

Research Paper

## 2D PIC Simulation of Electron Acceleration in Interaction of Short Laser Pulse with Plasma Having a Density Ramp in Bubble Regime<sup>1</sup>

Ameneh Kargarian<sup>2</sup>

Received: 2023.02.18

Revised: 2023.05.26

Accepted: 2023.06.27

### Abstract

In this paper, using 2D PIC simulation, the electron acceleration in the bubble regime has been investigated in the interaction of a short high-power laser pulse with an underdense plasma with a density ramp. Due to the laser pondermotive force, a plasma wave and its corresponding electric field are formed in the plasma. The electrons injected in the focusing and acceleration region of the plasma wave field can get energy from the wave and are accelerated to high energies of the Giga-electron-Volt range. The simulation results show that with increasing the plasma density gradient, the phase speed of the generated plasma wave increases, and the corresponding wavelength decreases. This causes the displacement of the plasma wave focusing and acceleration region and ultimately increases the acceleration length in the acceleration process. Considering a laser pulse with dimensionless intensity amplitude  $a_0 = 4$ , pulse duration  $c\tau = 5\mu m$ , and plasma with density ramp length  $L = 20$ , the plasma wave accelerating electric field with amplitude  $E_0 = 200 GeV / m$  was generated. The results of this work can be crucial in choosing an appropriate plasma profile to design the laser-plasma accelerator system for obtaining the Giga-electron-Volt energy gain in a short time.

**Keywords:** *2D PIC Simulation, Plasma Density Ramp, Wakefield.*

---

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/ijap.2023.42964.1314

<sup>2</sup> Assistant Professor, Plasma and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. Email: akargarian@aeoi.org.ir

<https://jap.alzahra.ac.ir>



# شبیه‌سازی ذره‌ای دوبعدی شتاب الکترون در برهم‌کنش پالس لیزری کوتاه با پلاسمای دارای رمپ چگالی در رژیم حبایی<sup>۱</sup>

آمنه کارگریان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۹  
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۰۵  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۶

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران  
دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا  
سال سیزدهم، پیاپی ۳۵، زمستان ۱۴۰۲  
صص ۵۷ - ۶۹

## چکیده:

در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی ذره‌ای دوبعدی پلازما، شتاب الکترون در رژیم حبایی در اثر برهم‌کنش پالس لیزری پر شدت کوتاه با یک پلاسمای رقیق دارای رمپ چگالی مورد بررسی قرار گرفته است. در اثر نیروی پاندروماتئو لیزری، موج پلاسمایی و میدان الکتریکی متناظر با آن در پلازما تشکیل می‌شود. الکترون‌های تزریق شده در ناحیه‌ی متمرکزکننده و شتاب‌دهنده‌ی موج پلاسمایی می‌توانند از موج انرژی گرفته و تا انرژی‌هایی از مرتبه‌ی گیگا الکترون‌ولت شتاب داده شوند. نتایج شبیه‌سازی ذره‌ای دوبعدی نشان می‌دهد با افزایش شیب چگالی پلازما، سرعت فاز موج پلاسمایی ایجاد شده افزایش و طول موج متناظر با آن کاهش می‌یابد. این امر موجب جابجایی ناحیه‌ی متمرکزکننده و شتاب‌دهنده‌ی موج پلاسمایی و در نهایت افزایش طول شتاب در فرآیند شتابدهی الکترون می‌گردد. با در نظر گرفتن پالس لیزری با دامنه شدت بدون بعد  $a_0 = 4$ ، پهنای پالس  $c\tau = 5\mu m$  و پلازما با رمپ چگالی به طول  $L = 20$ ، میدان الکتریکی شتاب‌دهنده متناظر با موج پلاسمایی با دامنه‌ی  $E_0 = 200 GeV / m$  بدست آمده. نتایج بدست آمده می‌تواند در انتخاب پروفایل مناسب چگالی پلازما در طراحی سامانه‌ی شتاب‌دهنده لیزر- پلازما برای دستیابی به انرژی‌هایی از مرتبه گیگا الکترون‌ولت در زمان‌های کوتاه دارای اهمیت باشد.

**واژگان کلیدی:** شبیه‌سازی ذره‌ای دوبعدی، رمپ چگالی پلازما، موج دنباله.

<sup>۱</sup> DOI: 10.22051/ijap.2023.42964.1314

<sup>۲</sup> استادیار، پژوهشکده پلازما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email: akargarian@aeoi.org.ir



