پراکندگی و نفوذ الکترون ها درون سوخت چگال در رویکرد افروزش سریع– شوکی

سید ابوالفضل قاسمی*، امیر حسین فرهبد

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای

چکیده:

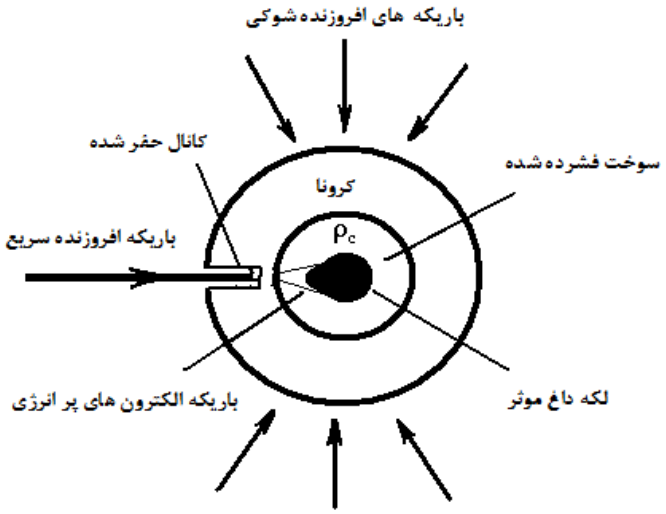
در این مقاله، نفوذ و پراکندگی الکترون های پر انرژی به درون سوخت چگال و لکه داغ با در نظر گرفتن توزیع طیف انرژی برای الکترون های داغ در رویکرد افروزش سریع- شوکی بررسی و عوامل موثر بر پراکندگی باریکه الکترون ها در رسیدن به سطح سوخت مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه سازی ما نشان می دهند که الکترون های سریع با توزیع انرژی دو دمایی در مقایسه با توزیع انرژی نمایی و همچنین طیف تک انرژی آنها، می توانند به میزان بیشتری به درون سوخت نفوذ کنند و انرژی بیشتری را به سوخت تحویل دهند که نتایج شبیه سازی های انجام شده به روش مونت کارلو است. همچنین، مطالعات پراکندگی الکترون ها به سمت سطح خارجی سوخت جامد برای ۵ مقدار چگالی سوخت و دو طول موج محرک افروزنده سریع ۰/۵۳ و ۰/۳۵ میکرون مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاکی ازافزایش موثر پراکندگی و شاخه شاخه شدن مسیر حرکت الکترون ها با افزایش انرژی الکترون ها و طول موج محرک افروزنده سریع به ازای جرم سوخت بزرگتر از ۲ میلی گرم است.

کلمات کلیدی: *پراکندگی الکترون ها، طیف انرژی دو دمایی، محرک افرونده سریع.*

مقدمه :

مدل ترکیبی افروزش سریع- شوکی اخیرا به عنوان یک مدل جدید برای انجام فرایند گداخت محصورسازی اینرسی معرفی شده است[1-2]. در این مدل هنگام اعمال باریکه لیزر افروزنده سریع از مین کانال حفر شده به درون کرونای کم چگال سوخت، به واسطه برهمکنش این لیزر با پلاسمای زمینه از پیش تولید شده الکترون های نسبیتی به وجود می آیند که این الکترون های نسبیتی با انرژی از مرتبه چند مگا الکترون ولت باید فاصله بین محل ایجاد 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، شکل ۱. در این فاصله پراکندگی هایی به صورت جمله رشته رشته شدن و یا شاخه شاخه شدن برای الکترون اتفاق می افتد که انتقال موثر انرژی این الکترون ها را به سطح سوخت به طور جدی مختل کرده و بنابراین انجام برهمکنش

