

مطالعه پارامتریک انرژی جنبشی الکترون‌ها در برهم‌کنش دو باریکه نسبیتی با پلاسما

کم‌چگال

INC29-1359

مطهره لواسانی^{۱*}، سید ابوالفضل قاسمی^{۲**}، مسعود پیشدست^۲، فاطمه رضائی^۱، جمال الدین یزدان پناه^۲
دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، گروه حالت اتمی و مولکولی، صندوق پستی: ۱۹۶۹۷۶۴۴۹۹، تهران، ایران
پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، دو باریکه پرشدت نسبیتی بر پلاسما کم‌چگال اعمال شده‌اند و تاثیر فاصله دو باریکه از هم و نیز زاویه این دو باریکه نسبت به یکدیگر بر شتاب‌دهی الکترون‌ها بررسی شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد ذره در سلول دو بعدی SMILEI انجام شده است که نتایج نشان می‌دهند در انرژی الکترومغناطیسی بهنجار شده با افزایش فاصله، افت چگالی انرژی دیده می‌شود در حالی که با تغییر زاویه تفاوت چندانی در این انرژی دیده نمی‌شود. در انرژی جنبشی با افزایش فاصله شاهد افت انرژی هستیم به طوری که برای کمترین فاصله بیشترین مقدار انرژی را مشاهده می‌کنیم (به ازای $\theta = 0$ و $d = 0 - 2.5 \mu\text{m}$ بیشترین انرژی) در حالی که در زاویه‌های مختلف برای $d = 12.5 \mu\text{m}$ ، زاویه $\theta = 2 - 4$ بیشترین مقدار انرژی جنبشی را داراست، با افزایش زاویه بین دو باریکه، تحولات زمانی بیناب انرژی الکترون‌های پلاسما برحسب انرژی جنبشی، در زمان‌های مختلف به دلیل کوچک بودن زاویه‌ها، تفاوت چندانی در بیناب‌ها مشاهده نمی‌شود.

کلید واژه‌ها: کد ذره در سلول دو بعدی SMILEI، شتاب‌دهی الکترون، بیناب انرژی الکترون‌های پلاسما

Parametric study of electron heating in the interaction of two relativistic beams with underdense plasma

M. Lavasani^{1*}, S. A. Ghasemi^{2**}, M. Pishdast², F. Rezaei¹, J. YazdanPanah²

1. Khajeh Nasir al-Din Tosi University, Faculty of Physics, Department of Atomic and Molecular State, P.O.BOX: 1969764499, Tehran, Iran, *Email: Lavasani@email.kntu.ac.ir
2. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.BOX: 14395-836, Tehran, Iran, **Email: abo.ghasemi@gmail.com

Abstract

In this article, two high-intensity relativistic beams have been applied to underdense plasma, and the effect of the distance between the two beams and the angle of these two beams relative to each other on the acceleration of electrons has been investigated. The simulations have been done using the particle code in the two-dimensional cell, and the results show that in the normalized electromagnetic energy, the energy density decreases with the increase of the distance, while there is not much difference in this energy with the change of the angle. In kinetic energy, with increasing distance, we see a decrease in energy, so that for the smallest distance, we see the highest amount of energy (for $\theta = 0$ and $d = 0 - 2.5 \mu\text{m}$ the highest energy), while at different angles, for $d = 12.5 \mu\text{m}$ the angle $\theta = 2 - 4$ has the highest amount of kinetic energy. With the increase of the angle between the two beams, the temporal changes of the energy spectrum of plasma electrons in terms of kinetic energy, at different times due to the smallness of the angles, not much difference is observed in the spectra.

Keywords: SMILI PIC code, Electron acceleration, Energy spectrum of plasma electrons

