



بررسی تابندگی و شتاب باریکه الکترون در برهم‌کنش باریکه پروتون پرنرژی با پلاسما

آمنه کارگریان*

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران- ایران

*Email: akargarian@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۶/۱۸

چکیده

یک رویکرد جدید در شتاب‌دهنده‌های پلاسمایی استفاده از باریکه پروتونی پرنرژی به‌عنوان محرک برای تولید موج پلاسمایی است. در این رویکرد، انرژی باریکه پروتون از طریق موج پلاسمایی تشکیل‌شده به باریکه الکترونی شاهد برای دستیابی به انرژی‌های بالا انتقال می‌یابد. در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی ذره‌ای دو بعدی، برهم‌کنش یک باریکه پروتونی پرنرژی با تابع توزیع گاوسی با پلاسمای دارای چگالی خطی با شیب چگالی ۰.۰۳٪ در امتداد انتشار باریکه، به‌منظور تولید باریکه الکترونی پرنرژی با کیفیت بالا مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی شتاب الکترون باریکه الکترونی شاهد با انرژی ۱۸ MeV در پشت باریکه پروتونی به داخل پلاسما فرستاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، در اثر برهم‌کنش باریکه پروتونی پرنرژی با پلاسما در سامانه مورد مطالعه، میدان موج پلاسمایی قوی با دامنه ۴۰۰ MeV/m در پلاسما ایجاد شده و می‌تواند الکترون‌های باریکه شاهد که در این میدان به‌دام می‌افتند را تا گرادیان‌های انرژی بالا از مرتبه چند صد مگا الکترون‌ولت شتاب دهد. علاوه بر این، بررسی تحول تابندگی باریکه به‌عنوان یک پارامتر مهم در بررسی کیفیت باریکه شتاب‌دار شده، نشان می‌دهد با در نظر گرفتن پارامترهای مناسب برای پلاسما، باریکه‌های پروتونی و الکترونی، تابندگی باریکه الکترونی شاهد کمتر از ۵۰٪ نسبت به مقدار اولیه خود رشد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: تابندگی باریکه، باریکه پروتونی محرک، شتاب باریکه الکترون شاهد

Investigation of electron beam emittance and acceleration in interaction of an energetic proton beam with plasma

A. Kargarian*

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 14399-51113, Tehran - Iran

Research Article

Received 17.4.2023, Accepted 9.9.2023

Abstract

Plasma accelerators are using high-energy proton beams as driven beams to produce plasma waves. In this approach, the proton beam energy is transferred through the formed plasma wave to the witness electron beam for achieving high energies. In this paper, using two-dimensional particle simulation, the interaction of a Gaussian high-energy ion beam with plasma containing linear density with a density gradient of 0.03% along the beam propagation direction has been investigated in order to produce a high energy electron beam with excellent quality. To investigate electron acceleration, an 18 MeV witness electron beam is sent to the plasma at the back of the ion beam. The simulation results show that, due to the interaction of the energetic proton beam with plasma, the strong plasma wave field with amplitude 400 MeV/m is created. This field accelerates the trapped electrons of witness beam to high energy gradients of several hundred MeV. Moreover, the evolution of the electron beam emittance as an important parameter in the investigation of the accelerated beam quality, indicates that by considering the appropriate parameters for the plasma, proton and electron beams, the emittance of the witness electron beam grows less than 50% compared to its initial value.

Keywords: Beam emittance, Driven proton beam, Witness electron beam acceleration



۱. مقدمه

شتاب‌دهنده‌های ذرات ابزارهای تحقیقاتی بنیادی در حوزه فیزیک انرژی بالا برای مطالعه قوانین اساسی حاکم بر جهان ما هستند. طرح‌های شتاب‌دهنده TeV^1 آینده بر اساس برخورددهنده‌های خطی^۲ است. با این حال، با افزایش انرژی باریکه، ابعاد و هزینه شتاب‌دهنده‌ها بسیار افزایش می‌یابد. برای یک شتاب‌دهنده خطی، اندازه و هزینه به حداکثر گرادیان شتاب‌دهنده در کاواک‌های RF^۳ بستگی دارد. برای رسیدن به مقیاس TeV در یک شتاب‌دهنده خطی، طول ماشین ده‌ها کیلومتر است. بنابراین چالش اساسی این است که چگونه ماشین‌های آینده را فشرده‌تر کنیم. شتاب‌دهنده پلاسمایی به‌عنوان یک فن‌آوری فشرده جدید برای شتاب ذرات به انرژی‌هایی با گرادیان بالا راه‌حلی برای این مشکل است [۱].

پلاسمای می‌تواند میدان‌های الکتریکی بسیار بزرگی از مرتبه GV/m را تولید کند [۲]. در چند دهه اخیر، با استفاده از پلاسمای امکان دستیابی به بیش از سه مرتبه گرادیان شتاب بالاتر از کاواک‌های RF نشان داده شده است [۳، ۴]. به طور کلی، پلاسمای به‌عنوان یک انتقال‌دهنده انرژی عمل می‌کند که انرژی را از باریکه محرک^۴ (پالس لیزر یا باریکه ذرات) به باریکه شاهد^۵ منتقل می‌کند.

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که باریکه‌های پروتونی پرنرژژی امیدوارکننده‌ترین محرک‌های میدان پلاسمایی برای شتاب‌دادن یک مرحله‌ای الکترون‌ها در مقیاس انرژی TeV هستند [۵، ۶]. باریکه ذرات پروتونی پرنرژژی در پلاسمای منتشر شده و یک موج پلاسمایی قوی ایجاد می‌کند و در این فرایند انتقال انرژی باریکه به پلاسمای از طریق موج پلاسمایی انجام می‌شود. بخش مهمی از این انرژی را می‌توان برای شتاب‌دادن یک باریکه الکترونی به‌عنوان باریکه شاهد که دارای انرژی بسیار کم‌تری نسبت به باریکه پروتونی است و بر روی موج پلاسمایی سوار می‌شود، استفاده کرد و به این ترتیب به باریکه‌های الکترونی با انرژی بالا دست یافت [۷]. به طور کلی، روش شتاب ذرات در پلاسمای برای محرک‌های لیزری به‌عنوان LWFA^۸ شناخته شده و برای باریکه‌های ذرات، PWF^۹ نامیده می‌شود. برای هر دو روش، مقدار انرژی مؤثر برای شتاب‌دادن، توسط انرژی باریکه محرک و بهره انتقال انرژی از باریکه محرک به باریکه الکترونی تعیین می‌شود. برای ایجاد مؤثر موج پلاسمایی توسط باریکه ذرات، طول باریکه محرک ∂_z باید به‌گونه‌ای باشد که است [۱۹-۲۰].

