«علوم وفاوری بی پافند نوین» سال پانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳؛ ص ۴۴–۳۷

علمى- پژوهشى

بررسی تأثیر پارامترهای لیزری لاگر – گاوس بر شتاب ذرات باردار در میدان دنباله لیزری سیدابوالحسن میرمحمدحسینی'، ابراهیم حاجی علی<sup>۲۰</sup>، غلامرضا اطاعتی<sup>۳</sup>، مهدی اتحادی ابری<sup>۴</sup>، علی شکاری<sup>۵</sup> ۱- دانشجوی دکتری ، ۲- استادیار، ۵- پژوهشگر دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۳- استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۴- پژوهشگر دانشگاه شهید بهشتی

(دريافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰، پذيرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲، انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱

چکیدہ

 $\odot$ 

این مقاله به پدیدهٔ شتابدهی میدان دنباله با استفاده از پالس لیزری لاگِر – گاوس (LG) میپردازد. به طور خاص، چگونگی تأثیر ویژگیهای پالس لیزر، مانند تابع چرپ، مقدار چرپ، قطر کمر باریکه و دامنه پالس، بر تولید میدان دنباله و شتابدهی الکترونها را بررسی میکند. این مطالعه، دینامیک شتابدهی میدان دنباله تحتتأثیر پالس لیزری LG چرپ شده و پلاسما را بررسی میکند. از طریق تحلیل دقیق، این مقاله مکانیسمهای نهفته در این فرایند را توضیح میدهد و پتانسیل بهینهسازی پارامترها را برای افزایش کارایی شتابدهی میدان دنباله، مورد بررسی قرار میدهد. نتایج این تحقیقات، اطلاعاتی درباره مؤثرترین پیکربندیها برای دستیابی به اهداف خاص در برهمکنش بین پالس لیزر و پلاسما ارائه میدهد.

**کلیدواژهها:** لیزر لاگر - گاوس، میدان دنباله، تابع چرپ، شتابدهنده لیزر - پلاسما.

# Investigation of the Effect of Laguerre-Gauss Laser Pulses on Charged Particle Acceleration in Wakefield

A. Mir Mohammad Hosseini, E. HajiAli\*, G. R. Etaati, M. Ettehadi Abri, A. Shekari

Imam Hossein University, Tehran, Iran (Received:2024/03/05, Revised: 2024/04/18, Accepted: 2024/05/01, Published: 2024/05/31) DOR: https://dorl.net/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.3.1.5

### Abstract

This paper focuses on the phenomenon of wakefield acceleration using Laguerre-Gauss (LG) laser pulses. Specifically, it examines how laser pulse characteristics, such as chirp function, chirp amount, beam waist size, and pulse amplitude, affect wakefield generation and electron acceleration. The study explores the dynamics of wakefield acceleration influenced by chirped LG laser pulses and plasma. Through detailed analysis, the paper explains the mechanisms underlying this process and investigates the potential for optimizing parameters to enhance wakefield acceleration efficiency. The results of this research provide insights into the most effective configurations for achieving specific objectives in the interaction between laser pulses and plasma.

Keywords: Laguerre-Gauss laser, Wakefield, Chirp function, Laser-Plasma accelerator.

\*Corresponding Author E-mail: seyedaminmousavi@ihu.ac.ir Advanced Defence Sci.& Technol., 2024, 1, 37-44

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University (C) Authors

#### ۱. مقدمه

در سالهای اخیر، جستجو برای روشهای شتابدهی ذرات باانرژی بالا رونق یافته است که این امر ناشی از تقاضا برای شتاب-دهندههای کوچک و کارآمد در کاربردهای علمی و صنعتی متنوع است[1,1]. یکی از روشهای امیدوارکننده که توجه زیادی را به خود جلب کرده است، شتابدهی میدان دنباله با استفاده از پالس لیزری لاگر – گاوس (LG) دارای چرپ است[۵–۳]. این رویکرد از ویژگیهای منحصربهفرد پالس لیزری LG دارای چرپ برای ایجاد میدان دنباله در یک محیط پلاسما و درنتیجه شتابدهی ذرات باردار به انرژیهای بالا در فواصل نسبتاً کوتاه استفاده میکند [۶-].