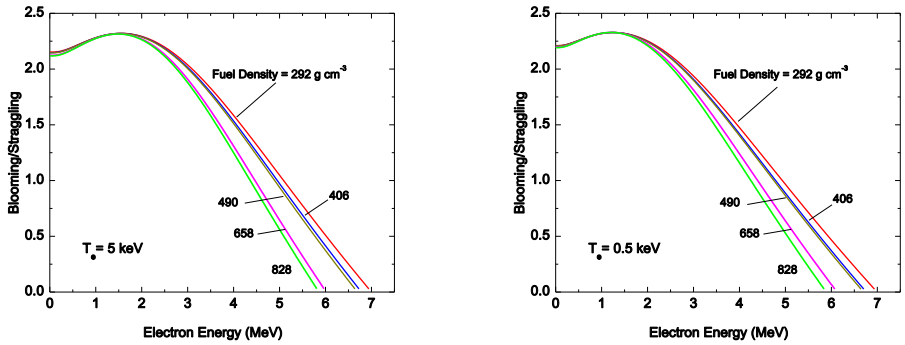
گداخت موفق را دچار مشکل می کند. هر چند مطالعه دقیق پراکندگی الکترون ها نیازمند کد های شبیه سازی قدرتمند ذره ای است، با این وجود در این مقاله سعی شده است با در نظر گرفتن سه طیف تک انرژی، دو دمایی و همچنین طیف انرژی نمایی برای الکترون ها و استفاده از شبیه سازی با روش نمونه گیری تصادفی مونت کارلو، پراکندگی الکترون ها و میزان نفوذ آن ها به درون سوخت اصلی مورد بررسی قرار گیرد.



شکل(۱): مدل افروزش سریع- شوکی. در این رویکرد افروزش سوخت به کمک دو افروزنده انجام می پذیرد[۶-۱].

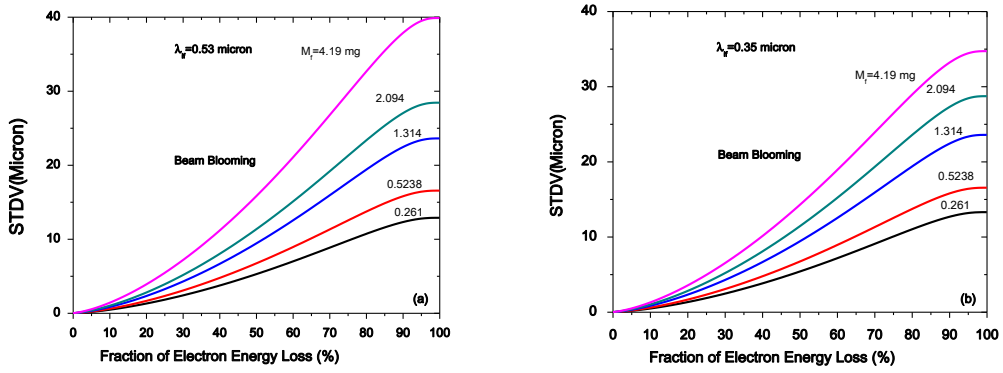
پراکندگی الکترون های سریع در مسیر به سوی سطح سوخت چگال:

در راستای محاسبه شاخه شاخه شدن و تفرق باریکه الکترون های نسبیتی در روش افروزش سریع- شوکی از رابطه استاندارد تفرق طولی (در راستای انتشار باریکه الکترون ها) به کار رفته در مرجع [7] استفاده شده است. نتیجه محاسبات به صورت نسبت دو کمیت در شکل 2 آورده شده است، در این شکل، تفرق و شاخه ای شدن باریکه الکترون ها به عنوان تابعی از اتلاف انرژی الکترون ها، $\Delta E = [(E_\circ - E)/E_\circ] \times ۱۰۰$ برای الکترون های نسبیتی با انرژی کمتر از MeV ۵در پلاسمای دتریم- تریتیم در پلاسما در محدوده دمایی $۰/۵ \le T_e \le ۵$ keV ترسیم شده است. مشاهده می شود که برای هر ۵ مقدار جرم سوخت حداکثر انحراف از مسیر اصلی باریکه در انرژی حدود MeV ۱/۵~رخ می دهد و با افزایش انرژی الکترون ها این نسبت به سرعت کاهش می یابد.