1. Teraelectron Volt
2. Linear Collider
3. RF Cavities
4. Driven Beam
5. Witness Beam
6. Laser Wakefield Acceleration
7. Plasma Wakefield Acceleration

8. Super Proton Synchrotron
9. The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment
10. Rubidium
11. Modulation
12. Microbunches

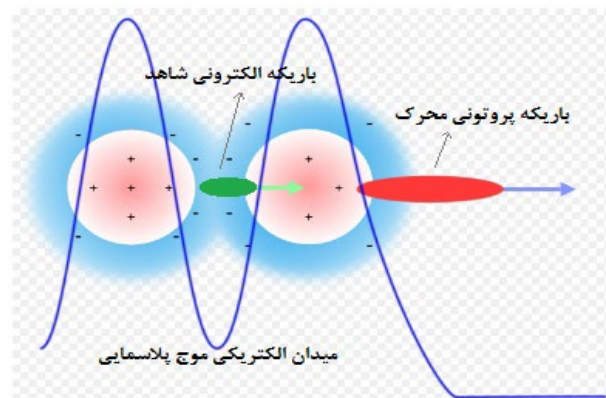


باریکه پروتونی و پایداری میدان برانگیخته‌شده افزایش می‌یابد. در مقاله حاضر شیب مناسب با استفاده از آزمون‌های شبیه‌سازی با هدف حفظ کیفیت باریکه الکترونی تعیین شده است. اندازه عرضی و طولی میکروخوشه‌های یونی نیز به دلیل تشکیل هرچه مؤثرتر نواحی متمرکزکننده و شتاب‌دهنده^۱ موج پلاسمایی، از مرتبه‌ی طول موج پلازما در نظر گرفته شده‌اند [۵، ۱۴، ۲۲]. فاصله باریکه الکترونی که در پشت باریکه پروتونی به داخل پلازما فرستاده می‌شود به اندازه یک طول موج پلازما است تا بتواند در نواحی شتاب موج پلاسمایی ناشی از باریکه پروتونی قرار گرفته و از موج انرژی بگیرد [۱۴، ۲۲]. از آن جایی که حفظ کیفیت باریکه شتاب‌گرفته از مهم‌ترین چالش‌ها در فرایند شتاب ذرات در شتاب‌دهنده‌های پلاسمایی است، در این مقاله، کیفیت باریکه الکترونی شتاب‌گرفته نیز با بررسی تغییرات زمانی تابندگی^۲ باریکه الکترونی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در مقاله حاضر، با در نظر گرفتن پارامترهای مناسب که از طریق آزمون‌های شبیه‌سازی حاصل شده‌اند، باریکه الکترونی شاهد در میدان موج پلاسمایی برانگیخته‌شده در اثر برهم‌کنش باریکه پروتونی پرنرژی با پلازما، به انرژی از مرتبه چندصد مگاالکترون‌ولت با حفظ تابندگی خود می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی حاصل نشان می‌دهد، بیشینه میدان شتاب الکترون با پارامترهای در نظر گرفته‌شده، 400 MeV/m است و تابندگی باریکه الکترونی شاهد در این میدان به میزان کم‌تر از ۵۰٪ نسبت به مقدار اولیه خود تغییر می‌کند.

۲. روش شبیه‌سازی ذره‌ای (PIC)

الگوریتم ذره‌ای (PIC) به دلیل استفاده گسترده در زمینه‌های مختلف فیزیک از جمله مطالعه پلاسماهای اخترفیزیکی، پلاسماهای هم‌جوشی، برهم‌کنش‌های پرتو ذرات-پلازما و لیزر-پلازما و شتاب‌دهنده‌ها بسیار مورد توجه است. با این حال، علی‌رغم کاربرد گسترده این روش برای مطالعه پدیده‌های فیزیکی، این روش از نظر محاسباتی بسیار گران می‌باشد که منجر به اعمال محدودیت‌هایی در شبیه‌سازی سامانه‌های فیزیکی می‌شود. این امر به‌ویژه هنگام شبیه‌سازی باریکه‌های شتاب‌یافته و برهم‌کنش باریکه ذرات-پلازما قابل توجه هستند. در روش‌های جدید شبیه‌سازی PIC، هدف کاهش هزینه با حداقل محدودیت‌ها می‌باشد. کد شبیه‌سازی FBPIC [۲۳] که در مقاله حاضر از آن استفاده شده است، یک کد شبیه‌سازی دوبعدی دقیق در مختصات استوانه‌ای است که برای شبیه‌سازی



شکل ۱. طرح کلی تشکیل میدان موج پلاسمایی در اثر انتشار باریکه ذرات پرنرژی در پلازما و شتاب باریکه الکترونی در میدان موج پلاسمایی.

در این مقاله، سامانه برهم‌کنش باریکه پروتونی پرنرژی با پلازما و شتاب‌گرفتن باریکه الکترون با در نظر گرفتن پارامترهای مناسب برای پلازما، باریکه پروتونی و الکترونی جهت دستیابی به انرژی‌هایی نزدیک به چند صد مگاالکترون‌ولت در یک شتاب‌دهنده واقعی، با استفاده از روش شبیه‌سازی دو بعدی، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، مشخصات سامانه و پارامترهای در نظر گرفته‌شده در این مقاله، با بررسی نتایج مطالعات نظری و تجربی که تاکنون در سامانه برهم‌کنش باریکه پروتون با پلازما حاصل شده است، انتخاب شده‌اند. علاوه بر این، با توجه به متفاوت بودن برخی پارامترها از جمله تعداد میکروخوشه‌های پروتونی، طول پلازما و انرژی اولیه‌ی باریکه‌ی الکترونی شاهد، برای انتخاب پارامترها برخی آزمون‌های شبیه‌سازی لازم نیز صورت گرفته است. در این مطالعه، گاز در نظر گرفته شده برای تولید پلازما، گاز روبیدیم است که یکی از گازهایی است که برای تشکیل پلازما در شتاب‌دهنده‌های پلاسمایی پیشرفته از آن استفاده می‌شود [۱۳]. چگالی پلازما از مرتبه 10^{21} m^{-3} در نظر گرفته شده است که با توجه به رابطه‌ی بین چگالی پلازما و بیشینه دامنه میدان موج پلاسمایی $(E = m\omega_p c/e)$ ، حداقل چگالی لازم برای دستیابی به میدان‌هایی از رابطه‌ی گیگا الکترون‌ولت است [۲۱]. هم‌چنین، با توجه به این‌که نتایج مطالعات اخیر [۱۵-۱۶] نشان می‌دهد که برای تشکیل موج پلاسمایی و میدان پایدار متناظر با آن وجود یک شیب در امتداد چگالی پلازما لازم است، در این مقاله، یک شیب ملایم در امتداد نمایه چگالی یکنواخت پلازما در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۵]، یک بازه برای شیب چگالی پلازما $(1.99\% < g < 1.93\%)$ در پروژه AWAKE تعیین شده است. نتایج گزارش شده در این مرجع نشان می‌دهد با افزایش شیب چگالی پلازما، مدوله‌سازی

1. Focusing and Accelerating Regions

2. Emittance



موج پلاسمایی تشکیل می‌شود. شکل ۲، تحول فضا-زمانی موج پلاسمایی برانگیخته‌شده در اثر عبور باریکه پروتون از پلاσμα و تشکیل موج پلاσμα را نشان می‌دهد. باریکه الکترونی شاهد به فاصله یک طول موج پلاσμα از آخرین میکروخوشه پروتونی محرک وارد پلاσμα می‌شود. لکه‌ی قرمز رنگ در شکل ۲ (الف) باریکه الکترونی شاهد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان (شکل‌های ۲، ب تا د) باریکه الکترونی شاهد در میدان الکتریکی موج پلاسمایی به دام می‌افتد و همراه با آن حرکت می‌کند. در طی این فرایند، باریکه الکترون می‌تواند از موج انرژی گرفته و تا انرژی‌های بالا شتاب داده شود.