## ۱. مقدمه

در سازوکار شتابدهی در سامانه‌ی برهم‌کنش لیزر-پلازما، عامل فیزیکی تولید موج پلاسمایی نیروی گرانیوی<sup>۱</sup> لیزر است که از وجود یک شیب در پروفایل شدت لیزر ناشی می‌شود. این نیرو الکترون‌ها را در نیمه‌ی جلویی یک پالس لیزر که در آن شیب شدت منفی است به سمت جلو و در نیمه‌ی عقبی پالس به سمت عقب می‌راند و در نتیجه سبب جدایش بار در پلازما می‌شود. با انتشار یک پالس لیزری پرشدت و کوتاه در پلاسمای رقیق، نیروی گرانیوی شعاعی لیزر الکترون‌ها را از مرکز دور کرده و یک کانال یونی در پلازما شکل می‌گیرد و مؤلفه‌ی محوری نیروی گرانیوی لیزر با ایجاد اختلال در چگالی پلازما سبب تولید میدان‌های طولی شده و در پشت سر خود موجی از نوسانات الکترونی پلازما برجای می‌گذارد که سرعت فازی کمابیش برابر سرعت گروه لیزر خواهد داشت و موج دنباله<sup>۲</sup> نامیده می‌شود [۱]. این موج تولید شده قادر است الکترون‌های تزریق‌شده به پلازما و یا الکترون‌های زمینه پلازما را به دام بیاندازد. همچنین، الکترون‌هایی که سرعتی برابر با سرعت فاز موج دارند و در ناحیه متمرکزکننده و شتاب<sup>۳</sup> الکترون به دام می‌افتند، می‌توانند همراه با موج حرکت کرده و با دریافت انرژی موج تا انرژی‌های بالا شتاب بگیرند.

پدیده‌های غیرخطی مختلف که در طول انتشار پالس لیزری پرا انرژی کوتاه در پلازما اتفاق می‌افتند، موجب ایجاد اختلال در فرآیند شتاب الکترون می‌شوند. افزون بر این، اتلاف انرژی لیزر، کاهش طول هم‌فازی موج-الکترون و ناپایداری‌های لیزر-پلازما منجر به کاهش شتاب الکترون می‌شود. در سال‌های کنونی، روش‌های مختلفی برای کاهش محدودیت‌های شتاب الکترون در سامانه برهم-کنش لیزر-پلازما، گزارش شده است. در این راستا، استفاده از دو بیم لیزری انتشار یافته در جهات مختلف برای تولید موج پلاسمایی مورد بررسی قرار گرفته است [۲]. شتاب الکترون‌های تزریق شده در موج پلاسمایی برانگیخته شده توسط پالس‌های لیزری برخوردار نیز بررسی شده است [۳]. نتایج بررسی‌ها در این زمینه، افزایش انرژی الکترون با استفاده از یک پالس لیزری با قطبش شعاعی در حضور یک کانال یونی را نشان می‌دهد [۴]. افزون بر این، شتاب موج پلاسمایی لیزری در سامانه برهم‌کنش لیزر با پلاسمای جفت-یون [۵]، پلاسمای غیرهمگن [۶] و پلاسمای یون-الکترون-پوزیترون [۷] با استفاده از شبیه‌سازی ذره‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج تجربی بدست آمده در سامانه‌ی شتاب الکترون توسط موج برانگیخته شده در اثر برهم‌کنش بیم پروتون پرا انرژی با

<sup>1</sup> Pondermotive Force

<sup>2</sup> Wake field

<sup>3</sup> Focusing and Acceleration Region



پلازما، نشان می‌دهد برای دستیابی به میدان موج پلاسمایی پایدار و به‌دنبال آن شتاب الکترون تا انرژی‌های بالا، انتخاب یک شیب در چگالی پلازما مهم می‌باشد [۸]. نتایج شبیه‌سازی ارائه شده بر روی افزایش انرژی الکترون توسط موج برانگیخته شده با لیزر در حضور پلاسمایی با رمپ در انتهای چگالی آن نیز گزارش شده است [۹]. افزون بر این، تأثیر طول مقیاس چگالی پلازما بر روی شتاب الکترون در رژیم غیرخطی ( $a_0 \geq 1$ ) به صورت تجربی [۱۰] و همچنین با استفاده از شبیه‌سازی ذره‌ای یک‌بعدی پلازما مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱، ۱۲]. بهینه‌سازی انرژی الکترون در سامانه‌ی برهم‌کنش لیزر با پلازما نیز نشان می‌دهد با در نظر گرفتن پلاسمایی با طول رمپ مناسب می‌توان به انرژی‌های از مرتبه گیگاالکترون‌ولت دست یافت [۱۳].

مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهند با تصحیح پارامترهای پالس لیزری محرک و هم‌چنین پارامترهای پلازما می‌توان فرآیند شتابدهی در سامانه‌ی برهم‌کنش لیزر-پلازما را بهبود بخشید. در این مقاله، با استفاده از روش شبیه‌سازی ذره‌ای دوبعدی، برهم‌کنش پالس لیزری قوی کوتاه با یک پلاسمای رقیق دارای رمپ چگالی، با هدف بررسی اثر طول رمپ، چگالی پلازما بر روی میدان دنباله‌ی ایجاد شده و شتاب الکترون در رژیم حبایی<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار می‌گیرد. رژیم حبایی، برای لیزر با شدت بالا ( $a_0 \geq 4$ ) و طول پالس کوتاه ( $\tau \leq \lambda_p$ ) رخ می‌دهد [۱۳-۱۵]. در این رژیم شدت لیزر به اندازه‌ای زیاد است که مؤلفه عرضی نیروی پاندرماتیو<sup>۲</sup> لیزری تمام الکترون‌ها را از مرکز دور کرده و یک حباب در مرکز شکل می‌گیرد و مؤلفه طولی آن موجب نوسانات طولی الکترون‌ها و ایجاد موج پلاسمایی می‌گردد.