۱. مقدمه

به طور کلی، زمانی که یک لیزر پر شدت با پلاسماهای کم‌چگال برهم‌کنش می‌کند، فرآیندهای غیرخطی مختلف و پیچیده‌ای به وجود می‌آید که نتیجه آن شتابدهی الکترون‌ها به انرژی‌های بالا و نسبیتی است. این فرآیندهای شتابدهی الکترون بسیار به پارامترهای لیزر و پلاسما وابسته هستند. دو فرآیند شتابدهی رایج وجود دارد، شتابدهی الکترون‌ها به واسطه میدان عقبه (LWFA) [1] و شتابدهی مستقیم لیز (DLA) [2]. که در این راستا، تحقیقاتی در حوزه انتشار چند باریکه لیزر در پلاسماهای کم‌چگال صورت گرفته است. در تحقیقی که در زمینه زاویه بین دو پرتو صورت گرفته و نتایجی که از رژیم (LWFA) بدست آمده، اگر زاویه برخورد بین دو لیزر نسبتاً کوچک باشد، مثلاً $\theta < 10^\circ$ ، دو لیزر می‌توانند به یک لیزر تبدیل شوند و به طور پایدار در پلاسماهای کم‌چگال برای مسافت بیشتری منتشر شوند. در صورتیکه وقتی زاویه برخورد بزرگ باشد، دو لیزر ابتدا به یک لیزر تبدیل شده، ولی پس از یک فاصله انتشار کوتاه، دوباره به دو پرتو جدا می‌شوند. در نتیجه، میدان الکتریکی لیزر در این مورد ضعیف‌تر از زاویه‌های کوچک است. [3, 4, 5].

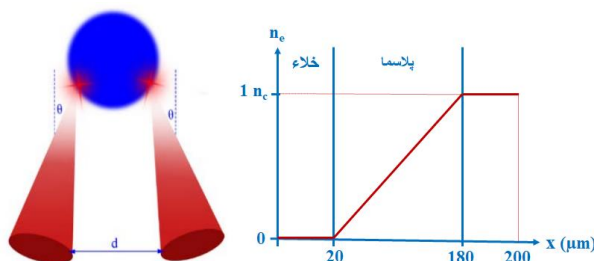
در این پژوهش، با استفاده از کد شبیه‌سازی ذره در سلول SMILEI، فرآیند شتابدهی الکترون‌ها با تغییر فاصله و زاویه دو باریکه لیزر فرودی بر پلاسماهای کم‌چگال مطالعه و بررسی شده است [6].

۲. مشخصه‌های شبیه‌سازی

ابعاد جعبه شبیه‌سازی در راستای محور $x-y$ ، $200 \times 80 \mu m$ با تعداد ۴۰۰۰ سلول در راستای محور x و ۱۶۰۰ سلول در راستای محور y در نظر گرفته شده است. زمان شبیه‌سازی $215 \times t_e$ می‌باشد. برای هر سلول، تعداد ۸ ذره الکترون و ۸ ذره یون تعریف شده و پلاسما سرد در نظر گرفته شده است به این معنی که دمای اولیه الکترون‌ها و یون‌ها صفر می‌باشد.

دو پرتو لیزر فرودی با قطبش خطی و پروفایل زمانی گوسین $FWHM = 10 \times t_e$ و $t_e = l_e = 2\pi$ که l_e طول بهنجارش و دامنه بهنجارش عرضی $a_1 = a_2 = 10$ هستند و دو باریکه از سمت چپ وارد پلاسما می‌شوند. در این شبیه‌سازی لیزرها $20 \mu m$ اول مسیر را در خلاء و تا زمانی که به چگالی $n_e = n_{CR}$ برسند به میزان $160 \mu m$ راه می‌پیمایند، سپس، $20 \mu m$ نهایی را با همین چگالی ثابت تا انتهای مسیر طی می‌کنند، شکل (1). چگالی بحرانی در این شبیه‌سازی

به صورت $n_{CR} = \gamma n_c = \sqrt{1 + \frac{a_{1,2}^2}{2}} n_c \approx 7 / 86 \times 10^{21} cm^{-3}$ تعریف می‌شود که در آن فاکتور متوسط نسبیتی لورنتس می‌باشد.



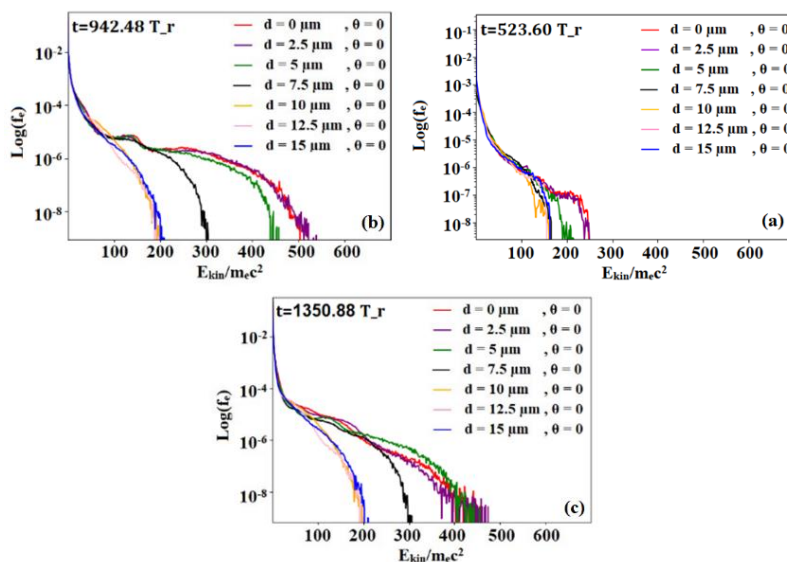
شکل ۲۱ شماتیک برهم‌کنش دو باریکه که پس از طی ۲۰ میکرون در خلأ با رمپ چگالی وارد پلاسما می‌شوند