تحول میدان الکتریکی متناظر با موج پلاسمایی در شکل ۳ نشان داده شده است. با گذشت زمان باریکه الکترونی شاهد در میدان تقویت‌شده موج پلاسمایی به دام می‌افتد. اختلال ایجاد شده در دامنه میدان در انتهای موج پلاسمایی ناشی از میدان باریکه شاهد به دام افتاده در موج پلاسمایی می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دامنه‌ی میدان موج پلاسمایی ایجادشده به حدود 400 MeV/m می‌رسد. باریکه الکترونی شاهد به دام افتاده در این میدان می‌تواند تا انرژی‌های از مرتبه چند صد الکترون‌ولت شتاب داده شود.

شکل ۴، تحول فضای فاز طولی الکترون‌های باریکه شاهد در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل، افزایش اندازه حرکت طولی^۲ الکترون‌های باریکه شاهد با گذشت زمان به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. با تشکیل موج پلاسمایی، باریکه شاهد در میدان الکتریکی طولی متناظر با موج به دام افتاده و در راستای انتشار، از آن انرژی دریافت می‌کند.

۴. تحول زمانی تابندگی باریکه الکترونی شاهد

یکی از ملاک‌های مطلوب بودن نتایج شتاب‌دهی الکترون، حفظ تابندگی ($\mathcal{E}$) باریکه الکترونی شاهد است. تابندگی یک باریکه، معیاری از پراکندگی انرژی و توزیع فضایی ذرات موجود در باریکه است. کوچک‌تر بودن مقدار تابندگی بیان‌کننده‌ی این است که پراکندگی کم‌تر است. هم‌چنین، تابندگی با درخشندگی باریکه به صورت $B = I/\lambda\mathcal{E}$ مرتبط است و با کاهش تابندگی، درخشندگی افزایش می‌یابد. بنابراین، تابندگی در واقع معیاری برای کیفیت باریکه‌ی الکترونی شتاب‌گرفته می‌باشد. در شکل ۵، تحول زمانی توزیع فضایی ذرات باریکه الکترونی شاهد نشان داده شده است.

سامانه‌های دارای تقارن از جمله سامانه برهم‌کنش باریکه ذرات-پلاσμα بسیار مناسب می‌باشد [۲۴]. نسخه اولیه این کد برای برهم‌کنش باریکه ذرات با پلاσμα توسط الکسی پترنکو^۱ نوشته شد [۲۵]. در مقاله حاضر، برای شبیه‌سازی سامانه برهم‌کنش باریکه پروتون با پلاσμα از کد شبیه‌سازی دوبعدی FBPIC ارتقاء یافته استفاده شده است. بدین منظور، دوازده میکروخوشه پروتونی با مشخصات $\partial_r = 0.4/k_p$ ، $\partial_z = 0.4/k_p$ ، $N_p = 213e8$ ، در یک پلاσμα با چگالی $3.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ، طول 25 mm و گردایان چگالی 0.3% منتشر می‌شود. باریکه الکترونی شاهد نیز دارای تابع گاوسی با انرژی 18 MeV و با مشخصات $\partial_r = 10 \mu\text{m}$ و $\partial_z = 60 \mu\text{m}$ در راستای Z و r نیز به ترتیب برابر با 40 mm و 1 mm می‌باشد. لازم به ذکر است در روش شبیه‌سازی ذره‌ای، چگالی ذرات بر روی شبکه به طریق وزن‌دهی محاسبه می‌شود. سپس، میدان الکتریکی با حل معادله پواسون بر روی نقاط شبکه به دست می‌آید. میدان الکتریکی شبکه از طریق درون‌یابی در محل ذرات محاسبه می‌شود. پس از آن مکان و سرعت جدید ذرات با استفاده از معادله نیوتون-لورنتس نسبیتی محاسبه می‌شود. در این روش ذرات مطابق با نیروی لورنتس اعمال شده توسط میدان‌های الکترومغناطیسی که تحول آن‌ها براساس معادلات ماکسول است، حرکت می‌کنند:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B}) \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 4\pi\rho \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} \quad (3)$$

$$-\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

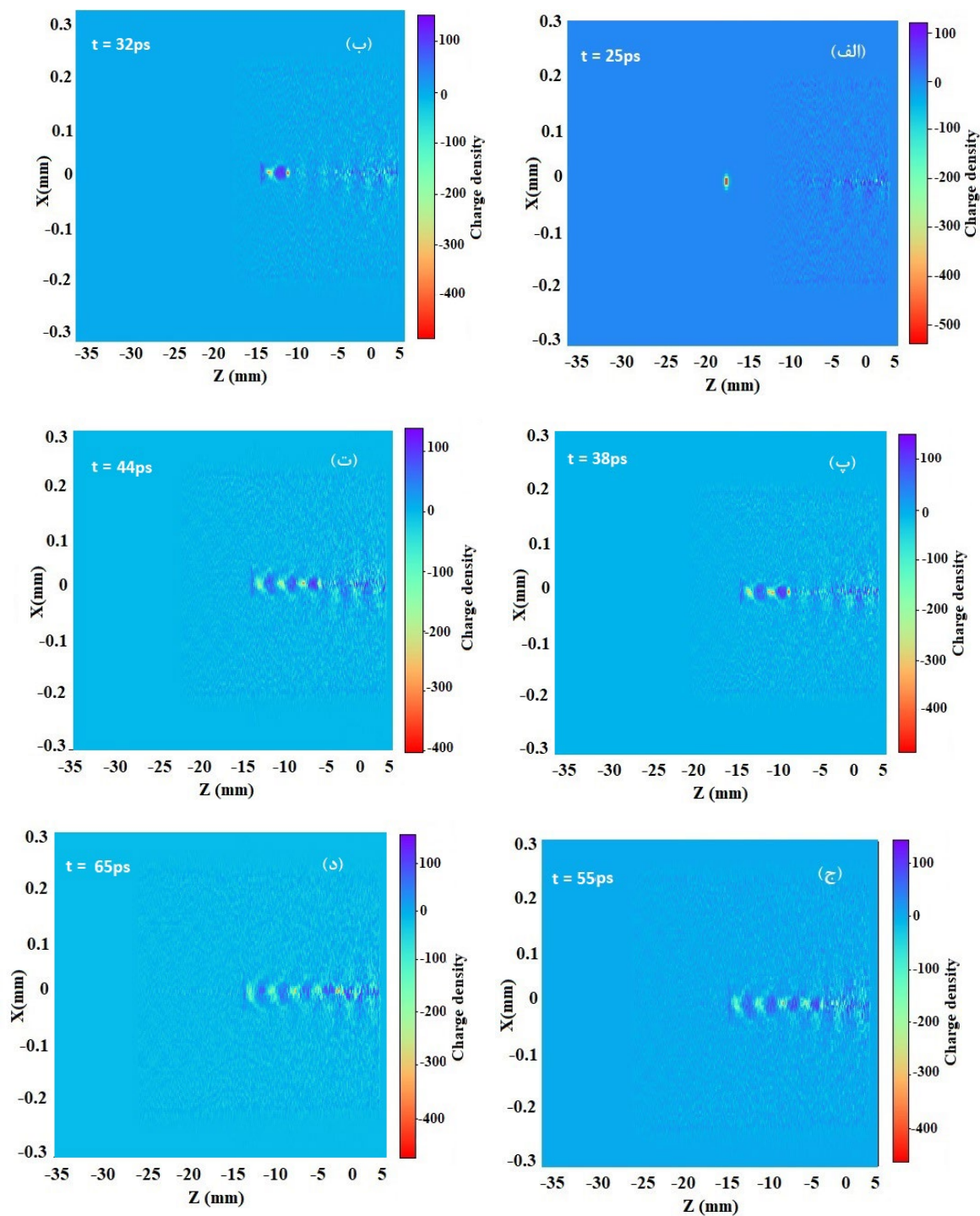
$$\vec{j}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N q_i v_i \delta(\vec{x} - \vec{x}_i) \quad (6)$$