مفهوم شتابدهی میدان دنباله شامل استفاده از پالس لیزر با شدت برای ایجاد یک میدان دنباله هنگام حرکت از درون یک محیط پلاسما است[۹–۷]. این میدان دنباله سپس میتواند برای شتابدهی ذرات باردار، مانند الکترونها یا پوزیترونها، به سرعت-های بالا استفاده شود[۱۳–۱۰]. پالس لیزری IG دارای چرپ که با توزیع شدت فضایی و نمایه زمانی چرپ شده خود مشخص می-شود، در مقایسه با پالسهای لیزری معمولی، مزایای متعددی برای تولید میدان دنباله دارد[۳,۴,۱۴].

محققان می توانند با استفاده از روش تغییر مدولاسیون پالس لیزر، سرعت فاز پالس لیزر نسبت به الکترونهای پلاسما را به طور دقیق کنترل کنند و شرایط بهینه برای برانگیختن میدان دنباله را بیابند[۱۰٫۱۵٫۱۶]. علاوه بر این، ساختار فضایی پالس لیزر LG چرپ شده امکان دستکاری هدفمند ویژگیهای میدان دنباله مانند دامنه و فاز آن را فراهم میکند و کنترل بر فرآیند شتاب-دهی را افزایش میدهد[۴,۱۴٫۱۷].

در این مقاله، ما به اصول اساسی شتابدهی میدان دنباله با استفاده از پالسهای لیزر LG چرپ می پردازیم. ما به بررسی پویایی بر همکنش بین پالس لیزر و محیط پلاسما می پردازیم و اینکه چگونه ماهیت چرپ پالس لیزر LG بر تولید میدان دنباله تأثیر می گذارد. از طریق تحلیل نظری و شبیه سازی های عددی جزئی با استفاده از برنامه Mathematica و ترسیم نمودار میدان دنباله لیزری بر اساس پارامترهای مورد بررسی، ما به دنبال ارائه بینش های نوآورانه در مورد سازوکارهای حاکم بر این تکنیک شتاب دهی نو هستیم.

#### ۲. روش تحقیق

در این بخش، ما برهم کنش پالس لیزر شدت بالا و پلاسما را ارائه میدهیم و با توسعه یک مدل سیال سرد یک بعدی غیر خطی[۲۰-۱۸]، میدان تولیدشده را محاسبه می کنیم که می تواند به ما در درک برخی از ویژگیهای اساسی میدان دنباله پلاسمایی ایجاد

شده توسط لیزر لاگر – گاوس کمک کند. بعداً یک مدل سهبعدی توسعه داده خواهد شد. در مدل یک بعدی فرض می کنیم، یونهای پلاسما به دلیل جرم بسیار بیشتر آنها و انتشار سریع پالس لیزر، ثابت می مانند. ذرات تشکیل دهنده پلاسما در ابتدا به گونهای فرض شدهاند که به ما اجازه می دهد تأثیرات حرکت حرارتی الکترونها را در محاسبات نادیده بگیریم [۲۱].

اکنون می توان پارامتر بی بعد شده چگالی N، ( $N_g = \beta_g \gamma_g^2 (\frac{1}{Y} - \beta_g)$ ، N اکنون می توان پارامتر بی بعد شده چگالی N,  $\gamma_g = (1 - \beta_g^2)^{-1/2}$ ,  $\beta_g = v_g / c$  فاکتور لورنتس,  $v_g$  سرعت گروه و  $\sum_{i=1}^{N} (1 - \frac{1 + a^2}{\gamma_g (1 + \Phi)^2})^{i}$  است را در معادله پواسون جایگزین کرد تا معادله دیفرانسیل نهایی که میدان دنباله را ازطریق پتانسیل دنباله  $\Phi$  توصیف می کند، بدست آید[۲۲].

$$\frac{\partial^{2} \Phi}{\partial \zeta^{2}} = \beta_{g}^{2} \gamma_{g}^{2} \left\{ \frac{\beta_{g}}{Y} - 1 \right\}$$

$$= \beta_{g}^{2} \gamma_{g}^{2} \left\{ \beta_{g} \frac{(1+\Phi)/(1+a^{2})^{1/2}}{\left[ (1+\Phi)^{2}/(1+a^{2}) - \gamma_{g}^{-2} \right]^{1/2}} - 1 \right\}$$
(1)