۳. نتایج و بحث

در این شبیه‌سازی، مطالعه پارامتریک تاثیر فاصله نسبی دو باریکه لیزر از هم d و زاویه بین دو باریکه θ بر روی شتابدهی الکترون‌ها انجام شده است و زمان شکل‌ها براساس کمیت $T_r = \frac{1}{\omega_r} = \frac{\lambda}{2\pi c}$ بیان شده است که ω_r فرکانس مرجع و

λ طول موج و c سرعت نور می‌باشد. شکل ۲ بیناب انرژی الکترون‌های پلاسما را در سه زمان مختلف برهم‌کنش، $t = 502/65 T_r$ تا $t = 1350/88 T_r$ به ازای فاصله‌های مختلف $d = 0, 2/5, 5, 7/5, 10, 12/5, 15 \mu m$ با زاویه $\theta = 0$ نشان می‌دهد. تابع توزیع، به ازای پارامتر فاصله $d = 0$ به وضوح الگوی دو دمایی (قابل برازش با دو خط راست) را از خود نمایش می‌دهد.

در بقیه موارد به خصوص در فاصله‌های بیشتر، الگوی سه دمایی به نمایش گذاشته می‌شود، در حالی که در پارامترهای $d > 0$ و به خصوص در مقادیر بزرگتر این پارامتر، الگوی سه دمایی (قابل برازش با سه خط راست) را به نمایش می‌گذارد. قسمت‌های دمایی پایین (شیب مماس کم‌تر) که در حالت $d = 0$ در ابتدای بیناب، و در حالت $d > 0$ در دو بخش ابتدا و انتهای بیناب مشاهده می‌شود، شامل الکترون‌هایی است که عمدتاً خارج از ناحیه برهم‌کنش (درون ناحیه برهم‌کنش ضعیف) شامل بخش‌های جلویی و یا کناره‌های تپ‌های لیزر قرار می‌گیرند. تغییر الگو از دو دمایی به سه دمایی در فاصله‌های بیشتر به دلیل ایجاد بخش بدون برهم‌کنش بین تپ‌ها است. از آنجا که در $d = 0$ بهترین برهم‌نهی سازنده بین تپ‌ها ایجاد می‌شود، به صورت طبیعی، الکترون‌های داغ (بخش دوم تابع توزیع) بیش‌ترین دما را خواهند داشت. از طرفی دیگر، با افزایش فاصله، برهم‌نهی سازنده کاهش می‌یابد (و نیز دامنه کل میدان‌های لیزر کاهش می‌یابد) و به تبع آن دمای الکترون‌های داغ پایین می‌آید. علاوه بر این، به دلیل گسترش ناحیه برهم‌کنش ضعیف، بخش ابتدایی تابع توزیع که شامل الکترون‌هایی با دمای پایین‌تر است، اندکی پر جمعیت‌تر می‌شود. در $d = 0$ بعد از زمان $t = 1350/88 T_r$ بیشینه انرژی جنبشی الکترون‌ها به $E_{kin} = 456 m_e c^2$ می‌رسد و در $d = 15$ همین زمان مقدار انرژی بیشینه تا مقدار $E_{kin} = 211 m_e c^2$ کاهش می‌یابد. ولی در کل زمان سپری شده، بیشترین انرژی الکترون‌ها برای $d = 0$ مقدار $E_{kin} = 556 m_e c^2$ دارد و برای $d = 15$ مقدار $E_{kin} = 265 m_e c^2$ می‌باشد.