$$\rho(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N q_i \delta(\vec{x} - \vec{x}_i) \quad (7)$$

۳. تشکیل موج پلاσμα و گیراندازی و شتاب باریکه الکترونی در میدان موج پلاسمایی

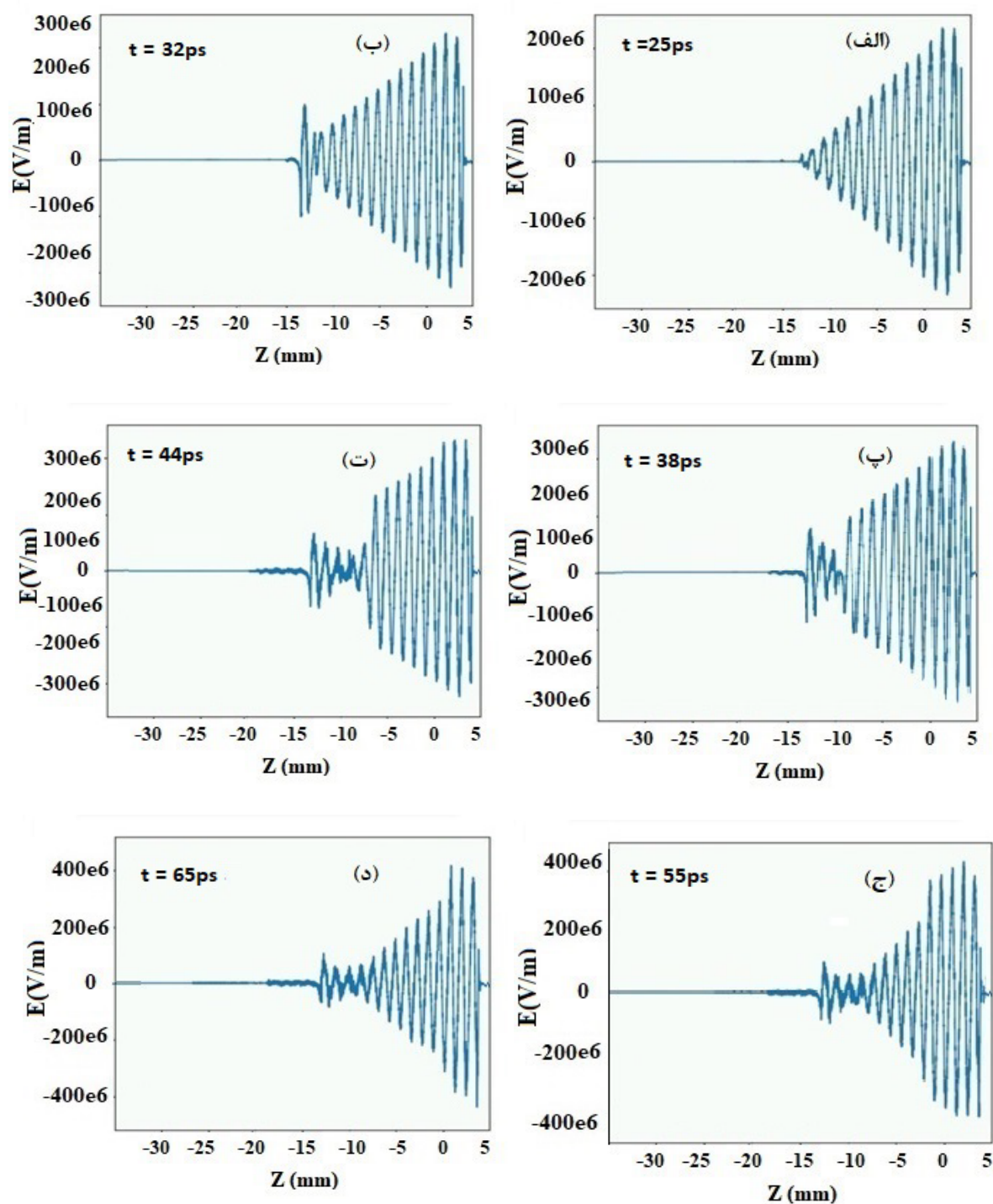
با در نظر گرفتن مشخصات ذکرشده در بخش قبل، باریکه پروتونی پرنرژی به درون پلاسمای رقیق فرستاده می‌شود و با پس‌زدن الکترون‌های پلاσμα و ایجاد اختلال در زمینه‌ی پلاσμα،