برای استخراج این معادله، پالس لیزر بهعنوان پالس قطبش دایروی در نظر گرفتهشده است. درحالیکه، برای پالس لیزر با قطبش خطی، باید  $a^2$ ، با  $2^{2/2}$  جایگزین شود. میدان الکتریکی بی بعد،  $a^{2}_{ey} = eE_{z} / m_{e}v_{g} \omega_{p}$  بی بی بیدست می آید [۲۲]:

$$\varepsilon_{z} = -\left(\frac{1}{\beta_{g}}\right)^{2} \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \tag{7}$$

معادله (۱) یک معادله دیفرانسیل غیرخطی است که بهطورکلی باید بهطور عددی حل شود. بااینحال، میتواند برای شدتهای پایین (1»a) که بهعنوان رژیم خطی میدان پالس لیزر شناخته میشود، بهطور تحلیلی حل شود. در حد  $P_g^{}$ ، معادله (۱) ساده میشود[۲۲].

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \zeta^2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1+a^2}{\left(1+\Phi\right)^2} - 1 \right] \tag{(7)}$$

با استفاده از معادله (۳)، میدان پالس لیزر را برای یک پالس لیزر LGکه توسط دامنه بیبعد زیر توصیف میشود، محاسبه کردهایم.

$$a_{L}(\zeta, r) = a_{0}(\frac{\sqrt{2}r}{w_{0}})^{||} Exp(-\frac{r^{2}}{w_{0}^{2}}) Exp(-\frac{\zeta^{2}}{\tau^{2}}) L_{p}^{||}(2r^{2}/w_{0}^{2}) cos(\phi(\zeta))$$
 (\*)

 $\omega_p \tau = 2/82$  ،  $k_p w_0 = 8/5$  ،  $a_0=0/5$  در اینجا $\zeta = (z - v_g t), t = \omega_p \tau$ - مورت زیر است:

$\varphi(\zeta) = \zeta$	Non-chirp	
$\varphi(\zeta) = \zeta(1 + \alpha \zeta)$	Linear-chirp	(ω)

 $\varphi(\zeta) = \zeta (1 + \alpha Exp[-(b\zeta)^2])$ Gaussian-chirp

Quadratic-chirp

 $\varphi(\zeta) = \zeta(1 + \alpha(\zeta)^2)$ به ترتيب، توابع چرپ برای پالس LG بدون چرپ، چرپ خطی،

چرپ گاوسی و چرپ مرتبه دو هستند که در آن b مقدار ثابت و بهعنوان ضريب چرپ تعريف شدهاند. lpha

#### ۳. نتایج و بحث

در این بخش، مطالعه عددی تولید میدان دنباله توسط یالس لیزر LG چرپ شده که از طریق پلاسمای همگن کم تراکم منتشر می-شود را بررسی میکنیم. ما از یک پالس لیزر با مدتزمان FWHM  $k_p w_0 = 8/5$  بىبعد 2/82 و اندازە لكە پالس بىبعد  $\omega_p \tau = 2/82$ استفاده می کنیم. مرکز پالس لیزر در موقعیت  $k_{n}\zeta = 0$  قرار دارد. فرض می شود که تمام الکترون ها باانرژی اولیه  $\gamma_0 = 10 MeV$  در موقعیت اولیه  $k_{n}\zeta_{0} = -6$  به سمت مسیر انتشار پالس لیزر تزریق مىشوند. بەعنوان مثال، با درنظر گرفتن تراكم پلاسما توسط معادله فركانس يلاسما تعريفشده بهصورت:

$$\omega_p = 5 / 64 \times 10^4 \sqrt{n_0}$$

$$k_p = \frac{\omega_p}{c}$$
(5)

د، مدتزمان  $k_p = 1/88 \times 10^5$  و  $\omega_p = 5/64 \times 10^{13}$ پالس ليزر برابر با 50 فمتوثانيه و قطر كمر پالس برابر با .ست.  $w_0 = 45 \mu m$ 

شکل (۱) توزیع شدت پالس را برای سه تابع چرپ نشان می-دهد. در شکلهای بعدی، ما شکل و مدتزمان پالسهای لیزر را برای توابع چرپ مختلف، یکسان در نظر می گیریم. در شبیه سازی، تمام پالسها در  $k_{n}\zeta = 0$  متمرکز هستند. و ضرایب چرپ اولیه در شبیهسازی برای توابع چرپ b=0.0592 در نظر گرفتهشدهاند. حال با تمركز براثر چرپ، اثر دامنه پالس و اثر قطر كمر (اندازه لكه) پالس بر دامنه میدان دنباله در شتابدهی میدان دنباله لیزری مىپردازيم.