در بخش دوم مقاله حاضر، روش شبیه‌سازی و پارامترهای استفاده شده توضیح داده شده است. در بخش سوم، نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی تشکیل موج پلاسمایی، میدان متناظر با آن و شتاب الکترون ارائه شده است. بخش پنجم نیز شامل خلاصه و نتیجه‌گیری می‌باشد.

## ۲. شبیه‌سازی ذره‌ای دوبعدی

الگوریتم ذره‌ای یا ذره در جعبه (3PIC) 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، با وجود استفاده گسترده‌ی روش

<sup>1</sup> Bubble regime

<sup>2</sup> Pondermotive Force

<sup>3</sup> Particle-In-Cell



شبیه‌سازی برای مطالعه پدیده‌های فیزیکی مختلف، این روش از نظر محاسباتی بسیار گران می‌باشد که منجر به اعمال محدودیت‌هایی در شبیه‌سازی سامانه‌های فیزیکی می‌شود. این امر به‌ویژه هنگام شبیه‌سازی برهم‌کنش پلاسما با لیزر و پرتو ذرات قابل توجه هستند. در روش‌های جدید شبیه‌سازی PIC، هدف کاهش هزینه با کمینه محدودیت‌ها می‌باشد. کد شبیه‌سازی FBPIC1 [۱۶]، که در مقاله پیش‌رو از آن استفاده شده است، یک کد شبیه‌سازی دو بعدی دقیق در مختصات استوانه‌ای است که برای شبیه‌سازی سامانه‌های دارای تقارن از جمله سامانه‌ی برهم‌کنش لیزر- پلاسما بسیار مناسب می‌باشد. به صورت کلی، در روش شبیه‌سازی PIC چگالی ذرات بر روی یک شبکه مجازی به روش وزن‌دهی محاسبه می‌شود. سپس میدان الکتریکی با حل معادله پواسون بر روی نقاط شبکه بدست می‌آید. میدان الکتریکی شبکه از راه درون‌یابی در محل ذرات محاسبه می‌شود. پس از آن مکان و سرعت جدید ذرات با استفاده از معادله‌ی نیوتون- لورنتس نسبیته محاسبه می‌گردد. در این روش هر ذره هماهنگ با نیروی لورنتس اعمال شده توسط میدان‌های الکترومغناطیسی در موقعیت ذره حرکت می‌کند [۱۷]:

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

تغییرات فضا- زمانی میدان‌ها نیز بر اساس معادلات ماکسول به صورت زیر می‌باشد:

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

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

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

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

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

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

در بخش بعدی مقاله، با استفاده از این روش شبیه‌سازی، تشکیل میدان دنباله و شتاب الکترون در پلاسمای دارای رمپ چگالی در سامانه‌ی برهم‌کنش لیزر- پلاسما بررسی می‌شود.

<sup>1</sup> Fourier-Bessel Particle-In-Cell



برای بررسی برهم کنش پالس لیزری قوی کوتاه با یک پلاسما رقیق دارای رمپ چگالی با استفاده از شبیه‌سازی ذره‌ای، پالس لیزر گاوسی با طول موج  $\lambda = 1 \mu m$ ، پهنای پالس  $c\tau = 5 \mu m$ ، شعاع لکه‌ای  $\omega_0 = 5 \mu m$  و دامنه‌ی بدون بعد  $a_0 = 4$  که با شدت لیزر به صورت  $I = 1.37 \frac{a_0^2}{\lambda^2} \times 10^{18} \omega / cm^2$  رابطه دارد، و پلاسما با چگالی  $n = 4 \times 10^{24} m^{-3}$  و دارای رمپ با طول مقیاس متفاوت در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی انجام شده طول جعبه شبیه‌سازی  $L = 240$  و گام مکانی  $\delta x = 0.05$  در نظر گرفته شده است. لازم به یادآوری است در شبیه‌سازی انجام شده زمان‌ها به عکس فرکانس لیزر و طول‌ها به طول موج لیزر بی‌بعد شده‌اند.