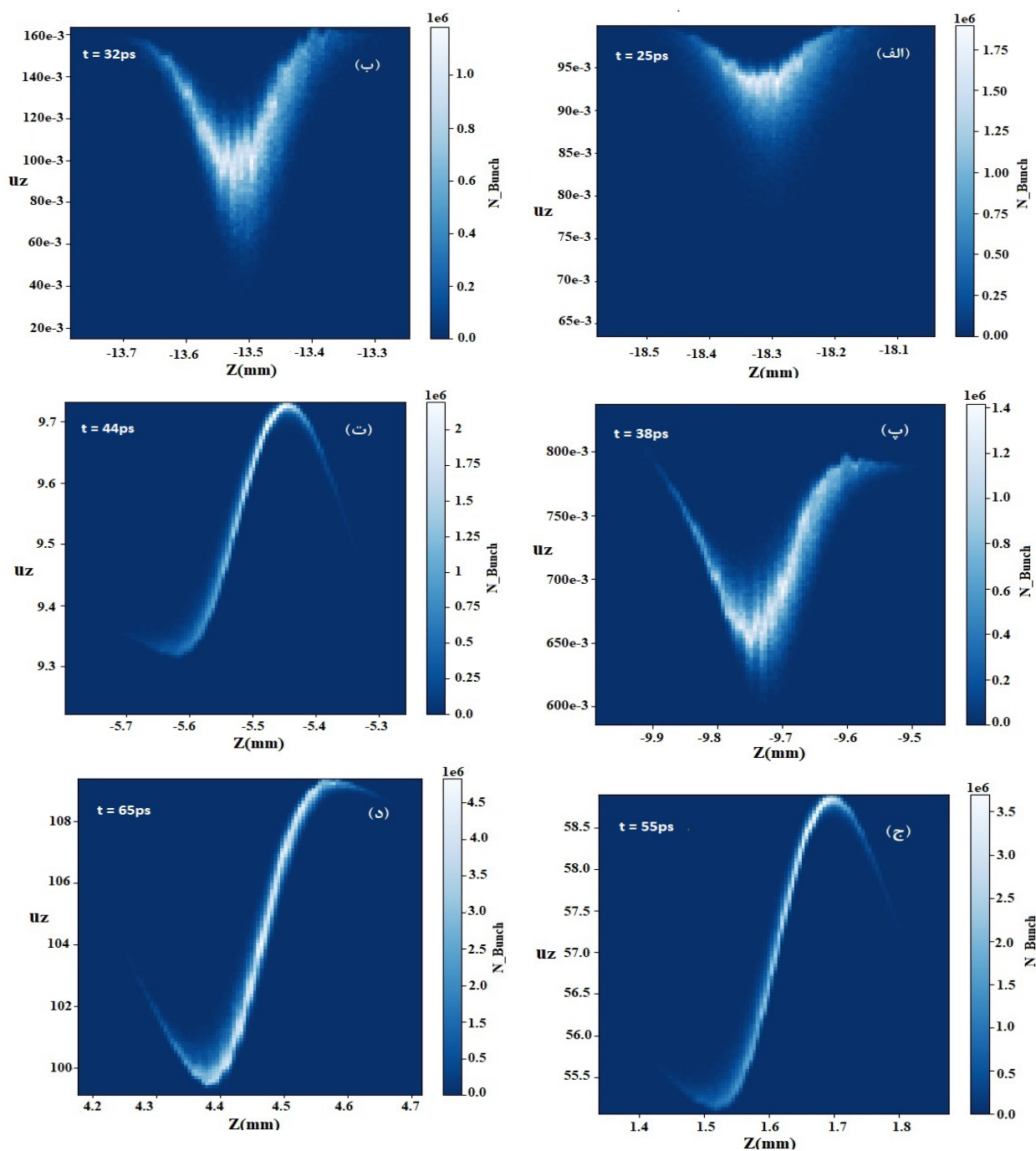
شکل ۲. تحول فضا- زمانی موج پلاسمایی تشکیل شده در اثر اندرکنش باریکه پروتون پراثری با پلاسما. باریکه الکترونی با فاصله یک طول موج نسبت به باریکه پروتونی وارد پلاسما می‌شود و با گذشت زمان در میدان موج پلاسمایی به دام می‌افتد.





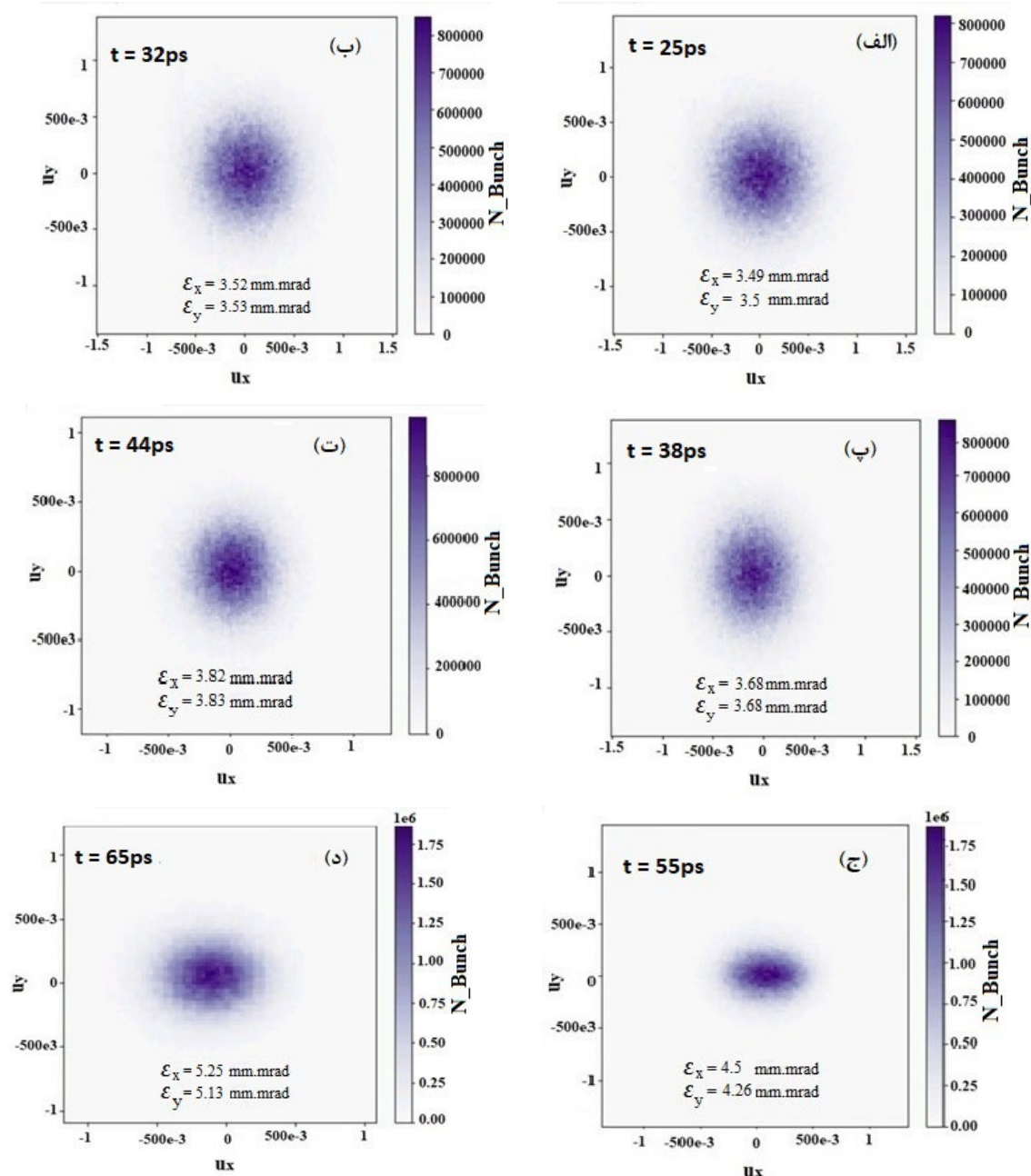
شکل ۳. تحول فضا- زمانی میدان الکتریکی متناظر با موج پلاسمایی ایجاد شده در اثر اندرکنش باریکه پروتون پرنرژی با پلاسما.