شکل (۲): نسبت پراکندگی بهنجار الکترون ها برای ۵ چگالی سوخت به کار رفته در مدل سریع- شوکی درون سوخت سرد با انرژی یون $۰/۵ \leq T_i \leq ۵$ keV.

در شکل۳پراکندگی الکترون برای دو طول موج محرک، ۰/۵۳ و ۰/۳۵میکرون به ازای ۵ جرم سوخت بررسی شده است. مشاهده می شود که با افزایش طول موج محرک افروزنده سریع در مدل افروزش سریع- شوکی به ازای جرم سوخت بزرگتر از ۲ میلی گرم پراکندگی موثر الکترون ها افزایش می یابد.

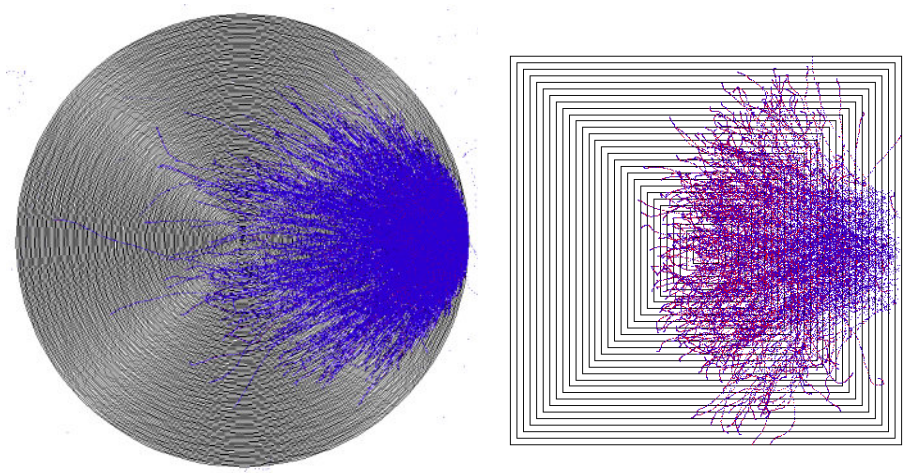


شکل (۳): کسر انرژی تلف شده الکترون ها در طول موج های مختلف افروزنده سریع برای ۵ جرم سوخت متفاوت به کار رفته در مدل افروزش سریع- شوکی.

شبیه سازی مونت کارلو و اعتبار سنجی آن:

همانگونه که می دانیم، کد محاسباتی MCNPX قادر است نفوذ الکترون ها را در بازه انرژی ۱keV تا ۱GeV به درون یک محیط شبیه سازی کند. اینکه پلاسما یک محیط یونیزه است و آیا کد محاسباتی MCNPX برای محیط های یونیزه قابل استفاده است، باید گفت که مولفان در ابتدا جهت بررسی و

اطمینان از درستی محاسبه ترابرد الکترون های چند مگا الکترون ولتی به درون پلاسمای چگال، برنامه نوشته شده در محیط MCNPX را با محاسبات انجام شده توسط دو مرجع مهم [3] و [7] راستی آزمایی (Benchmark) کردند به طوریکه با محاسبات مونت کارلوی مرجع [3] مربوط به پراکندگی و نفوذ الکترون های ۱ مگا الکترون ولتی درون پلاسمای با دمای ۵ keV و چگالی ۳۰۰ گرم بر سانتی متر مربع تا حد بسیار زیادی سازگار است، شکل ٤.