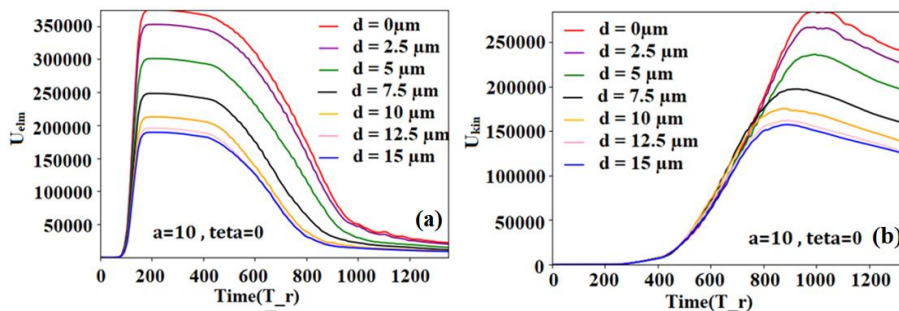
شکل ۲ بیناب انرژی الکترون‌های پلاسما برحسب انرژی جنبشی پهنجار آنها در زمان‌های مختلف به ازای فاصله‌های مختلف

شکل ۳(b) تحولات انرژی الکترومغناطیسی پهنجار شده موجود در ناحیه شبیه‌سازی را برحسب زمان به ازای فاصله‌های مختلف دو باریکه $d = 0, 2/5, 5, 7/5, 10, 12/5, 15 \mu m$ با زاویه $\theta = 0$ و $a = 10$ نشان می‌دهد. ابتدا با تابش لیزرها انرژی الکترومغناطیسی به درون ناحیه، از طریق مرز آن وارد می‌شود و به ازای هر آزمایش تا مقدار بیشینه خود (ورود کامل تپ) افزایش می‌یابد. سپس، با شروع برهم‌کنش، انرژی لیزر به مرور زمان درون پلاسما جذب می‌شود و

افت می‌کند. به دلیل برهم‌نهی موجی تپ‌ها، تفاوت در سطح بیشینه انرژی الکترومغناطیسی در فواصل مختلف کاملاً بدیهی است. در شکل ۳(b) یکی از علت‌های مهم این که بیشینه انرژی جنبشی الکترون‌ها در حالت $d=0, \theta=0$ حاصل می‌شود، می‌تواند ناشی از جذب انرژی لیزر درون پلاسما باشد. بدین دلیل که، انرژی الکترومغناطیسی لیزر در درون پلاسما بعد از گذشت زمان شبیه‌سازی توسط پلاسما جذب می‌شود و افت می‌کند. چگالی انرژی

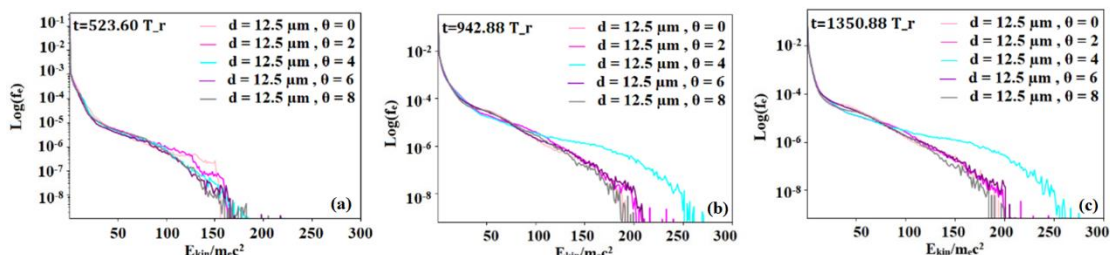
الکترومغناطیسی با $I \approx a^2$ متناسب است. در حالت $d=0, \theta=0$ دو باریکه بر روی هم افتاده و چگالی انرژی بیشترین مقدار خود را دارد $I \approx a^2 = (20)^2 = 400$. در شکل ۳(a)، که با گذشت زمان به دلیل جذب درون پلاسما افت می‌کند، در حالت‌های $d > 0, \theta > 0$ چگالی انرژی از مرتبه ۲ کاهش می‌یابد که در شکل ۳(a)، مشاهده می‌شود (

$$I \approx a_1^2 + a_2^2 = (10)^2 + (10)^2 = 200$$



شکل ۳ (a) تحولات زمانی انرژی الکترومغناطیسی به‌نجار شده، (b) انرژی جنبشی کل الکترون‌ها، به ازای فاصله‌ها مختلف در زاویه صفر

