

## بررسی نوع چرپ القایی و اثر آن بر دامنه میدان عقبه در انتشار تپ لیزر در کانال پلاسما

حسین آکو

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

پست الکترونیکی: h.akou@nit.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۶/۱۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۱/۲۴)

### چکیده

در این مقاله انتشار تپ لیزر گاوسی و فمتوثانیه در کانال پلاسما در نظر گرفته شده و در مورد میزان و نوع القای چرپ بر بسامد تپ لیزر بحث شده است. حضور اثرات نسبیتی و پاشندگی سرعت گروه، در معادلات انتشار مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که اثر نسبیتی موجب القای چرپ مثبت به تپ لیزر با هر چرپ اولیه شده درحالی که اثر پاشندگی سرعت گروه با توجه به نوع چرپ اولیه لیزر، موجب القای چرپ منفی و یا مثبت می شود. از آنجایی که، در ناحیه غیرخطی، اثر نسبیتی بر اثر پاشندگی سرعت گروه غالب است، چرپ القایی مثبت خواهد بود. با مقایسه نتایج، مشخص می شود که برای تولید میدان عقبه بزرگتر، انتشار تپ لیزر با چرپ اولیه مثبت در کانال پلاسما، مؤثرتر از حالت چرپ منفی و غیرچرپ است.

واژه های کلیدی: میدان عقبه لیزری، کانال پلاسما، چرپ شدگی

### ۱. مقدمه

از سازوکار خاصی برای انتقال انرژی و شتاب دادن ذرات استفاده شده است. بعد از ساخت اولین نوع لیزر، ایده استفاده از لیزر جهت شتابدهی ذرات باردار در سال ۱۹۶۲ توسط شیمودا مطرح شد [۴]. از این مقطع به بعد پژوهش ها و فعالیت های متعدد در راستای به کارگیری لیزر در فرآیند شتاب ذرات، موجب دسته بندی شتاب دهنده ها به دو نوع کلاسیک و لیزری شده است. از جمله مهم ترین شتاب دهنده های کلاسیک می توان به شتاب دهنده بزرگ در سرن [۵] و آزمایشگاه فرمی

مطالعه در مورد ذرات باردار پرنرژی به دلیل کاربردهای متعدد آن در صنعت، پزشکی، فیزیک و ... از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردار شده است. می توان برخی از این کاربردها را در مراجع [۱-۳] یافت. مطالعه در راستای ساخت دستگاه هایی که بتوانند این ذرات را تا انرژی های بالا شتاب دهد از دومین دهه قرن بیستم آغاز شده است و سازه هایی تحت عنوان شتاب دهنده ساخته شده و تاکنون ادامه دارد، به طوری که در هر کدام آنها

شده است [۱۷-۲۰]. این گزارش‌ها، موفقیت استفاده از این روش، در صورت برقراری شرایط بهینه و به کارگیری نوع چرپ مشخص، را نشان می‌دهند. ایجاد چرپ در تپ لیزر با روش‌های متفاوتی قابل انجام است که می‌توان به به‌کارگیری چیدمانی از قطعات اپتیکی مانند توری‌ها و آینه‌های چرپ [۲۱] و انتشار تپ لیزر در کانال‌های پلاسمایی [۲۲] اشاره نمود که در این مقاله به بررسی این مورد آخر خواهیم پرداخت. با توجه به این که پلاسما محیطی پاشنده است، بر روی موج الکترومغناطیسی همانند لیزر که در آن منتشر می‌شود اثرات متعددی خواهد داشت که از جمله آن تغییر بسامد لیزر یا همان چرپ‌شدگی<sup>۶</sup> است. در این مقاله، انتشار تپ لیزر با پروفایل گاوسی، در داخل کانال پلاسمای کم‌چگال را در نظر گرفته و با توجه به میزان شدت لیزر، نوع چرپی که بر بسامد تپ القا می‌شود را بررسی می‌کنیم. نوع چرپ القایی بر اندازه دامنه میدان عقبه برانگیخته شده تأثیر گذاشته و بدین ترتیب می‌توان بهترین شرایط را برای تولید میدان عقبه مؤثر در فرآیند شتاب الکترون‌ها یافت. بدیهی است، در شرایط بهینه، هرچه دامنه میدان عقبه بزرگ‌تر باشد، شتاب‌دهی الکترون‌ها بهتر خواهد بود. با حل معادله انتشار موج لیزر در کانال پلاسما، چگونگی تغییرات پارامترهای لیزر، از جمله بسامد آن، در حین انتشار در پلاسما تعیین خواهد شد. بدین ترتیب می‌توان، نوع و میزان چرپ القا شده به تپ لیزر را تعیین کرد. تپ لیزر ورودی می‌تواند از ابتدا چرپ (بسامد متغیر) یا غیرچرپ (بسامد ثابت) باشد. تپ لیزر غیرچرپ با انتشار در کانال پلاسما، چرپ شده و اگر در ابتدا چرپ باشد، بسته به نوع چرپ اولیه و چرپ القایی، چرپ‌شدگی آن تقویت یا تضعیف خواهد شد که چگونگی این فرآیندها در بخش بعد بررسی می‌شود. در بخش ۲، معادله انتشار لیزر در کانال پلاسما نوشته شده، و با در نظر گرفتن معادلات حاکم بر تغییرات دوام زمانی<sup>۷</sup> و چرپ‌شدگی بسامد لیزر، اثرات نسبی و پاشندگی سرعت گروه بر نوع