شکل ۴. تحول فضای فاز طولی الکترون‌های باریکه شاهد به‌دام افتاده در موج پلاسمایی ایجاد شده در اثر اندرکنش باریکه پروتون پراثری با پلاسما.





شکل ۵. تحول زمانی تابندگی عرضی بهنجار شده‌ی باریکه الکترونی شاهد. مقدار تابندگی عرضی باریکه بر روی شکل‌ها نوشته شده است.

محاسبه‌ی تابندگی ($\text{ts-2d.get_emittance}$) در کد شبیه‌سازی، به‌دست آمده و بر روی نمودارهای شکل ۵ نوشته شده است. تابندگی عرضی اولیه‌ی باریکه الکترونی شاهد برابر با $\epsilon_x = 3.48 \text{ mm.mrad}$, $\epsilon_y = 3.49 \text{ mm.mrad}$ است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن پارامترهای مناسب برای پلاسما و باریکه‌های محرک و شاهد که در بخش ۲ مقاله ذکر شدند، تابندگی عرضی باریکه الکترونی شاهد شتاب‌دار شده با گذشت زمان تا میزان قابل قبولی حفظ شده است و در زمان نهایی $t = 65 \text{ ps}$ که باریکه‌ی الکترونی شاهد به بیشینه انرژی خود (400 MeV) رسیده است، تابندگی باریکه کمتر از 50% نسبت به مقدار اولیه خود رشد کرده است.

تابندگی عرضی (ϵ_x, ϵ_y) از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\epsilon_x = \sqrt{(x - \bar{x})^T (x' - \bar{x}')^T - [(x - \bar{x})(x' - \bar{x}')]^T} \quad (8)$$

$$\epsilon_y = \sqrt{(y - \bar{y})^T (y' - \bar{y}')^T - [(y - \bar{y})(y' - \bar{y}')]^T} \quad (9)$$

در این رابطه $\bar{x}$ میانگین مختصه‌ی تمام ذرات باریکه الکترون می‌باشد که $x' = dx/dz = \beta_x / \beta_z$ و $\bar{x}'$ میانگین مختصه‌ی x' همه‌ی ذرات باریکه است.

مقدار تابندگی عرضی بهنجار شده‌ی باریکه الکترونی شاهد در زمان‌های مختلف نیز با استفاده از اضافه کردن زیربرنامه

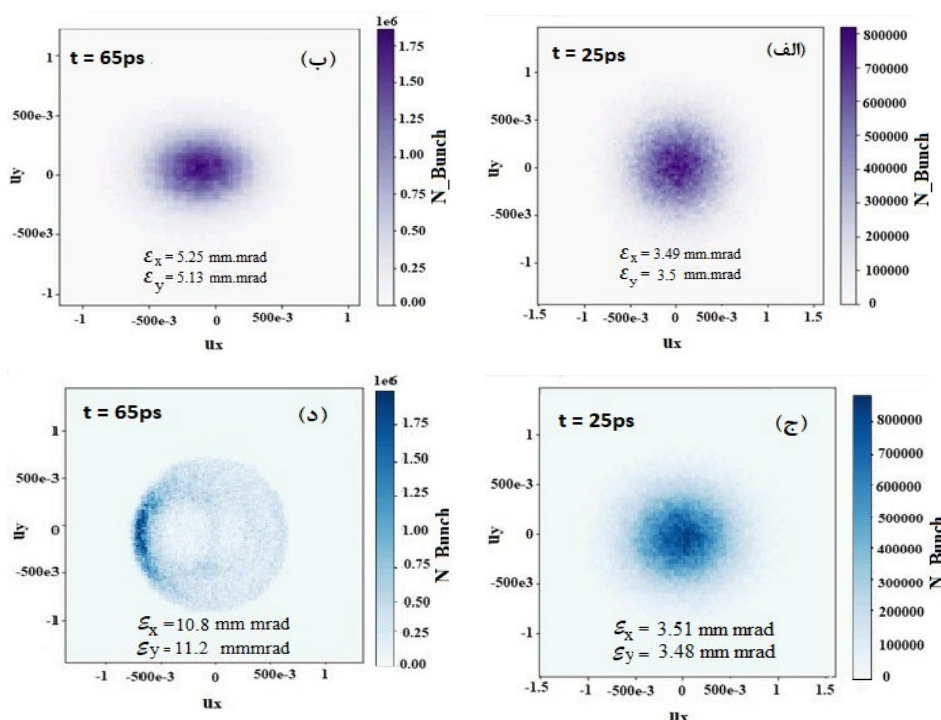


سامانه از یک کد شبیه‌سازی ذره‌ای دوبعدی (FBPIC) استفاده شده است. در چنین سامانه‌هایی انتخاب پارامترهای مناسب برای پلاسما و باریکه‌های محرک و شاهد بسیار مهم می‌باشند. به عنوان مثال، چگالی پلاسما به گونه‌ای انتخاب شده است که امکان دستیابی به میدان موج پلاسمایی با دامنه بالا و پایدار وجود داشته باشد [۱۴، ۱۹]. همچنین، تابع توزیع چگالی پلاسما نیز با توجه به سایر پارامترها، با در نظر گرفتن حفظ پایداری میدان موج و تابندگی باریکه، بهینه شده است [۱۵-۱۶]. نتایج نشان می‌دهد که در برهم‌کنش باریکه پروتون با پلاسما، پلاسمایی پایدار ایجاد شده که میدان الکتریکی متناظر با آن قادر است الکترون‌های باریکه شاهد از مرتبه چند مگاالکترون‌ولت که در این میدان به دام می‌افتند را تا انرژی چند صد مگاالکترون‌ولت شتاب دهد. از مهم‌ترین پارامترها در بررسی کیفیت باریکه الکترونی شتاب‌دار شده، تابندگی باریکه می‌باشد که متناسب با میزان پراکندگی و درخشندگی باریکه است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با انتخاب پارامترهای مناسب برای پلاسما از جمله چگالی پلاسما و تابع توزیع آن، و همچنین پارامترهای مناسب برای باریکه‌های الکترونی و پروتونی مانند انرژی اولیه باریکه، طول و شکل نمایه آن‌ها، علاوه بر دستیابی به الکترون‌هایی با انرژی بالا می‌توان تابندگی باریکه الکترونی را با رشد کمتر از ۵۰٪ نسبت به مقدار اولیه آن حفظ کرد.