### ۳. بحث و نتیجه‌گیری

#### ۳-۱ شبیه‌سازی تشکیل موج پلاسمایی

تشکیل موج پلاسمایی ایجاد شده در اثر برهم کنش پالس لیزر با پلاسما با سه رمپ چگالی متفاوت در دو زمان بی‌بعد  $T = 120$  و  $T = 210$  در شکل (۱) نشان داده شده است. شکل‌های ۱ (الف)، ۱ (ب)، ۱ (ج) به ترتیب (از بالا به پایین) تحول موج تشکیل شده برای چگالی با طول رمپ  $L = 60$ ،  $L = 40$  و  $L = 20$  را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهند، با کاهش طول رمپ چگالی که متناظر با افزایش شیب چگالی پلاسما است، طول موج مربوط به موج پلاسمایی ایجاد شده در پلاسما کاهش می‌یابد. این امر منجر به تشکیل سریع‌تر ناحیه‌ی متمرکزکننده و شتاب الکترون می‌گردد. افزون بر این، با کاهش طول رمپ، سرعت فاز موج پلاسمایی افزایش پیدا می‌کند که می‌تواند موجب افزایش طول هم‌فازی موج-الکترون گردد.

تحول میدان الکتریکی متناظر با موج پلاسمایی تشکیل شده در پلاسما با دو طول رمپ متفاوت  $L = 40$  و  $L = 20$  (از بالا به پایین) در سه زمان بی‌بعد  $T = 120$ ،  $T = 210$  و  $T = 280$  در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در پلاسما با طول رمپ کوچک‌تر نیمه‌ی دوم موج که ناحیه‌ی متمرکزکننده و شتاب‌دهنده‌ی الکترون است در زمان‌های کوتاه‌تری شکل گرفته است. افزون بر این، دامنه میدان دنباله‌ی شتاب‌دهنده ایجاد شده برای طول رمپ کوچک‌تر بیشتر از طول رمپ بزرگ‌تر است.

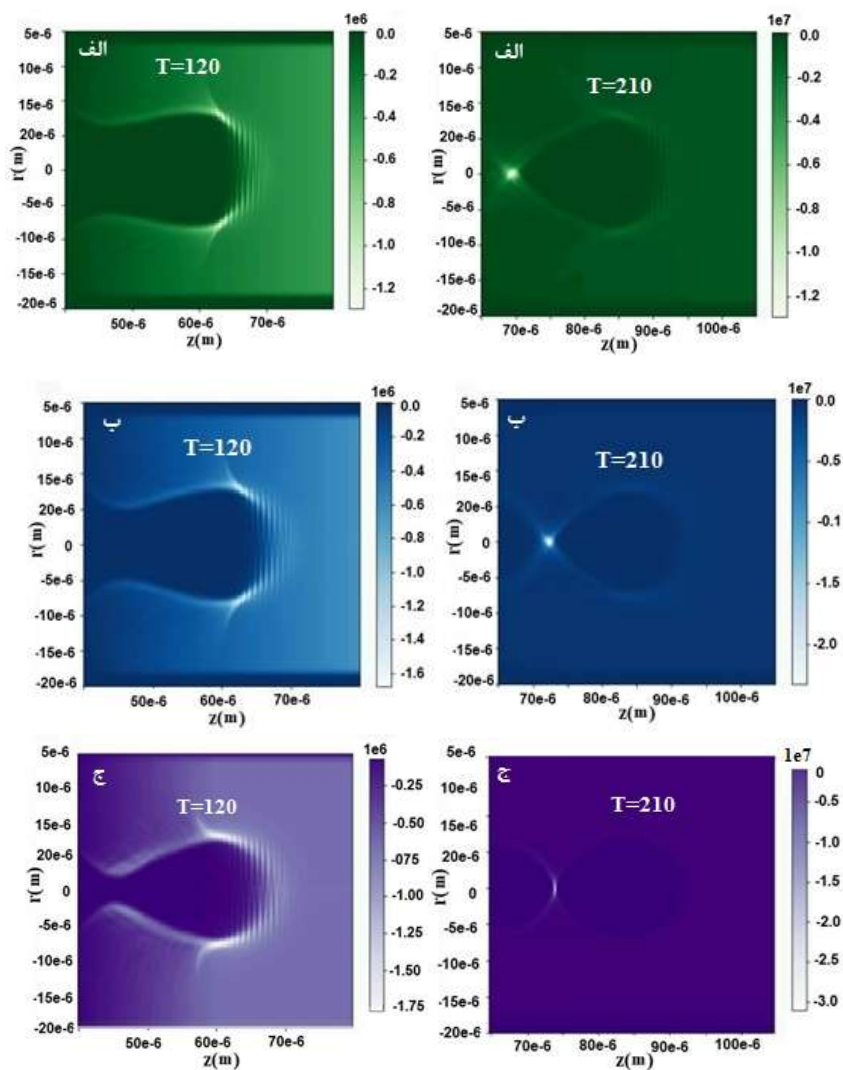
همانطور که شکل (۲) نشان می‌دهد، دامنه میدان الکتریکی برانگیخته شده برای رمپ با طول کوچک‌تر به  $E_0 = 200 GeV / m$  رسیده است. پیش از این، اثرات پهنای پالس لیزری و طول رمپ چگالی بر روی شتاب الکترون در اثر اندرکنش لیزر با دامنه  $a_0 = 1$  با استفاده از شبیه‌سازی ذره‌ای

یک بعدی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱، ۱۲]. با توجه به نتایج شبیه سازی ارائه شده در این منابع، بیشینه انرژی کسب شده توسط الکترون در زمان هایی از مرتبه ی پیکوثانیه حدود  $100MeV$  می باشد. اگر چه با توجه به نتایج مقاله حاضر، در رژیم جاببی، الکترون توانایی دستیابی به انرژی هایی از مرتبه گیگا الکترون در زمان های کوتاه تر را دارا می باشد.