اشاره نمود [۶]. لیزر با هدف کوچک‌سازی و کاهش اندازه دستگاه‌های غول‌پیکر شتاب‌دهنده وارد این عرصه شده بود. تاکنون به صورت نظری و تجربی گزارش‌های متعددی در ساخت شتاب‌دهنده‌های لیزری ارائه شده است [۷-۱۰]. در برخی از شیوه‌های شتاب‌دهی لیزری، محیط پلاسما به دلیل داشتن ویژگی‌هایی از جمله قابلیت تحمل میدان‌های الکتریکی بزرگ، به عنوان بستری برای شتاب لیزری ذرات باردار انتخاب می‌شود. تپ‌های لیزری با انتشار در محیط پلاسما قادر به برانگیختن امواج الکترواستاتیکی تحت عنوان امواج لانگمیر<sup>۱</sup> می‌شوند [۱۱]. میدان الکتریکی وابسته به این امواج، میدان عقبه<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. میدان عقبه، ناشی از جدایی بارهای مثبت و منفی در پلاسما است. گرادیان شدت تپ لیزری که در پلاسما منتشر می‌شود این جدایی بار را ایجاد کرده و میدان الکترواستاتیک عقبه تولید خواهد شد. یکی از روش‌های شتاب، قرارگیری الکترون تحت تأثیر این میدان الکتریکی است، که با عنوان شتاب میدان عقبه<sup>۳</sup> شناخته می‌شود [۱۲-۱۴]. لازم به ذکر است، روش مشابه دیگری با عنوان شتاب میدان عقبه پلاسمایی<sup>۴</sup> وجود دارد که در آن برای تولید میدان عقبه از یک باریکه الکترونی استفاده می‌شود [۱۵]. با رشد فناوری ساخت لیزر و تولید تپ‌های لیزری پرشدت و فوق کوتاه، برانگیزش امواج پلاسمایی با دامنه بلند، که برای شتاب‌دهی مناسب‌تر هستند، موفقیت روز افزونی داشته است. از اواسط دهه ۱۹۸۰ با ابداع روش تقویت تپ چرپ<sup>۵</sup> در تقویت تپ‌های لیزری [۱۶]، استفاده از لیزرهای با بسامد متغیر (چرپ) در زمینه‌های مختلف فیزیک از جمله شتاب لیزری ذرات باردار مورد توجه قرار گرفته است. عدم تقارنی که در بسامد این نوع از بسامدهای لیزر وجود دارد، شرایطی را فراهم می‌آورد که می‌تواند در فرآیند شتاب‌دهی، مؤثر واقع شود. گزارش‌های متعددی در زمینه استفاده از لیزر چرپ در شتاب الکترون در خلاء ارائه