همان‌گونه که در بخش ۱ اشاره شد، پارامترهای مناسب در نظر گرفته‌شده در این مقاله با بررسی نتایج مطالعات نظری و تجربی که تاکنون بر روی سامانه برهم‌کنش باریکه پروتون با پلاسما حاصل شده است و همچنین با انجام برخی آزمون‌های شبیه‌سازی لازم انتخاب شده‌اند. به عنوان مثال، نتایج گزارش‌شده در مراجع [۱۵-۱۶]، نشان می‌دهند وجود یک شیب در امتداد چگالی پلاسما منجر به مدوله‌سازی بهتر باریکه پروتون و تولید میدان‌های پایدارتر می‌گردد. در مقاله حاضر، شیب مناسب برای چگالی پلاسما با استفاده از آزمون‌های شبیه‌سازی با هدف حفظ کیفیت باریکه الکترونی انتخاب شده است. در این‌جا، نتایج حاصل از در نظر گرفتن دو شیب متفاوت چگالی پلاسما بر روی تغییرات تابندگی باریکه در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن شیب چگالی ۰/۰۵٪، تابندگی عرضی باریکه الکترون در یک بازه زمانی مشخص رشد زیادی (بیش از ۳ برابر تابندگی اولیه) نسبت به شیب چگالی ۰/۰۳٪ دارد. لذا در این مقاله شیب چگالی پلاسما با هدف حفظ کیفیت باریکه الکترونی شاهد، ۰/۰۳٪ انتخاب شد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک باریکه یونی پراورشی به‌عنوان محرک به‌منظور تشکیل موج پلاسمایی و شتاب‌دهی الکترون به‌کار گرفته شده است. برای بررسی شتاب الکترون و تحول تابندگی در این



شکل ۶. تحول زمانی تابندگی عرضی بهنجاز شدهی باریکه الکترونی شاهد برای شیب چگالی ۰/۰۳ (الف و ب) و برای شیب چگالی ۰/۰۵ (ج و د). مقدار تابندگی عرضی باریکه بر روی شکل‌ها نوشته شده است.



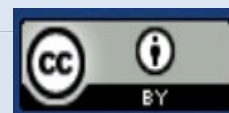
1. Kurz T, Heinemann T, Gilljohann M.F, Chang Y.Y, Couperus Cabadağ J.P, Debus A, Kononenko O, Pausch R, Schöbel S, Assmann R.W, Bussmann M, Ding H, Götzfried J, Köhler A, Raj G, Schindler S, Steiniger K, Zarini O, Corde S, Döpp A, Hidding B, Karsch S, Schramm U, Martinez de la Ossa A, Irman A. Demonstration of a compact plasma accelerator powered by laser-accelerated electron beams. *Nat. commun.* 2021;12:2895.
2. Tajima T, Dawson J.M. Laser electron accelerator. *Phys. Rev. Lett.* 1979;43:267.
3. Leemans W.P, Nagler B, Gonsalves A.J, Tóth C, Nakamura K, Geddes C.G.R, Esarey E, Schroeder C.B, Hooker S.M. GeV electron beams from a centimeter-scale accelerator. *Nat. Phys.* 2006;2:696.
4. Blumenfeld I, Clayton C.E, Decker F.J, MJ Hogan M.J, Huang C, Ischebeck R, Iverson R, Joshi C, Katsouleas Th, Kirby N, Lu W, Marsh K.A, Mori W.B, Muggli P, Oz E, Siemann R.H, Walz D, Zhou M. Energy doubling of 42 GeV electrons in a meter-scale plasma wakefield accelerator. *Nature.* 2007;445:741.
5. Caldwell A, Lotov K, Pukhov A, Simon F. Proton-driven plasma-wakefield acceleration. *Nat. Phys.* 2009;5:363-367.
6. Assmann R, Bingham R, Bohl T, Bracco C, Buttenschön B, Butterworth A, Caldwell A, Chattopadhyay S, Cipiccia S, Feldbaumer E, Fonseca R.A, Goddard B, Gross M, Grulke O, Gschwendtner E, Holloway J, Huang C, Jaroszynski D, Jolly S, Kempkes P, Lopes N, Lotov K, Machacek J, Mandry S.R, McKenzie J.W, Meddahi M, Militsyn B.L, Moschuering N, Muggli P, Najmudin Z, Noakes T.C.Q, Norreys P.A, Öz E, Pardons A, Petrenko A, Pukhov A, Rieger K, Reimann O, Ruhl H, Shaposhnikova E, Silva L.O, Sosedkin A, Tarkeshian R, Trines R.M.G.N, Tückmantel T, Vieira J, Vincke H, Wing M, Xia G. Proton-driven plasma wakefield acceleration: a path to the future of high-energy particle physics. *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2014;56:084013.
7. Lotov K.V, Sosedkin A.P, Petrenko A.V, Amorim L.D, Vieira J, Fonseca R.A, Silva L.O, Gschwendtner E, Muggli P. Electron trapping and acceleration by the plasma wakefield of a self-modulating proton beam. *Phys. Plasmas.* 2014;21: 123116.
8. Pukhov A, Meyer-ter-Vehn J. Laser wake field acceleration: the highly non-linear broken-wave regime. *Appl. Phys. B.* 2002;74:355-361.
9. Joshi C, Adli E, An W, Clayton C.E, Corde S, Gessner S, Hogan M.J, Litos M, Lu W, Marsh K.A, Mori W.B, Vafaei-Najafabadi N, O'shea B, Xu X, White G, Yakimenko V. Plasma wakefield acceleration experiments at FACET II. *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2018;60:034001.
10. Lu W, Huang C, Zhou M.M, Mori W.B, Katsouleas T. Limits of linear plasma wakefield theory for electron or positron beams. *Phys. Plasmas.* 2005;12:063101.
11. Allen B, Yakimenko V, Babzien M, Fedurin M, Kusche K, Muggli P. Experimental study of current filamentation instability. *Phys. Rev. Lett.* 2012;109:185007.
12. Huschauer A, Bartosik H, Cave S.C, Coly M, Cotte D, Damerau H, Di Giovanni G.P, Gilardoni S, Giovannozzi M, Kain V, Koukovini-Platia E, Mikulec B, Sterbini G, Tecker F. Advancing the CERN proton synchrotron multiturn extraction towards the high-intensity proton beams frontier. *Phys. Rev. Accel. Beams.* 2019;22:104002.
13. Plyushchev G, Kersevan R, Petrenko A, Muggli P. A rubidium vapor source for a plasma source for AWAKE. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017;5:025203.
14. Adli E, Ahuja A, Apsimon O, Apsimon R, Bachmann A.-M, Barrientos D, Batsch F, Bauche J, Berglyd Olsen V.K, Bernardini M, Bohl T, Bracco C, Braunmüller F, Burt G, Buttenschön B, Caldwell A, Cascella M, Chappell J, Chevallay E, Chung M, Cooke D, Damerau H, Deacon L, Deubner L.H, Dexter A, Doeberst S, Farmer J, Fedosseev V.N, Fiorito R, Fonseca R.A, Friebe F, Garolfi L, Gessner S, Gorgisyan I, Gorn A.A, Granados E, Grulke O, Gschwendtner E, Hansen J, Helm A, Henderson J.R, Hüther M, Ibison M, Jensen L, Jolly S, Keeble F, Kim S.-Y, Kraus F, Li Y, Liu S, Lopes N, Lotov K.V, Maricalva Brun L, Martyanov M, Mazzoni S, Medina Godoy D, Minakov V.A, Mitchell J, Molendijk J.C, Moody J.T, Moreira M, Muggli P, Öz E, Pasquino C, Pardons A, Peña Asmus F, Pepitone K, Perera A, Petrenko A, Pitman S, Pukhov A, Rey S, Rieger K, Ruhl H, Schmidt J.S, Shalimova I.A, Sherwood P, Silva L.O, Soby L, Sosedkin A.P, Speroni R, Spitsyn R.I, Tuv P.V, Turner M, Velotti F, Verra L, Verzilov V.A, Vieira J, Welsch C.P, Williamson B, Wing M, Woolley B, Xia G. Acceleration of electrons in the plasma wakefield of a proton bunch. *Nature.* 2018;561:363-367.
15. Braunmüller F, Nechaeva T, Adli E, Agnello R, Aladi M, Andrebe Y, Apsimon O, Apsimon R, Bachmann A.-M, Baistrukov M.A, Batsch F, Bergamaschi M, Blanchard P, Burrows P.N, Buttenschön B, Caldwell A, Chappell J, Chevallay E, Chung M, Cooke D.A, Damerau H, Davut C, Demeter G, Deubner L.H, Dexter A, Djotyran G.P, Doeberst S, Farmer J, Fasoli A, Fedosseev V.N, Fiorito R, Fonseca R.A, Friebe F, Furno I, Garolfi L, Gessner S, Goddard B, Gorgisyan I, Gorn A.A, Granados E, Granetzny M, Grulke O, Gschwendtner E, Hafych V, Hartin A, Helm A, Henderson J.R, Howling A, Hüther M, Jacquier R, Jolly S, Kargapolov Yu.I, Kedves M.A, Keeble F, Kelisani M.D, Kim S.-Y, Kraus F, Krupa M, Lefevre T, Li Y, Liang L, Liu S, Lopes N, Lotov K.V, Martyanov M, Mazzoni S, Medina Godoy D, Minakov V.A, Moody J.T, Morales Guzmán P.I, Moreira M, Muggli P, Panuganti H, Pardons A, Peña Asmus F, Perera A, Petrenko A, Pucek J, Pukhov A, Ráczkevi B, Ramjiawan R.L, Rey S, Ruhl H, Saberi H, Schmitz O, Senes E, Sherwood P, Silva L.O, Spitsyn R.I, Tuv P.V, Turner M, Velotti F, Verra L, Verzilov V.A, Vieira J, Welsch C.P, Williamson B, Wing M, Wolfenden J, Woolley B, Xia G, Zepp M, Zevi Della Porta G. Proton bunch self-modulation in plasma with density gradient.