## ۱–۳. تأثیر چرپ پالس

با بررسی توابع چرپ مختلف و پروفایلهای میدان دنباله مربوطه، این مطالعه نتایج با ارزشی را در مورد بهینهسازی پارامترهای چرپ برای افزایش شتابدهی میدان دنباله ارائه میدهد. هنگامی که فاز پروفایل پالس لاگر - گاوس وابستگی زمانی داشته باشد، نهتنها پالس ليزر چرپ میشود، بلکه طيف آن نيز کاملاً تغيير می کند. این موضوع پروفایل شدت پالس لیزر را برای چهار تابع چرپ نشان مىدهد. درنتيجه، پروفايل پالس ليزر نامتقارن مىشود و تقارن نوسان موج نیز شکسته می شود. مطالعات قبلی در مورد نقش نامتقارنیهای پروفایل لیزر در میدان دنباله نشان دادهاند که افزایش سریع شدت لیزر می تواند میدان دنباله بزرگ تری را ایجاد

کند. در اینجا تحلیلی از مشاهدات ما در مورد چرپ خطی، چرپ چندجملهای مرتبه دو و چرپ گاوسی ارائه میشود:

**چرپ خطی**: چرپ خطی مثبت به معنی آن است که فرکانس لحظهای پالس لیزر به طور خطی با زمان افزایش مییابد. با چرپ مثبت، مؤلفههای فرکانسی یالس بهطوری مرتب شدهاند که فرکانسهای پایین تر قبل از فرکانسهای بالاتر قرار دارند. افزایش تند پروفایل پالس را میتوان به رابطه فازی بین مؤلفههای فركانسى نسبت داد. همانطور كه فركانس افزايش مىيابد، فاز سريعتر تجمع مىيابد كه منجر به شيب تندتر در پروفايل زمانى پالس مىشود.

چرپ چندجملهای مرتبه دو: برای چرپ مرتبه دوم، شدت پالس لیزر تقریباً بهصورت یک پروفایل متقارن با نوسان کوتاه ناشی از اثرات غیرخطی ایجادشده ناشی از فاز پالس، مشاهده می-شود.

**چرپ گاوسی**: نمودار پالس چرپ گاوسی یک پروفایل زمانی ساده دارای تقارن را به دلیل مدولهسازی فرکانسی ایجادشده توسط جزء  $Exp(-b\zeta)^2$  نشان میدهد و نوسانات ناپدید میشوند. یک تابع چرپ گاوسی را میتوان با تغییر فرکانس لحظهای با زمان تعريف كرد.



شکل ۱. شدت پالس نرمال شده لیزر برای چهار تابع چرپ متفاوت برحسب طول انتشار نرمال.

شکل (۲) میدان دنباله ایجاد شده توسط سه تابع چرپ مختلف را نشان میدهد. برای رسیدن به حداکثر شتابدهی الکترون در یک سیستم میدان دنباله، بهینهسازی توابع چرپ ضروری است.

از طرف دیگر، انتخاب توابع چرپ بر سرعت فاز و دامنه میدان دنباله که برای انتقال کارآمد انرژی به الکترونها حیاتی هستند تأثیر میگذارد. از شکل (۲) دریافت میشود که دامنه میدان برای تابع چرپ گاوسی و مرتبه دو در ناحیه مقادیر منفی چرپ اوج میگیرد، درحالی که برای تابع چرپ خطی، حداکثر دامنه میدان دنباله در ناحیه مثبت مقدار ثابت چرپ رخ می دهد؛ بنابراین، برای دسترسی به حداکثر شتاب دهی الکترون در داخل میدان دنباله، باید از تابع چرپ گاوسی و مرتبه دوم با چرپ منفی و تابع چرپ خطی با چرپ مثبت استفاده کرد. در ادامه جدول (۱) مقادیر بهینه چرپ برای هر تابع چرپ که حداکثر میدان دنباله را تولید می کنند ارائه شده است.