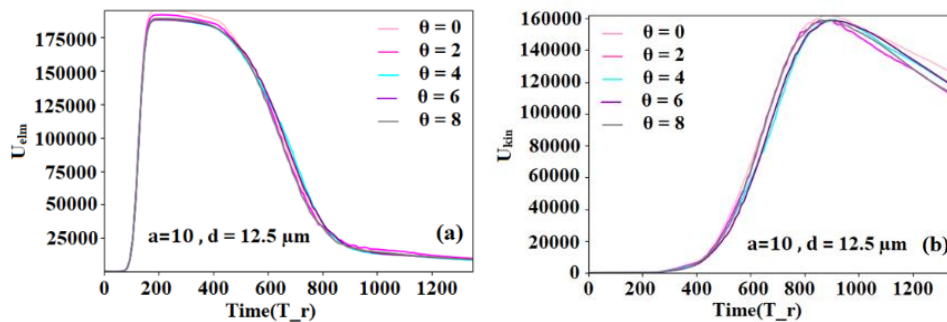
برای مقایسه حالت دیگر تمام این موارد برای دو تپ لیزر با فاصله مشخص، اما با زاویه‌های مختلف بررسی شده است. شکل ۴ تحولات زمانی بیناب انرژی الکترون‌های پلاسما را برحسب انرژی جنبشی به‌نجار آنها، به ازای فاصله دو باریکه $d = 12/5 \mu\text{m}$ و زوایای $\theta = 0, 2, 4, 6, 8$ و زمان‌های مختلف از آغاز برهم‌کنش، بین $t = 502/68T - r$ تا $t = 1350/88T - r$ نشان می‌دهد. به دلیل کوچک بودن زوایای مورد بحث، تفاوت بیناب‌ها چندان بزرگ نیست. با این حال پدیده‌ای که با اندکی دقت قابل مشاهده است، جابجایی توالی بیناب‌ها از لحاظ ترتیب بزرگی دمای الکترونی در طول زمان است. برای مثال، در زمان $t = 942/48T - r$ ، پایین‌ترین بیناب مربوط به بیش‌ترین زاویه می‌باشد و بالاترین بیناب مربوط به زاویه $\theta = 4$ است. علت این پدیده این است که زاویه‌های بزرگتر، در ابتدای برهم‌کنش، قطبیدگی میدان‌ها نسبت به هم زاویه 2θ را تشکیل می‌دهد و دامنه برآیند میدان‌ها با افزایش این زاویه کاهش می‌یابد. بنابراین، انتظار می‌رود در زمان‌های اولیه، شدت برهم‌کنش با افزایش زاویه کاهش یابد. با این حال، هرچه زاویه بزرگ‌تر باشد تپ‌ها با سرعت بیشتری به همدیگر نزدیک می‌شوند که این رفتار می‌تواند اثر منفی افزایش زاویه را جبران کند و منجر به الکترون‌های پرانرژی‌تر شود، پدیده‌ای که در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۴ بیناب انرژی الکترون‌های پلاسما برحسب انرژی جنبشی به‌نجار آنها در زمان‌های مختلف به ازای زاویه‌های مختلف

شکل ۵ تحولات زمانی انرژی الکترومغناطیسی کل و انرژی جنبشی کل الکترون‌ها را به ازای فاصله ثابت $d = 12.5 / 5 \mu\text{m}$ و زوایای $\theta = 0, 2, 4, 6, 8$ نشان می‌دهد. در زاویه $\theta = 0$ آهنگ فرسایش تب (شکل ۵(a)) و افزایش انرژی جنبشی الکترون‌ها (شکل ۵(b)) مقدار بیشتری از زوایای غیر صفر دارد که این امر می‌تواند به دلیل برانگیزش امواج قوی‌تر پلاسمایی باشد.

شکل ۵(b) انرژی جنبشی الکترون‌ها را در طول زمان نشان می‌دهد. همچنین، تغییرات چگالی در شکل ۵(b) همانند شکل ۵(a) است و به دلیل کوچک بودن زوایای مورد بحث تفاوت بیناب‌ها چندان بزرگ نیست. با این حال پدیده‌ای که با اندکی دقت قابل مشاهده است این است که جابجایی توالی بیناب‌ها از نظر دمای الکترونی در طول زمان است. برای مثال، در شکل ۵(a) پایین‌ترین بیناب مربوط به بیشترین زاویه و بالاترین بیناب مربوط به کم‌ترین زاویه می‌باشد.



