

## شتاب الکترون در برهم کنش با پالس لیزری نامتقارن

مینا اخیانی، محمد رضایی پندری، فاضل جهانگیری، علیرضا نیکنام و رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

پست الکترونیکی: r-massudi@sbu.ac.ir

### چکیده

در این مقاله شتاب الکترون در برهم کنش با میدان پالس لیزری مورد بررسی قرار می گیرد. به منظور محدود کردن ناحیه برهم کنش الکترون با پالس، که لازمه دستیابی به شتاب است، روش جدیدی مبتنی بر تزریق الکترون در قله زمانی پالس ارائه می شود. در این روش الکترون از یک منبع پلاسمایی تولید شده و با استفاده از میدان مغناطیسی به مسیر باریکه لیزر هدایت می شود و لحظه برهم کنش آن با پالس لیزری برای بیشترین بهره تنظیم می گردد. همچنین وابستگی بهره الکترون به طول و فاز اولیه پالس و زاویه تزریق الکترون مطالعه و مقادیر بهینه آنها به دست آمده است.

واژه های کلیدی: پالس لیزری نامتقارن، شتاب، الکترون

### ۱. مقدمه

از آنجا ناشی می شود که قدرت میدان الکتریکی در نقطه کانونی لیزرهای پرتوان امروزی به  $10^{13}$  V/m می رسد، که تقریباً هزار برابر میدانی است که بین الکترون و پروتون در اتم هیدروژن وجود دارد و حدود یک میلیون برابر میدانی که به صورت ایستایی در آزمایشگاه تاکنون ساخته شده است [۶].

تاکنون مطالعات زیادی بر روش های شتاب لیزری در پلاسما [۷-۹] و در خلأ [۱۰-۱۲] گزارش شده است که دستیابی به شتاب در هر کدام شرایط مختص خود را دارد. در خلأ یک ذره باردار نمی تواند در برهم کنش نامحدود با یک موج الکترومغناطیس تحت متقارن شتاب بگیرد، هر چند ممکن است در فاصله محدودی در فضا جابه جا شود. این مفهوم که به عنوان قضیه لاوسون-وودوارد [۱۳] شناخته می شود، شروطی را برای دستیابی به شتاب غیر صفر در خلأ

شتابگرهای متداول امروزی قادر به تولید ذرات باردار با انرژی های بالا هستند که علاوه بر مطالعات فیزیک بنیادی در دیگر حوزه های کاربردی از جمله پزشکی نیز مورد توجه روز افزون قرار گرفته اند [۱، ۲]. اما محدودیت های این شتاب دهنده ها که عمدتاً ناشی از هزینه های گزاف و ابعاد بزرگ آنهاست، باعث شده است که مطالعه روی دیگر روش های جایگزین شتابدهی نیز مورد توجه فراوان قرار گیرد [۳]. یکی از مهم ترین این روش ها، شتاب با استفاده از لیزر است که ایده آن از زمان اختراع لیزر در دهه ۱۹۶۰ مطرح گردیده است [۴]. امروزه با افزایش انرژی سیستم های لیزری، دانشمندان توانسته اند در فاصله چند سانتی متری، الکترون هایی با انرژی از مرتبه یک گیگا الکترون ولت تولید کنند [۵]. این میزان شتاب

مطرح می‌کند که محدود کردن ناحیه برهم‌کنش از جمله آنهاست. بر همین اساس برخی از الگوهای شتاب، بر خارج کردن الکترون از میانه میدان پالس متمرکز شده‌اند. برای نمونه با استفاده از پالس لیزری کانونی شده، ذرات باردار نیروی عرضی زیادی را ناشی از شدت بالای لیزری در حوالی کانون تجربه کرده و از این ناحیه پرشدت پراکنده می‌شوند. در نتیجه تنها بخشی از میدان لیزر را تجربه کرده و به شتاب غیرصفر می‌رسند [۱۴].

الگوی دیگر مطرح شده برای خروج الکترون، استفاده از یک آینه پلاسمایی به منظور بازتاب جزئی از پالس لیزری است. در این روش پالس لیزری پرشدت از یک لایه پیش پلازما عبور و بر روی یک ورقه تابانده می‌شود. قسمت جلویی پالس بر روی ورقه ایجاد یک ناحیه پلاسمایی فوق چگال می‌کند که به منزله یک آینه پلاسمایی برای ادامه پالس عمل می‌کند. در نتیجه الکترون‌هایی که از لایه پیش پلازما همراه پالس می‌شوند کل میدان پالس را تجربه نکرده و در نتیجه با بهره غیرصفر از ناحیه برهم‌کنش خارج می‌شوند [۱۵].

