی ۲۵ میکرون بر روی سوخت شبیه سازی انجام شده است، شکل ۵.



شکل (۵): سه طیف انرژی دو دمایی، تک انرژی و نمایشی دمایی پلاسمای زمینه ۱۰ کیلو الکترون ولت. شکل الف) چگالی ۸۲۸ گرم بر سانتی متر مکعب،

شکل ب) چگالی ۴۹۰ گرم بر سانتی متر مکعب، شکل ج) چگالی ۲۹۲ گرم بر سانتی متر مکعب

### بحث و نتیجه گیری :

در این مقاله، مقادیر توان توقف، میانگین زاویه انحراف و عمق نفوذ الکترون های نسبی در مدل سریع- شوکی با سه طیف انرژی نمایشی، تک انرژی و شبه دو دمایی در محدوده انرژی  $E_e = 1-10 \text{ MeV}$  درون سوخت چگال با محدوده دمایی زمینه  $T_e = 10-50 \text{ keV}$  و گستره چگالی  $\rho_c = 292-828 \text{ g cm}^{-3}$  که در مدل های پیشرفته افروزش مانند افروزش سریع و سریع- شوکی معمول است به طور تحلیلی و شبیه سازی مورد مطالعه قرار گرفته و نشان داده شده که الکترون ها با طیف انرژی شبه دو دمایی عمق نفوذ بیشتری درون سوخت داشته و مقدار انرژی موثرتری را به درون سوخت انتقال می دهند. در شکل ۱ متوسط زاویه انحراف برای باریکه الکترون  $10 \text{ MeV}$  بر حسب انرژی باقی مانده بهنجار درون پلازما ترسیم شده است. شکل نشان می دهد که همزمانی که الکترونها تغییر راستا و مسیر می دهند انرژی را از دست داده و درون سوخت تخلیه می کنند و میزان انحراف در محدوده چگالی  $\rho_c = 292-828 \text{ g cm}^{-3}$  نزدیک به هم است. به عبارت دیگر با افزایش چگالی، میانگین زاویه انحراف تغییر موثری نمی کند در حالیکه با افزایش دما پراکندگی های جمعی کولمبی بین ذرات باردار افزایش یافته و میانگین انحراف افزایش می یابد. همچنین شکل نشان می دهد که پراکندگی در نزدیکی های انرژی های باقی مانده کوچک (کمتر از  $1 \text{ MeV}$ ) باعث انحراف موثر الکترون ها از راستای اولیه خود می شود، مثلا برای چگالی  $\rho_c = 828 \text{ g cm}^{-3}$  و دمایی  $T_e = 10 \text{ keV}$  به ازای  $E/E_0 = 0.5$  الکترون ها حدود ۶۰ درجه منحرف شده و بیشینه راستای خود را از دست می دهند. از مقادیر شکل ۱ برای محاسبه توان



توقف خطی و کند شدگی پیوسته پلاسما مستقل از دما، طبق رابطه موجود در مرجع [۶] و توان توقف وابسته به دما که در جهت سرعت اولیه الکترون به دما وابسته است، رابطه (۳) استفاده شده است. به طوری که با افزایش دما به میزان ناچیزی افزایش می‌یابند. در حالی که مقدار هر دو رابطه با افزایش انرژی باریکه الکترونی به صورت پیوسته کاهش می‌یابد، و بالاتر بودن  $\frac{dE}{dx}$  نسبت به  $\frac{dE}{ds}$  ناشی از تاثیر پراکندگی جمعی کولمبی بین ذرات باردار است، شکل ۲. در شکل ۳ میانگین بُرد خطی الکترون‌های نسبی متناسب با انرژی باریکه الکترونی تغییر می‌کند و افزایش چگالی پلاسما بر آن تاثیر گذاشته و باعث کم شدن مقدار میانگین بُرد خطی و میزان نفوذ الکترون‌های نسبی درون سوخت چگال می‌شود، شکل ۳ - الف). در شکل ۳ - ب) توان توقف الکترون‌ها با سه طیف انرژی بر حسب عمق نفوذ، مسافتی که در آن الکترون‌ها ۹۰ درصد انرژی خود را تخلیه می‌کنند می‌باشد  $p_{q,0}(E) \approx 0.8R$ ، ترسیم شده، مشاهده می‌شود که طیف انرژی شبه دو دمایی تابعی به نحو موثر تری و یکنواخت تری انرژی را در کل سوخت تخلیه می‌کند در حالیکه طیف نمایی همه انرژی خود را در ابتدای مسیر و دور از لکه داغ مرکزی به سوخت منتقل می‌کند. شکل ۴ نتایج تحلیلی سه طیف انرژی نمایی و تک انرژی و شبه دو دمایی را برای دو طول موج و شدت افروزنده سریع نشان می‌دهد که به صورت تابعی از انرژی باریکه الکترونی رسم شده است. از شکل‌های ۴-الف و ب به وضوح پیداست که با افزایش شدت و طول موج افروزنده سریع مقادیر توان توقف طیف شبه دو دمایی افزایش می‌یابد حال آنکه از مقادیر طیف نمایی و تک انرژی مرجع [۷] بزرگتر هستند. در شکل ۴-ج) مقادیر شبه دو دمایی با مقادیر نمایی مراجع [۶] و [۷] مقایسه شده و افزایش مقادیر شبه دو دمایی حتی از مقادیر نمایی مرجع [۶] به وضوح مشاهده می‌شود. جهت تایید محاسبات تحلیلی، نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل ۵ که برای نوع هندسه کروی انجام شده است ترسیم شده که نشان می‌دهند محاسبات تحلیلی با محاسبات شبیه سازی سازگاری خوبی دارند. بنابراین به نظر می‌رسد که برای رسیدن به نتیجه بهینه در فرایند گداخت محصورسازی اینرسی با مدل ترکیبی افروزش سریع-شوکی و افروزش سریع، طیف انرژی شبه دو دمایی می‌تواند انتخاب مناسبی است.

مراجع :

- [۱] S.A. Ghasemi, A.H. Farahbod, S. Sobhanian, " Analytical model for fast-shock ignition", AIP Adv. 4 , 077130 (2014).
- [۲] A. H. Farahbod, S. A. Ghasemi, M. J. Jafari, S. Rezaei and S. Sobhanian, "Improvement of non-isobaric model for shock ignition", Eur. Phys. J. D., 68:314(2014).
- [۳] .C. K. Li, R. D. Petrasso, " Energy deposition of MeV electrons in compressed targets of fast-ignition inertial confinement fusion... C.", Phys. Plasmas 13, 056314 (2006).
- [۴]. A. A. Solodov, R. Betti, " Stopping power and range of energetic electrons in dense plasmas of fast-ignition fusion targets", Phys. Plasmas 15, 042707 (2008).
- [۵]. C. K. Li, R. D. Petrasso, "Stopping of directed energetic electrons in high-temperature hydrogenic plasmas", Phys. Review E 70, 067401 (2004).



- [۶]. A. A. Solodov, R. Betti, "Stopping power and range of energetic electrons in dense plasmas of fast-ignition fusion targets", Phys. Plasmas 15, 042707 (2008).
- [۷]. S. Atzeni, A. Schiavi, and J. R. Davies, "Stopping and scattering of relativistic electron beams in dense plasmas and requirements for fast ignition This", Plasma Phys. Control. Fusion, 51, 015016 (2009).
- [۸]. C. Bellei, L. Divol, A. J. Kemp, M. H. Key, "Fast ignition: Dependence of the ignition energy on source and target parameters for particle-in-cell-modelled energy and angular distributions of the fast electrons", Physics of Plasmas 20, 052704 (2013).