شکل ۵ (a) تحولات زمانی انرژی الکترومغناطیسی بهنجار، (b) انرژی جنبشی کل، به ازای زوایه‌های مختلف

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله پژوهشی، تاثیر پارامتر فاصله دو پرتو لیزر d و زاویه بین دو پرتو θ بر شتاب‌دهی الکترون‌ها در برهم‌کنش دو باریکه لیزر با پلاسمای کم‌چگال با استفاده از شبیه‌سازی ذره در سلول دو بعدی *SMILEI* بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهند که بیناب انرژی الکترون‌های پلاسمای برحسب انرژی جنبشی بهنجار شده آنها به ازای $\theta = 0$ در حالت $d = 0$ بعد از زمان $t = 1350 / \omega T - r$ بیشینه انرژی جنبشی الکترون‌ها به $E_{kin} = 456 m_e c^2$ می‌رسد و در $15 \mu\text{m}$ در همین زمان مقدار انرژی بیشینه تا مقدار $E_{kin} = 211 m_e c^2$ کاهش می‌یابد ولی در کل زمان سپری شده بیشترین انرژی الکترون‌ها برای $d = 0$ مقدار $E_{kin} = 556 m_e c^2$ ، و برای $d = 15 \mu\text{m}$ مقدار $E_{kin} = 260 m_e c^2$ می‌باشد.

همچنین، در زاویه $\theta > 0$ ، در ابتدای برهم‌کنش، قطبیدگی میدان‌ها نسبت به هم زاویه 2θ را تشکیل می‌دهند و دامنه برآیند میدان‌ها با افزایش این زاویه کاهش می‌یابد. بنابراین، انتظار می‌رود در زمان‌های اولیه، شدت برهم‌کنش با افزایش زاویه کاهش یابد. با این حال، هرچه زاویه بزرگتر باشد، تب‌ها با سرعت بیشتری به هم نزدیک می‌شوند که این رفتار می‌تواند اثر منفی افزایش زاویه را جبران کرده و منجر به ایجاد الکترون‌های پر انرژی‌تری نسبت به زمان اولیه شود. به طور کلی، از لحاظ جذب انرژی الکترومغناطیسی درون لیزر می‌توان گفت که در حالت‌های $d > 0$ و $\theta > 0$ ، چگالی انرژی تقریباً از مرتبه ۲ کاهش می‌یابد که این موضوع منجر به ایجاد الکترون‌هایی با انرژی جنبشی کم‌تری نسبت به حالت $d = 0$ و $\theta = 0$ می‌شود. نتیجه این که با افزایش فاصله انرژی کاهش می‌یابد. در انرژی الکترومغناطیسی بهنجار شده نیز با افزایش فاصله شاهد افت چگالی انرژی خواهیم بود. در حالت دوم، با افزایش زاویه بین دو باریکه ($\theta = 0, 2, 4, 6, 8$)، تحولات زمانی بیناب انرژی الکترون‌های پلاسمای برحسب انرژی جنبشی، با افزایش زاویه، در زمان‌های مختلف به دلیل

کوچک بودن زاویه‌ها، تفاوت چندانی در بیناب‌ها مشاهده نشده است و اندک تفاوتی که قابل رویت باشد به علت جابجایی متوالی بیناب‌ها از لحاظ ترتیب بزرگی دمای الکترونی در طول زمان بوده است.

۵. مراجع

- [1] ALBERT, F., COUPRIE, M. E., DEBUS, A., DOWNER, M. C., FAURE, J., FLACCO, A., GIZZI, L. A., GRISMAYER, T., HUEBL, A., JOSHI, C., LABAT, M., LEEMANS, W. P., MAIER, A. R., MANGLES, S. P. D., MASON, P., MATHIEU, F., MUGGLI, P., NISHIUCHI, M., OSTERHOFF, J., ... ZEIL, K. (2021). 2020 ROADMAP ON PLASMA ACCELERATORS. NEW JOURNAL OF PHYSICS, 23(3).
- [۲] A. PUKHOV, Z. M. SHENG, AND J. MEYER-TER-VEHN, PHYS. PLASMAS 6, 2847 (1999).
- [۳] L. YANG, Z. G. DENG, C. T. ZHOU, M. Y. YU, AND X. G. WANG, PHYS. PLASMAS 20, 033102 (2013).
- [۴] E. WALLIN, A. GONOSKOV, AND M. MARKLUND, PHYS. PLASMAS 24, 093101 (2017).
- [۵] T. W. HUANG, C. T. ZHOU, "ELECTRON ACCELERATION INDUCED BY INTERACTION OF TWO RELATIVISTIC LASER PULSES IN UNDERDENSE PLASMAS," PHYSICAL REVIEW E 98, 053207 (2018).
- [6] <https://smileipic.github.io/Smilei/index.html>