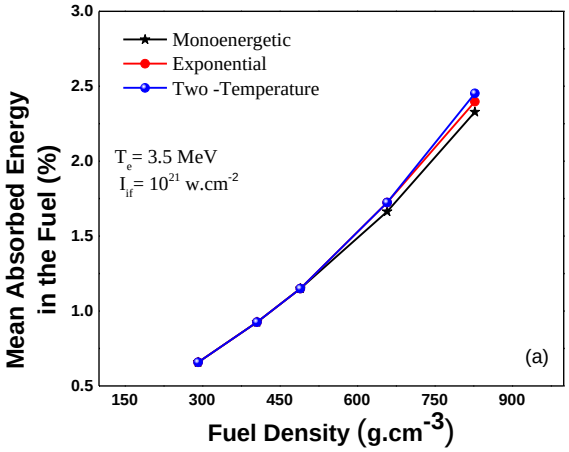


شکل (۴): نتایج بدست آمده به کمک کد محاسباتی MCNPX برای نفوذ الکترون ها با انرژی ۱/۵ مگا الکترون ولت به درون سوخت با دمای ۵ کیلو الکترون ولتی و چگالی ۳۰۰ گرم بر سانتی متر مکعب. راست) هندسه تخت، چپ) هندسه کروی.

بنابراین، منطقی به نظر می آید که محاسبات انجام شده تا حد زیادی برای شبیه سازی نفوذ باریکه الکترونی با انرژی میانگین در حد ۳/۵ مگا الکترون ولت به درون محیط با دمای ۵ keV قابل قبول باشد. از دیگر مواردی که نشان می دهد می توان نتایج محاسبات مونت کارلو را بدون لحاظ کردن اثرات حاصل از یونش محیط به حد کافی پذیرفت، سازگاری محاسبات شبیه سازی ها با محاسبات نظری انجام گرفته در مقالات ارائه شده است، که البته با اندکی خطای محاسباتی همراه است. نتایج دقیقتر نیازمند انجام محاسبات به کمک کد محاسباتی ذره در سلول است. هدف از این مقاله، نشان دادن کمینه ای برای روند نفوذ و تخلیه انرژی الکترون های داغ درون سوخت چگال می باشد.

لذا محاسبات شبیه سازی انجام گرفته توسط کد محاسباتی MCNPX برای ۵ جرم سوخت و به عبارتی ۵ چگالی سوخت نشان می دهند که کسر انرژی جذب شده درون هسته سوخت (شامل سوخت سرد و لکه داغ مرکزی) برای سه طیف انرژی الکترون های تک انرژی، طیف انرژی نمایی و الکترون های دو دمایی متفاوت است است. در شبیه سازی انجام شده شعاع باریکه الکترون ها بر روی سوخت برای هر ۵ چگالی

سوخت مقداری ثابت و برابر ۲۵ میکرون، انرژی اولیه الکترون ها ثابت و برابر $۳/۵\,MeV$ برای الکترون های تک انرژی و طیف نمایی و همچنین شدت باریکه محرک افروزنده سریع $I_{if} = ۱۰^{۲۱}\ W.cm^{-۲}$ در نظر گرفته شده است. نمودار های شبیه سازی درشکل (۵) به صورت میانگین انرژی جذب شده درون هسته سوخت برای ۵ چگالی متفاوت سوخت ترسیم شده است. نمودارشبیه سازی نشان می دهد که الکترون ها با طیف انرژی دو دمایی انرژی بیشتری را درون سوخت تخلیه می کنند.



شکل (۵): الف) میانگین انرژی جذب شده درون هسته سوخت بر حسب ۵ مقدار چگالی سوخت و سه طیف انرژی متفاوت تک انرژی، نمایی و دو دمایی، ب) میانگین انرژی جذب شده درون هسته سوخت برای طیف انرژی دو دمایی الکترون ها. افزایش جذب انرژی با افزایش چگالی سوخت مشهود است.