**جدول ۱**. مقادیر بهینه چرپ برای توابع چرپ متفاوت

ثابت چرپ با حداکثر دامنه میدان دنباله	تابع چرپ
$+ \cdot / Y \Delta$	خطى
-• <i>\</i> 9	گاوسی
-•/Y	مرتبه دو



**شکل ۲. تغ**ییرات دامنه میدان دنباله برحسب ثابت چرپ برای چرپ خطی (خط)، چرپ گاوسی (خطچین) و چرپ مرتبه دوم (نقطه خط)

در شکلهای (۳ و ۴)، تغییرات میدان دنباله برای چهار پروفایل چرپ مختلف نشان داده شده است. در شکل (۳)، نمودارها برای مقادیر مثبت چرپ رسم شدهاند. برای مقادیر مثبت چرپ، پالس تابع چرپ خطی دامنه میدان دنباله بالاتری را نسبت به سایر توابع چرپ تولید می کند.

تحلیل میدان دنباله برای توابع چرپ مختلف حاکی از نتایج مهمی برای بهینهسازی شتابدهی الکترون است. شکل (۴) میدان دنباله را با درنظر گرفتن یک عامل چرپ منفی نشان میدهد. این شکل نشان میدهد که چرپ گاوسی و مرتبه دوم با یک عامل چرپ منفی به طور قابل توجهی میدان دنباله را افزایش میدهد. این نشاندهنده بیشترین اثر چرپ نمایی منفی بر دامنه میدان دنباله است و اهمیت آن در حداکثرسازی شتاب دهی الکترون را نشان میدهد.



شکل ۳. تغییرات میدان دنباله برای چهار تابع چرپ متفاوت (چرب مثبت)



برای بررسی افزایش انرژی، ما نتایج شبیهسازی را برای همه توابع چرپ ارائه میدهیم. شکل (۵) میانگین انرژی الکترونهای آزمایشی شتابیافته و پراکندگی انرژی نسبی ('RES) را در طول فاز تزريق نشان ميدهد. همانطور كه نشاندادهشده است، هم میانگین انرژی و هم پراکندگی در طول زمان تغییر میکند. با مقایسه تمام نتایج، مشاهدهشده است که در میان توابع چرپ، بیشترین افزایش انرژی برای تابع چرپ گاوسی حاصل میشود که به میانگین انرژی ۴۶۰ MeV و پراکندگی حدود ۸٪ منجر می شود. از طرفی، برای تابع چرپ مرتبه دوم، حداکثر افزایش انرژی ۳۲۵MeV با پراکندگی انرژی ۸٪ است و حداکثر افزایش انرژی برای تابع چرپ خطی ۴۰۰MeV با پراکندگی انرژی ۵٪ است که کمتر از چرپ نمایی است؛ بنابراین، نتایج تضمین میکنند که شتابدهی با چرپ گاوسی باعث افزایش انرژی بیشتر میشود درحالى كه تابع چرپ خطى به دسته الكترون باكيفيت بالاترى منجر می شود. در یک تابع چرپ خطی، فاز پالس به طور خطی با فركانس تغيير ميكند. اين تغيير خطي ميتواند پراكندگي انرژي

دسته را مؤثرتر با فاز شتابدهنده میدان دنباله هماهنگ کند. این هماهنگی میتواند به انتقال انرژی بهتر از میدان دنباله به الکترون آزمایشی و بهاینترتیب افزایش انرژی آن منجر شود. در جدول (۲) نتایج برای همه توابع چرپ خلاصهشده است.



**شکل ۵.** نمودار متوسط انرژی و پراکندگی انرژی برای توابع چرپ خطی، گاوسی و مرتبه دوم

جدول ۲. مقادیر متوسط انرژی و پراکندگی انرژی برای توابع چرپ خطی، گاوسی و مرتبه دوم

L=I		
پراکندگی انرژی	میانگین انرژی	پارامترها
(/.)	(MeV)	
۵	4	چرپ خطی
٨	48.	چرپ گاوسی
٨	۳۲۵	چرپ مرتبه دوم
Y	١٧٨	بدون چرپ

انرژی RES بهعنوان  $\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{F}}$  تعریف می شود، که در آن  $\Delta \Delta$ عرض RES و ٤ انرژی مرکزی در طیف انرژی است. در شکل(۶)، تغییرات RES ( $\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{F}}$ ) با مقدار چرپ برای سه تابع چرپ متفاوت نشانداده شده است. در این نمودار نشان داده شده است که تغییرات RES برای تابع چرپ خطی نسبت به دو تابع چرپ گاوسی و مرتبه دوم، منطبق بر اطلاعات ارائه شده در جدول (۲) است.