علاوه بر روش‌های خروج آنی الکترون از میدان الکترومغناطیسی، روشی نیز مبتنی بر تزریق آنی الکترون در میانه پالس ارائه شده که اساس آن بر یونش اتم‌های سنگین است [۱۶]. الکترون‌های مقید درون این اتم‌ها به دلیل برخورداری از میدان کولنی قوی به انرژی زیادی برای یونش نیاز دارند. لذا شدت و طول پالس لیزری را می‌توان طوری تنظیم کرد که دقیقاً نیمی از پالس صرف یونش و کندن الکترون شود. در واقع، الکترون آزاد شده در قله پالس تزریق شده و با نیمه دوم پالس برهم‌کنش کرده و می‌تواند شتاب بگیرد.

الگویی که در مقاله حاضر ارائه می‌گردد مبتنی بر محدود کردن زمان برهم‌کنش الکترون با تزریق آنی آن در میانه پالس لیزری است. در این روش از پلازما به عنوان منبع تولید الکترون و از توری مغناطیسی برای هدایت الکترون استفاده می‌شود. به این ترتیب امکان کنترل زمانی و در نتیجه هم زمان سازی، که لازمه تزریق آنی است، فراهم می‌آید. با انجام محاسبات، دینامیک الکترون در برهم‌کنش با پالس لیزری

نامتقارن را مطالعه و اثر پارامترهای لیزری بر شتاب الکترون را مورد بررسی قرار می‌دهیم. نشان می‌دهیم که این روش می‌تواند به شتاب غیرصفر منجر گردد. همچنین با ارائه چیدمان آزمایشگاهی برای تجربی سازی این ایده، درباره شرایط انجام آن بحث می‌کنیم.

ساختار مقاله به این صورت می‌باشد: در بخش ۲ به دینامیک الکترون در میدان پالس لیزری می‌پردازیم و رفتار بهره انرژی و مسیر الکترون را در برهم‌کنش با میدان بررسی می‌کنیم. همچنین، اثر تغییرات طول پالس، فاز اولیه و میزان تأخیر (میزان عدم تقارن) بین میدان لیزر و الکترون را بر روی شتاب مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در بخش ۳، چیدمانی تجربی متناسب با ایده پیشنهادی ارائه داده و شیوه تزریق الکترون در میانه پالس را شرح می‌دهیم. در انتها، در بخش ۴، جمع‌بندی نتایج ارائه شده است.

## ۲. دینامیک الکترون

ما دینامیک الکترون را به جرم سکون  $m_0$  و بار الکتریکی  $e$  در برهم‌کنش با یک موج الکترومغناطیسی قطبیده خطی در راستای  $x$  بررسی می‌کنیم که میدان الکتریکی و مغناطیسی آن به صورت رابطه (۱) و (۲) توصیف می‌شود

$$E = E_0 \exp\left[-\frac{1}{\tau} \frac{(\eta - \alpha)^2}{\tau^2}\right] \cos(\eta + \varphi_0) \hat{i}, \quad (1)$$

$$B = B_0 \exp\left[-\frac{1}{\tau} \frac{(\eta - \alpha)^2}{\tau^2}\right] \cos(\eta + \varphi_0) \hat{j}, \quad (2)$$

که در آن  $E_0$  و  $B_0$  دامنه میدان الکتریکی و مغناطیسی،  $\eta = \omega t - kz$  فاز،  $\omega$  بسامد،  $\varphi_0$  فاز اولیه،  $\tau$  طول زمانی پالس بهنجار شده به  $\omega$  و  $\alpha$  میزان تأخیر بین پالس و الکترون است، با این فرض که الکترون در  $\eta = 0$  قرار دارد.

سرعت اولیه الکترون را که به سرعت نور در خلأ  $c$  بهنجار شده است ( $\beta_0$ ) به صورت رابطه (۳) در نظر می‌گیریم

$$\beta_0 = \beta_0 (\hat{k} \cos \zeta + \hat{j} \sin \zeta), \quad (3)$$

که در آن  $\zeta$  زاویه تزریق درون میدان است. معادلات حاکم بر دینامیک الکترون در این میدان به صورت روابط (۴) و (۵) می‌باشد.