بهینه سازی انرژی الکترون های داخل پلاسما در رژیم جاببی با در نظر گرفتن پلاسما با طول مقیاس چگالی از مرتبه ی چند صد میکرومتر نیز مطالعه شده است [۱۳]. نتایج بدست آمده از این بررسی که برای یک پالس لیزری با پهنا  $\tau = 30fs$  که دو برابر پهنا ی پالس در مقاله حاضر و پلاسمایی با چگالی  $n = 4 \times 10^{25} m^{-3}$  که ده برابر چگالی در نظر گرفته شده در مقاله حاضر است، نشان می دهند که در رژیم جاببی با در نظر گرفتن پالس لیزری بلند و پلاسمای چگال تر با طول رمپ های بلند، انرژی بدست آمده توسط الکترون از مرتبه چند دهم گیگا الکترون ولت در زمان هایی از مرتبه پیکوثانیه می باشد. در حالی که، در مقاله حاضر با در نظر گرفتن رمپ های پلاسمایی با طول یک دهم نسبت به منبع اشاره شده، الکترون ها به انرژی حدود چند صد گیگا الکترون ولت در زمان های حدود  $300fs$  می رسند.

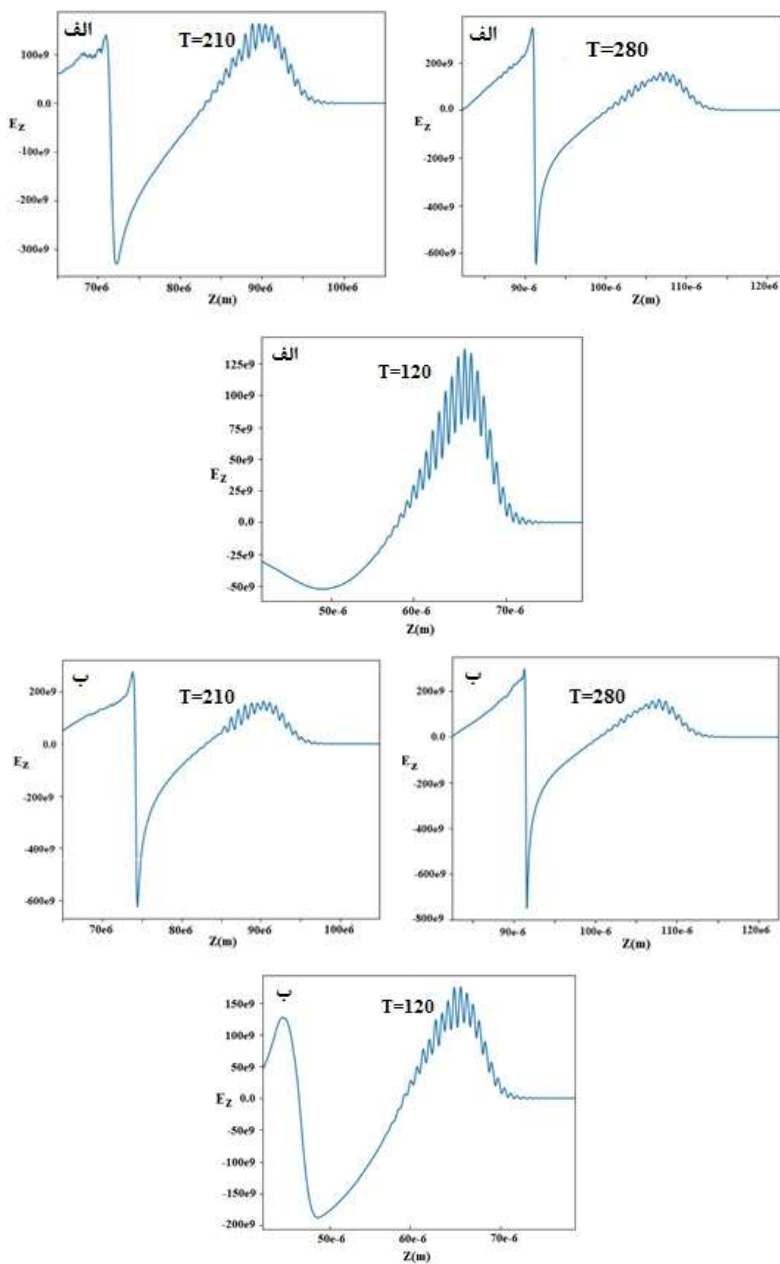
تحول میدان دنباله ی متناظر با موج پلاسمایی نشان می دهد در زمان های اولیه به دلیل طول رمپ های چگالی متفاوت و تغییر در چگالی پلاسما، شکل میدان متناظر با موج برانگیخته شده در پلاسما متفاوت است. اما در زمان های طولانی تر که موج پلاسمایی برانگیخته شده وارد ناحیه چگالی یکنواخت می شود، شکل میدان متناظر با موج برانگیخته شده در پلاسما با طول رمپ های متفاوت به یکدیگر نزدیک است و تنها تفاوت در دامنه ی میدان است که در حالت طول رمپ کوتاه تر، دامنه ی میدان افزایش بیشتری یافته است.