در شتابدهی میدان دنباله، تابع چرپ پالس لیزر محرک نقش مهمی در شکلدهی گسترش انرژی الکترونهای شتاب داده شده دارد. برهمکنش بین دسته چرپ شده و میدان دنباله می-تواند به پدیدههای پیچیدهای؛ مانند مدوله شدن میدان دنباله یا اثر کانونی شدن تغییریافته منجر شود. این برهمکنشها میتوانند توزیع انرژی دسته را تغییر دهند. بهعنوانمثال، یک دسته چرپ مثبت ممکن است در بخشهای مختلف دسته شتاب بیشتر یا ممتری را تجربه کند که منجر به افزایش کلی گسترش انرژی میشود. یک چرپ کنترلشده خوب میتواند به یک میدان شتاب-دهنده یکنواختتر منجر شود و گسترش انرژی را کاهش دهد. کمترین RES برای تابع چرپ گاوسی به یک مقدار چرپ منفی و کمترین نشان میدهد که برای تابع چرپ، همگامسازی بهتر با موج پلاسما در مقادیر منفی/مثبت چرپ وجود دارد.



**شکل ۶**. تغییرات RES با مقادیر چرپ برای توابع چرپ خطی، مرتبه دوم و گاوسی

#### ۳-۲. تأثیر دامنه و قطر کمر باریکه لیزر

دامنه یک لیزر تأثیر قابلتوجهی بر مشخصات و بازده تولید میدان دنباله در سازوکارهای شتابدهی میدان دنباله لیزر دارد. دامنهٔ لیزر بالاتر باعث افزایش شدت میدان الکتریکی میدان دنباله می-شود. دامنه میدان دنباله متناسب با دامنه میدان الکتریکی لیزر است، به این معنی که پالسهای لیزر قویتر میتوانند میدان دنباله قویتری را تحریک کنند. در دامنههای بالا، اثرات غیرخطی مهم میشوند.

اندازه لکه یک پالس لیزر پارامتر مهمی در تعیین مشخصات میدان دنباله تولیدشده در شتابدهی میدان دنباله لیزری است. اندازه لکه بر توزیع شدت پالس لیزر تأثیر می گذارد. اثر اندازه لکه لیزر بر میدان دنباله نشان میدهد که دامنه میدان دنباله بهشدت بهاندازه لکه پالس لیزر بستگی دارد (شکل). مشاهده شده است که با افزایش قطر لکه، شدت میدان دنباله تا رسیدن به مقدار بیشینه به سرعت افزایش داشته و با ادامه افزایش قطر لکه، شدت میدان دنباله با سرعت کمتری به مقدار یکسانی همگرا میشود. اندازه لکه  $5/8 = w_p N$  برای L=1 شدت و طول برهم کنش کافی را تأمین می کند.

با تنظیم دستگاههای لیزر در اندازه کمر باریکه مدنظر، دامنه میدان دنباله و کارایی شتاب ذرات را میتوان به حداکثر رساند. اندازه کمر باریکه بهینهشده باعث میشود که پالس لیزر، شدت و طول برهمکنش لازم را برای ایجاد میدان دنباله قوی حفظ کند.



**شکل ۷.** تغییرات دامنه میدان دنباله با اندازه کمر باریکه برای دو دامنه پالس لیزر

در شکل (۸)، افزایش انرژی برای توابع چرپ لیزر مختلف نمایش داده شده است. با مقایسه منحنیها برای دو دامنه لیزر  $a_0=0.5$  و  $a_0=0.7$ ، میتوان مشاهده کرد که چگونه افزایش دامنه لیزر برافزایش انرژی تأثیر میگذارد. مقدار دامنه کمتر منجر به انتقال انرژی کمتر به ذرات و مقدار دامنه بالاتر که بهطورکلی نشان-

دهنده میدان لیزر قویتر است، منجر به انرژی بالاتر برای ذرات در برهمکنش با لیزر، میشود. افزایش قدرت میدان لیزر، برهمکنش بین الکترونها را بهبود میبخشد که منجر به انتقال انرژی و شتابدهی مؤثرتر میشود. این برهمکنش بهبودیافته منجر به افزایش انرژی بیشتر میشود، بهطوریکه انرژی الکترون حداکثر به ۸۰۰MeV میرسد. برای تمام توابع چرپ، افزایش دامنه از 2.5–0هه 7.7–0ه باعث افزایش تقریبی ۱۰۰٪ انرژی میشود.