نتایج :

پراکندگی الکترون های داغ از مرتبه انرژی چند مگا الکترون ولت به درون سوخت سرد در محدوده دمایی $۰/۵ \le T_i \le ۵\ keV$ برای یون، بررسی و در شکل 2 ترسیم شده است. در بررسی تفرق و پراکندگی الکترون ها از مسیر شان برای ۵ جرم سوخت متفاوت و در دو طول موج $\lambda_{if} \approx ۰/۵۳\ \mu m$ و $\lambda_{if} \approx ۰/۳۵\ \mu m$ در شکل۳ نشان می دهند که با کاهش طول موج محرک افروزنده سریع از اثر شاخه شاخه شدن مسیر الکترون ها کاسته شده و با افزایش جرم سوخت از ۰/۲۶۱ تا ٤/۱۹ میلی گرم، پراکندگی شا خه ای الکترون ها افزایش می یابد به طوریکه همزمان با افزایش جرم با افزایش طول موج افروزنده سریع برای جرم سوخت بزرگتر از $۲\ mg$ مشاهده می شود که پراکندگی الکترون به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد و به دنبال آن از رسیدن موثر الکترون ها به سطح سوخت و به دنبال آن انتقال انرژی به درون سوخت کاسته می شود. همچنین، برای مطالعه دقیق تر با استفاده از نمونه گیری تصادفی مونت کارلو با کد شبیه سازیMCNPX نفوذ و تخلیه انرژی الکترون ها با در نظر گرفتن سه طیف انرژی، الکترون های تک

انرژی، الکترون ها با طیف انرژی نمایی و توزیع دو دمایی الکترون ها به درون سوخت مورد بررسی قرار گرفته است که افزایش نسبی تخلیه انرژی الکترون های دو دمایی را نشان می دهد. در جهت کاهش واگرایی الکترون ها راهکار های مختلفی ارائه شده است، در جدید ترین پژوهش به عمل آمده در این زمینه در مدل افروزش صرفا" سریع از دو طول موج افروزنده سریع استفاده شده است که تحقیقات نشان می دهند که باریکه افروزنده سریع با طول موج کوتاهتر به علت حادث شدن ناپایداری وایبل الکترون هایی را به وجود می آورد که از مسیرشان به سوی سطح سوخت واگرا شده به طوریکه نمی توانند انرژی را به نحو موثری به سطح سوخت تحویل می دهند. در حالی که الکترون های مگا الکترون ولتی به وجود آمده توسط باریکه افروزنده سریع با طول موج بزرگتر واگرایی کمتری را از خود نشان می دهند [8]. بنابراین می توان گفت در مدل افروزش صرفا" سریع با در نظر گرفتن الکترون ها با طیف انرژی دو دمایی به وجود آمده از باریکه افروزنده سریع با طول موج های نسبتا" بلند می توان به نحو موثری از واگرایی الکترون ها جلوگیری کرد و گداخت بهینه تری خواهیم داشت.

مراجع :

[۱] S.A. Ghasemi, A.H. Farahbod, S. Sobhanian," Analytical model for fast-shock ignition", AIP Adv.**۴**,۰۷۷۱۳۰ (۲۰۱۴).

[2] 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).

[3] A.H. Farahbod, S.A. Ghasemi, " Fast-Shock Ignition: A new concept to Inertial confinement fusion", Iranian J. Phys. Res.**12**,4 (2013).

[4] S.A. Ghasemi, A.H. Farahbod,' The Role of fast ignitor in fast-shock ignition concept", Iranian J. Phys. Res.**13**,4 (2013).

[5] S.A. Ghasemi, A.H. Farahbod, "Fast-Shock Ignition: A New Concept to Inertial Confinement Fusion", Bull. Am. Phys. Soc.**58**, 308 (2013).

[6] S.A. Ghasemi, A.H. Farahbod, "Electron Energy Deposition in Fast-Shock Ignition", Bull. Am. Phys. Soc.**59**, 1 (2014).

[۷] C. K. Li, R. D. Petrasso, "Stopping of directed energetic electrons in high-temperature hydrogenic plasmas", Phys. Review E 70, **067401 (2004).**

[8]. Boyuan Li, Chao Tian, Zhimeng Zhang, Feng Zhang, Lianqiang Shan, Bo Zhang, Weimin Zhou, Baohan Zhang and Yuqiu Gu, "Effect of laser wavelength and intensity on the divergence of hot electrons in fast ignition", Phys. Plasmas 23, **093121 (2016).**