شکل ۱ تحول موج تشکیل شده برای چگالی با طول ریب (الف)  $L = 60$ ، (ب)  $L = 40$ ، (ج)  $L = 20$  در دو زمان متفاوت.





شکل ۲ تحول میدان دنباله‌ی متناظر با موج پلاسمایی برای جگالی با طول رمپ (الف)  $L = 40$  و (ب)  $L = 20$  در سه زمان متفاوت.



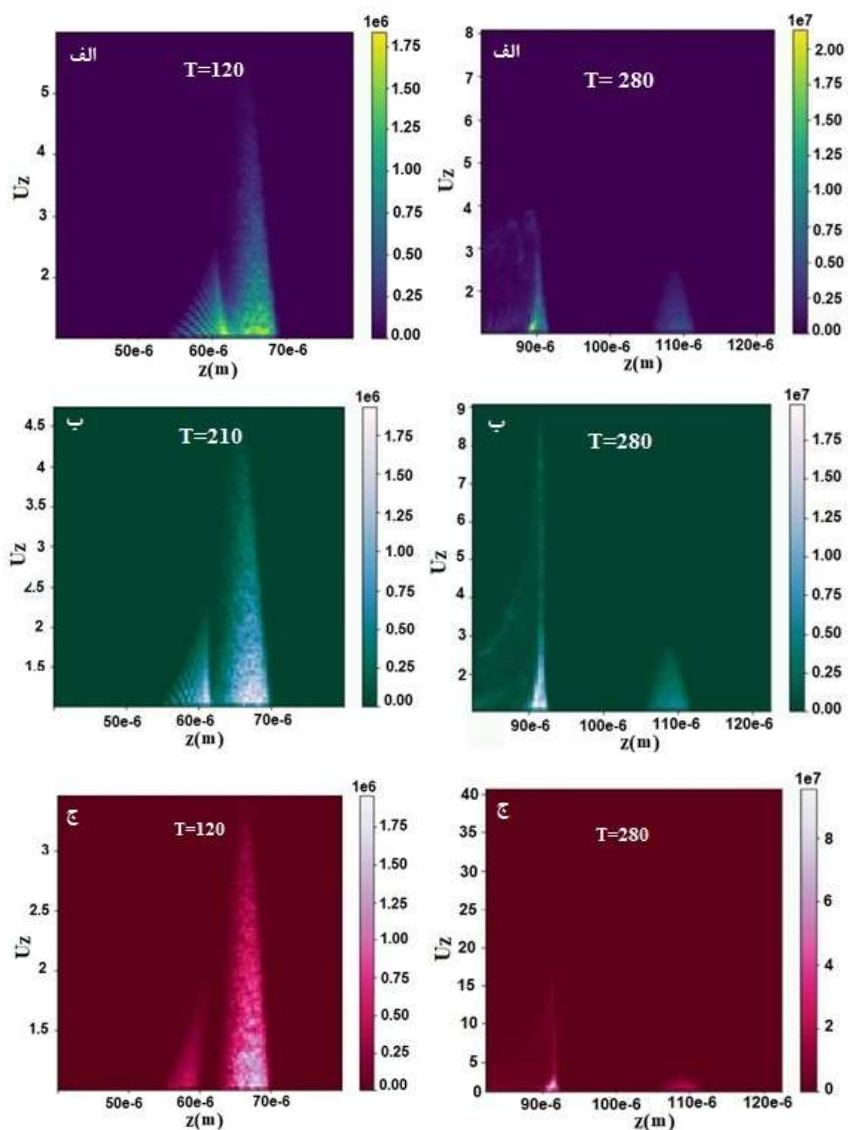
### ۲-۳ شبیه‌سازی ذره‌ای شتاب‌دهی الکترون در میدان دنباله موج پلاسمایی

برای بررسی تأثیر طول رمپ چگالی پلازما بر روی شتاب‌دهی الکترون، فضای فاز الکترون برای پلازما با سه طول رمپ متفاوت و در زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل‌های ۳ (الف)، ۳ (ب) و ۳ (ج) به ترتیب (از بالا به پایین)، فضای فاز الکترون برای چگالی با سه طول رمپ  $L=60$ ،  $L=40$  و  $L=20$  در دو زمان بی‌بعد  $T=210$  و  $T=280$  نشان داده شده است. بررسی نمودارهای فضای فاز الکترون نشان می‌دهد، با گذشت زمان، افزایش شیب چگالی پلازما (کاهش طول رمپ چگالی) منجر به شتاب‌دهی تعداد بیش‌تری از الکترون‌ها تا انرژی‌های بالاتر می‌شود. افزایش شیب چگالی پلازما منجر به کاهش طول موج و افزایش سرعت فاز موج پلاسمایی ایجادشده در اثر اندرکنش پلازما با پالس لیزری کوتاه و پرشدت می‌شود که این امر منجر به افزایش طول هم‌فازی الکترون-موج می‌گردد. بنابراین، تعداد بیش‌تری از الکترون‌ها و در زمان‌های طولانی‌تری از موج پلاسمایی برانگیخته‌شده انرژی می‌گیرند.