شکل ۸. منحنی انرژی ذرات برای دو دامنه پالس لیزری متفاوت

Relativistic Plasma"; Eur. Phys. J. Plus, 2022, 137, 8, 885, doi: 10.1140/epjp/s13360-022-03054-2.

- [7] Wenz, J.; Karsch, S. "Physics of Laser-Wakefield Accelerators (LWFA)"; arxive/2007.04622, 2020, doi: 10.48550/arXiv.2007.04622
- [8] Krushelnick, K.; Malka, V. "Laser Wakefield Plasma Accelerators"; Laser Photonics Rev. 2010, 4, 42–52, doi: 10.1002/lpor.200810062.
- [9] Malka ,V. "Plasma Wake Accelerators: Introduction and Historical Overview"; CAS-CERN Accel. Sch. Plasma Wake Proc., 2014, 1-28, doi: 10.5170/CERN-2016-001.1.
- [10] Tajima ,T.; Yan, X. Q.; Ebisuzaki, T. "Wakefield Acceleration"; 2020, 4, 1, doi: 10.1007/s41614-020-0043-z
- [11] Corde, S.; Adli, E.; Allen, J. M.; An, W.; Clarke, C. I.; Clayton, C. E.; Delahaye, J. P.; Frederico, J.; Gessner, S.; Green, S. Z.; Hogan, M. J.; Joshi, C.; Lipkowitz, N.; Litos, M.; Lu, W.; Marsh, K. A.; Mori, W. B.; Schmeltz, M.; Vafaei-Najafabadi, N.; Walz, D.; Yakimenko, V.; Yocky, G. "Multi-Gigaelectronvolt Acceleration of Positrons in a Self-Loaded Plasma Wakefield"; Nature 524, 7566, 442–445, 2015, doi: 10.1038/nature14890.
- [12] Muggli, P.; Hogan, M. J. "Review of High-Energy Plasma Wakefield Experiments"; Comptes Rendus Phys. 2009, 10, 2– 3, 116–129. doi: 10.1016/j.crhy.2009.03.004.
- [13] 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.; Reiman, O.; Ruhl, H.; Shaposhnikova, E.; Silva, L. O.; Sosedkin, A.; Tarkeshian, R.; Trines, R. G. M. 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, 8. doi: 10.1088/0741-3335/56/8/ 084013.
- [14] Yang, Y.; Li, Y.; Wang, C. "Generation and Expansion of Laguerre–Gaussian Beams"; J. Opt. 2022, 51, 910–926. doi: 10.1007/s12596-022-00857-5.
- [15] Esarey, E.; Schroeder, C. B.; Leemans, W. P. "Physics of Laser-Driven Plasma-Based Electron Accelerators"; Rev. Mod. Phys. 2009, 81, 1229–1285. doi: 10.1103/RevModPhys. 81.1229.
- [16] Ghotra, H. S. "Laser Wakefield and Direct Laser Acceleration of Electron by Chirped Laser Pulses"; Optik (Stuttg) 2022, 260, 169080. doi: 10.1016/j.ijleo.2022.169080.
- [17] Upadhyay, A. K.; Samant, S. A.; Krishnagopal, S. "Tailoring the Laser Pulse Shape to Improve the Quality of the Self-Injected Electron Beam in Laser Wakefield Acceleration"; Phys. Plasmas 2013, 20, 1–11. doi: 10.1063/1.4775726.
- [18] Kad, P.; Singh, A. "Combined Effect of Spatio-Temporal Dynamics of Laser Pulse on Electron Acceleration in Relativistic Plasma"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2022, 50, 1518–1523. doi: 10.1109/TPS.2021.3124548.
- [19] Maslov, V.; Bondar, D.; Levchuk, L.; Onishchenko, I. "Improvement of Properties of Self-Injected and Accelerated Electron Bunch By Laser Pulse in Plasma, Using Pulse Precursor"; East Eur. J. Phys. 2019, 2, 64–68. doi: 10.26565/2312-4334-2019-2-10.
- [20] Debayle, A.; Sanz, J.; Gremillet, L.; Mima, K. "Toward a Self-Consistent Model of the Interaction between an Ultra-Intense, Normally Incident Laser Pulse with an Overdense Plasma"; Phys. Plasmas 2013, 20, 5. doi: 10.1063/1.4807335.