16. Pukhov A, Kumar N, Tückmantel T, Upadhyay A, Lotov K, Muggli P, Khudik V, Siemon C, Shvets G. Phase velocity and particle injection in a self-modulated proton-driven plasma wakefield accelerator. *Phys. Rev. Lett.* 2011;107:145003.
17. Lotov K.V, Minakov V.A. Proton beam self-modulation seeded by electron bunch in plasma with density ramp. *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2020;62:115025.
18. Gorn A.A, Turner M, Adli E, Agnello R, Aladi M, Andrebe Y, Apsimon O, Apsimon R, Bachmann A-M, Bastrukov M.A, Batsch F, Bergamaschi M, Blanchard P, Burrows P.N, Buttenschön B, Caldwell A, Chappell J, Chevallay E, Chung M, Cooke D.A, Damerau H, Davut C, Demeter G, Deubner L.H, Dexter A, Djotyan G.P, Doeberst S, Farmer J, Fasoli A, Fedosseev V.N, Fiorito R, Fonseca R.A, Friebe F, Furno I, Garolfi L, Gessner S, Goddard B, Gorgisyan I, Granados E, Granetzny M, Grulke O, Gschwendtner E, Hafych V, Hartin A, Helm A, Henderson J.R, Howling A, Hüther M, Jacquier R, Kargapolov I.Yu, Kedves M.Á, Keeble F, Kelisani M.D, Kim S-Y, Kraus F, Krupa M, Lefevre T, Liang L, Liu S, Lopes N, Lotov K.V, Martyanov M, Mazzoni S, Medina Godoy D, Minakov V.A, Moody J.T, Morales Guzmán P.I, Moreira M, Nechaeva T, Panuganti H, Pardons A, Peña Asmus F, Perera A, Petrenko A, Pucek J, Pukhov A, Ráczkevi B, Ramjiawan R.L, Rey S, Ruhl H, Saberi H, Schmitz O, Senes E, Sherwood P, Silva L.O, Spitsyn R.I, Tuev P.V, Velotti F, Verra L, Verzilov V.A, Vieira J, Welsch C.P, Williamson B, Wing M, Wolfenden J, Woolley B, Xia G, Zepp M, Zevi Della Porta G. Proton beam defocusing in AWAKE: comparison of simulations and measurements. *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2020;62:125023.
19. Xu X.L, Hua J.F, Wu Y.P, Zhang C.J, Li F, Wan Y, Pai C.-H, Lu W, An W, Yu P, Hogan M.J, Joshi C, Mori W.B. Physics of phase space matching for staging plasma and traditional accelerator components using longitudinally tailored plasma profiles. *Phys. Rev. Lett.* 2016;116:124801.
20. Ariniello R, Doss C.E, Hunt-Stone K, Cary J.R, Litos M.D. Transverse beam dynamics in a plasma density ramp. *Phys. Rev. Accel. Beams.* 2019;22:041304.
21. Sharifzadeh Tabrizi J, Khorashadizadeh S.M, Fallah R, Niknam A.R. Amplitude enhancement of plasma wakefield by interaction of relativistic Gaussian electron beam with inhomogeneous magnetized plasma. *AIP Adv.* 2020;10:015330.
22. Kuznetsov S.V. Trapping of electrons and acceleration of the electron bunch in a wake wave. *Plasma Phys. Rep.* 2014;40:611-622.
23. Lehe R, Kirchen M, Jolas S, Peters K, Dornmair I. Fourier-Bessel Particle-In-Cell (FBPIC) v0. 1.0. No. FBPIC. Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), Berkeley, CA, United States. 2017.
24. Kirchen M, Jolas S, Mahncke S, Maier A.R. FBPIC: A spectral, quasi-3D, multi-GPU Particle-In-Cell code for plasma accelerators. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.* 2018;50:1.
25. https://anaconda.org/petrenko/fbpic_awake_ru_N_inj/notebook.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

کارگریان، آمنه. (۱۴۰۳)، بررسی تابندگی و شتاب باریکه الکترون در برهم‌کنش باریکه پروتون پرنرزی با پلاسما. مجله علوم و فنون هسته‌ای، ۱۰۸(۲)، ۱۴۴-۱۵۴.

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1599.html .DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1599>