در حقیقت، در رژیم خطی برهم‌کنش لیزر-پلازما، طول موج متناظر با موج پلاسمایی برانگیخته شده از مرتبه‌ی طول مشخصه‌ی دبای پلازما ( $\lambda_D$ ) و سرعت فاز آن با سرعت گروه لیزر برابر است، اما رژیم حبایی که در مقاله حاضر مورد بررسی قرار گرفته است یک رژیم کاملاً غیرخطی است که میدان متناظر با موج در این رژیم غیرخطی است و در طی انتشار در پلازما در اثر افزایش اثرات پدیده‌های غیرخطی و نسبی، طول موج آن افزایش و سرعت فاز آن کاهش می‌یابد که این امر منجر به تغییر طول ناحیه متمرکزکننده و شتاب‌دهی موج و در نتیجه غیرهم‌فازی موج-الکترون و در نهایت کاهش شتاب می‌گردد. با تغییر پروفایل چگالی پلازما به سمت رمپ با شیب تندتر، در حقیقت چگالی پلازما در طی زمان تشکیل و انتشار موج پلاسمایی تغییر کرده و موجب کاهش طول موج و افزایش سرعت فاز موج می‌گردد. به این ترتیب، با افزایش طول غیرهم‌فازی<sup>۱</sup> الکترون-موج، الکترون در طی فرآیند شتاب‌دهی می‌تواند انرژی بیشتری از موج پلاسمایی دریافت کند.

<sup>۱</sup> Dephasing length





شکل ۳ فضای فاز الکترون برای چگالی با طول رمپ (الف)  $L=60$ ، (ب)  $L=40$ ، (ج)  $L=20$  در دو زمان متفاوت.



#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله تحول موج پلاسمایی و میدان دنباله متناظر با آن و شتاب الکترون در پلازما با طول رمپ چگالی مختلف در اثر اندرکنش با پالس لیزری کوتاه پرشدت مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از یک کد شبیه‌سازی ذره‌ای دوبعدی ارتقایافته استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی ذره‌ای دو بعدی، تأثیر قابل توجه طول رمپ چگالی پلازما بر روی تشکیل موج دنباله‌ای پلاسمایی و شتاب الکترون‌های تزریق شده در میدان موج ایجاد شده را نشان می‌دهند. با کاهش طول رمپ چگالی پلازما، طول موج مربوط به موج دنباله کاهش یافته و سرعت فاز آن افزایش می‌یابد. تغییر طول موج و سرعت فاز موج دنباله منجر به تغییر ناحیه به‌دام افتادن و شتاب الکترون و هم‌چنین افزایش طول هم‌فازی الکترون-موج می‌گردد. این امر منجر به افزایش شتاب الکترون در سامانه‌ی برهم‌کنش لیزر-پلازما می‌گردد. در رژیم حبایی مطالعه‌شده در اثر برهم‌کنش پالس لیزری با دامنه شدت بدون بعد  $a_0 = 4$  و پهنای پالس  $c\tau = 5\mu m$  با پلاسمایی با طول رمپ چگالی کوتاه  $L = 20$ ، میدان الکتریکی شتاب‌دهنده‌ی متناظر با موج پلاسمایی با دامنه‌ی  $E_0 = 200 GeV / m$  بدست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی [۱۱، ۱۲] و تجربی [۱۰] در رژیم غیرخطی با در نظر گرفتن پالس لیزری با شدت به مراتب پایین‌تر ( $a_0 \ll 1$ ) افزایش انرژی الکترون تا مرتبه‌ی مگا الکترون‌ولت در بازه‌های زمانی طولانی از مرتبه پیکوثانیه را نشان می‌دهند. از این رو، نتایج بدست آمده از مقاله حاضر در انتخاب پروفایل مناسب چگالی پلازما در طراحی سامانه‌ی شتاب‌دهنده لیزر-پلازما به منظور دستیابی به انرژی‌هایی از مرتبه‌ی گیگاالکترون‌ولت در زمان‌های کوتاه دارای اهمیت می‌باشد.

#### ۵. تقدیر و تشکر

نویسنده لازم می‌داند مراتب امتنان و قدردانی خود را از داوران محترم مقاله بابت نظرات و پیشنهادات ارزشمند ایشان که موجب ارتقای سطح علمی و ساختاری مقاله شده است، صمیمانه ابراز نماید. همچنین، از توسعه‌دهندگان کد FBPIC که نتایج مقاله حاضر با استفاده از نسخه‌ی برهم‌کنش لیزر با پلاسمای این کد استخراج شده است، قدردانی می‌گردد.