مطالعه بر روی شتابدهی میدان دنباله با پالس چرپ شده LG، نتایج قابلتوجهی را در مورد رفتار میدانهای دنباله ایجاد شده توسط توابع چرپ مختلف برای پالس لیزری LG ارائه میدهد. این مطالعه نشان میدهد که چرپ کردن پالس لیزر LG به طور قابل-توجهی بر دامنه میدان دنباله و در نتیجه، افزایش انرژی ذرات باردار دارد. با درک اینکه چگونه تابع چرپ بر دامنه و توزیع میدان دنباله تأثیر می گذارد، محققان می توانند تابع چرپ را برای رسیدن به نتايج شتابدهی مطلوب بهينه كنند. نتايج نشان میدهد كه تابع چرپ شده گاوسی و چرپ چندجملهای مرتبه دوم، بیشترین دامنه میدان را در ناحیه چرپ منفی و تابع چرپ خطی بیشترین دامنه میدان دنباله را در مقادیر چرپ مثبت ایجاد میکند که نشان میدهد برخی از یروفایلهای چرپ میتوانند تحت شرایط خاص، دامنه میدان دنباله را افزایش دهند. از طرف دیگر، تنظیم اندازه لکه به مقادیر بهینه آن میتواند کارایی و کیفیت شتابدهی میدان دنباله لیزری را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. دستگاه-های لیزری میتوانند با اندازه کمر باریکه خاص تنظیم شوند تا بهترین عملکرد ممکن را در تولید میدان دنباله و شتابدهی ذرات به دست آورند؛ بنابراین، نتایج برای بهترین مقدار قطر کمر باریکه پالس برای همه توابع چرپ بهینهسازی شدهاند. نتایج نشان می-دهد که برای هر سه تابع چرپ خطی و گاوسی و مرتبه دوم، قطر كمر باريكه بهينه يكسان است. اين نشان ميدهد كه رابطه بين نوع چرپ و اندازه لکه بهینه در میان توابع چرپ مختلف پایدار است. این بهینهسازی برای حداکثرکردن کارایی شتابدهی میدان دنباله در تولید پرتوهای ذرات باانرژی بالا در دستگاههای کوچک بسیار حیاتی است.

#### ۵. مرجعها

۴. نتیجهگیری

- Petrosian, V.; Bykov, A. M. "Particle Acceleration Mechanisms"; Clusters of Galaxies: Beyond the Thermal View, J. Kaastra, Ed. New York, NY: Springer New York, 2008, 207–227, doi.org/10.1007/978-0-387-78875-3\_11
- [2] Aharonian, F. A.; Akhperjanian, A. G.; Aye, K. "High-energy Particle Acceleration in the Shell of a Supernova Remnant"; Nature. 2004, 432, 75–77, doi: 10.1038/nature02960
- [3] Firouzjaei, A. S; Akou, H. "Analysis of Frequency Chirping on the Electron Bunch Acceleration During Laguerre-Gauss Laser Interaction"; J. Opt. Soc. Am. B, 2023, 40, 1953–1959, doi: 10.1364/JOSAB.487577.
- [4] Akou, H.; Firouzjaei, A. S. "Direct Electron Bunch Acceleration by Laguerre-Gauss Laser Pulse"; Phys. Plasmas 2020, 27, 93-102, doi: 10.1063/5.0015456.
- [5] Zhang, G. B.; Chen, M.; Schroeder, C. B.; Luo, J.; Zeng, M.; Li, F. Y.; Yu, L. L.; Weng, S. M.; Ma, Y. Y.; Yu, T. P.; Sheng, Z. M.; Esarey, E. "Acceleration and Evolution of a Hollow Electron Beam in Wakefields Driven by a Laguerre-Gaussian Laser Pulse"; Phys. Plasmas 2016, 23, 3, doi: 10.1063/1.4943892.
- [6] Kad, P.; Singh, A. "Electron Acceleration and Spatio-Temporal Variation of Laguerre-Gaussian Laser Pulse in

- [21] Geddes, C. G. R. "Plasma Channel Guided Laser Wakefield Accelerator"; University of California, Berkeley, 2005.
- [22] Salamin, Y. I. and Keitel, C. H. "Analysis of Electron Acceleration in a Vacuum Beat Wave"; J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys. 2000, 33, 5057–5076. doi: 10.1088/0953-4075/33/22/308.