## منابع

- [1] Litos M., Adli E., An W., Clarke C.I., Clayton C.E., Corde S., Delahaye J.P., England R.J., Fisher A.S., Frederico J. and Gessner S., "High-efficiency acceleration of an electron beam in a plasma wakefield accelerator", *Nature*, **515**, 92-95, 2014. <https://doi.org/10.1038/nature13882>
- [2] Shvets G., Fisch N.J. and Pukhov A., "Excitation of accelerating plasma waves by counter-propagating laser beams", *Phys. Plasmas*, **9**, 2383-2392, 2002. <https://doi.org/10.1063/1.1468649>
- [3] Faure J., Rechatin C., Norlin A., Lifschitz A., Glinec Y. and Malka V., "Controlled injection and acceleration of electrons in plasma wakefields by colliding laser pulses", *Nature* **444**, 737, 2006. <https://doi.org/10.1038/nature05393>
- [4] Kaur M. and Gupta D.N., "Electron acceleration by a radially polarized laser pulse in an ion channel", *IEEE Trans. Plasma Sci.* **45**, 2841-2847, 2017. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2740344>
- [5] Kargarian A., Hajisharifi K. and Mehdian H., "Laser-driven electron acceleration in hydrogen pair-ion plasma containing electron impurities", *Laser Part. Beams*, **36**, 203-209, 2018. <https://doi.org/10.1017/S0263034618000174>
- [6] Kargarian, A., Hajisharifi, K. and Mehdian, H., "Plasma inhomogeneity effects on particles energization by high-power laser pulse in a finite-size plasma", *Waves in Random and Complex Media*, **32**, 2980-2990, 2022. <https://doi.org/10.1080/17455030.2021.1873454>
- [7] Kargarian, A., "Particle energization by high-power laser pulse in a finite-size electron-positron-ion plasma", *Laser Physics*, **30**, 096002, 2020. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aba9dd>
- [8] Braunmüller, F., Nechaeva, T., Adli, E., Agnello, R., Aladi, M., Andrebe, Y., Apsimon, O., Apsimon, R., Bachmann, A.M., Baistrukov, M.A. and Batsch, F., "Proton bunch self-modulation in plasma with density gradient", *Physical review letters* **125**, 264801, 2020. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.264801>
- [9] Trines, R.M., Bingham, R., Najmudin, Z., Mangles, S., Silva, L.O., Fonseca, R. and Norreys, P.A., "Electron trapping and acceleration on a downward density ramp: a two-stage approach", *New Journal of Physics*, **12**, 045027, 2010. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/12/4/045027>
- [10] Aniculaesei, C., Pathak, V.B., Kim, H.T., Oh, K.H., Yoo, B.J., Brunetti, E., Jang, Y.H., Hojbota, C.I., Shin, J.H., Jeon, J.H. and Cho, S., "Electron energy increase in a laser wakefield accelerator using up-ramp plasma density profiles", *Scientific Reports*, **9**, 11249, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47677-5>
- [11] Pishdast, M., Yazdanpanah, J. and Ghasemi, S.A., "Electron acceleration by an intense laser pulse inside a density profile induced by non-linear pulse evolution", *Laser and Particle Beams*, **36**, 41-48, 2018. <https://doi.org/10.1017/S0263034617000970>
- [12] Pishdast, M., Ghasemi, S.A. and Yazdanpanah, J., "The effect of density scale length on the plasma scattering and heating in relativistic laser interaction with under dense plasma", *Journal of Nuclear Science and Technology (JonSat)*, **40**, 119-129, 2019. <https://doi.org/10.24200/nst.2019.1032>
- [13] Kaur, M. and Gupta, D.N., "Electron energy optimization by plasma density ramp in laser wakefield acceleration in bubble regime", *Laser and Particle Beams*, **36**, 195-202, 2018. <https://doi.org/10.1017/S0263034618000162>
- [14] Pukhov, A. and Meyer-ter-Vehn, J., "Laser wake field acceleration: the highly non-linear broken-wave regime", *Applied Physics B*, **74**, 355-361, 2002. <https://doi.org/10.1007/s003400200795>



- [15] Kostyukov, I., Pukhov, A. and Kiselev, S., "Phenomenological theory of laser-plasma interaction in "bubble" regime", *Physics of Plasmas*, **11**, 5256-5264, 2004. <https://doi.org/10.1063/1.1799371>
- [16] Lehe, R., Kirchen, M., Jalas, S., Peters, K. and Dornmair, I., "Fourier-Bessel Particle-In-Cell (FBPIC) v0. 1.0", Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), Berkeley, CA (United States), 2017.
- [17] Hockney R.W., Estwood J.W., "Computer Simulation Using Particles", McGraw-Hill, New York, 1981.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).