۱. Langmuir wave

۲. Wake field

۳. Laser Wake Field Acceleration (LWFA)

۴. Plasma Wake Field Acceleration (PWFA)

۵. Chirp pulse amplification

۶. Chirping

۷. Pulse duration

یک باریکه گاوسی، طول ریلی معیاری برای پراش لیزر است و باریکه لیزر بعد از انتشار به اندازه چند طول ریلی واگرایی شدیدی را متحمل می‌شود [۲۴]. این واگرایی منجر به کاهش شدت لیزر خواهد شد. بدین ترتیب نیاز است تا با به‌کارگیری روش‌هایی مانع واگرایی و به دنبال آن کاهش شدت لیزر شویم. یکی از روش‌های پیشنهادی، که به طور تجربی نیز مورد بررسی قرار گرفته است، استفاده از کانال‌های پلاسمایی است. با برقراری شرط سازگاری<sup>۵</sup>، عمق کانال پلاسما به صورتی انتخاب می‌شود که اندازه لکه لیزر به جای واگرایی، دچار نوساناتی با دامنه کوتاه شود [۲۴]. در این صورت، از کاهش شدت لیزر جلوگیری شده و طول برهم‌کنش مؤثر بین لیزر و پلاسما افزایش خواهد یافت.

پلاسما محیطی پاشنده برای امواج الکترومغناطیس است که این خاصیت با پارامتر پاشندگی سرعت گروه،  $S_p$ ، در معادله انتشار موج معادله (۱) آورده شده است. برای یافتن چگونگی تغییرات هر یک از پارامترهای تپ لیزر، از جمله چرپ‌شدگی و دوام زمانی آن، معادله (۱) به روش بسط وابسته به چشمه<sup>۶</sup> [۲۵]، حل شده و چند معادله دیفرانسیل جفت شده حاکم بر تغییرات پارامترهای لیزری، به دست آمده است [۲۳]. معادله (۲) یکی از این روابط است.

$$S(z) = \frac{T(z) \partial T(z)}{2S_p \partial z} \quad (2)$$

در این معادله،  $T$  دوام زمانی لیزر و  $S(z)$  پارامتر چرپ است که میزان چرپ تپ لیزر را نشان می‌دهد. با توجه به این رابطه  $S$  وابسته به  $z$  بوده و با انتشار تپ لیزر در پلاسما تغییر خواهد کرد. این گونه می‌توان بیان کرد که با انتشار لیزر در داخل کانال پلاسما، چرپ به بسامد لیزر القا می‌شود. از معادله (۲) دیده می‌شود که چرپ القایی به دو عامل پاشندگی سرعت گروه ( $S_p$ ) و تغییرات دوام زمانی تپ لیزر، وابسته است. پارامتر  $S_p$  برای پلاسمای کاملاً یونیزه با رابطه زیر داده می‌شود [۲۶].

القای چرپ و در نهایت دامنه میدان عقبه بررسی خواهد شد. در بخش ۳، نتایج شبیه‌سازی ارائه شده و در نهایت در بخش ۴، خلاصه و نتیجه‌گیری بیان شده است.

## ۲. معادلات حاکم و القای چرپ بر بسامد تپ لیزر با انتشار در کانال پلاسما

پارامترهای تپ لیزری که در پلاسما منتشر می‌شود، به دلیل تأثیر متقابل این دو بر هم، دچار تغییراتی می‌شود که با یافتن و حل معادله انتشار موج در این محیط قابل بررسی است. برای نوشتن معادله موج باید از معادلات ماکسول استفاده نمود. اما قبل از آن باید اثرات مختلفی که در این برهم‌کنش وجود دارد، در نظر گرفته شود. با توجه به فرض کاملاً یونیزه بودن پلاسما، تنها اثراتی همچون، اثر نسبیتی، اثر پاشندگی سرعت گروه<sup>۱</sup> و برانگیزش میدان عقبه حائز اهمیت می‌باشند. معادله انتشار تپ لیزر در کانال پلاسمای شلجمی<sup>۲</sup> با رابطه زیر داده می‌شود [۲۳]

$$\left[ \nabla_{\perp}^2 + 2ik_z \frac{\partial}{\partial z} - k_z S_p v_g^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\epsilon}{R_{ch}^2} - \frac{S_{p0}^2 \Delta n}{c^2 n_0 R_{ch}^2} \right] \bar{E}(r, z) = 0, \quad (1)$$

در معادله بالا  $|b|^2$  شدت بدون بعد لیزر و نماینده حضور اثر نسبیتی در محاسبات است.  $\Delta n$  عمق کانال پلاسما<sup>۳</sup>،  $R_{ch}$  شعاع کانال،  $R_{ch}$  اندازه لکه لیزر<sup>۴</sup>،  $k_z$  عدد موج،  $v_g$  سرعت گروه تپ لیزر،  $c$  سرعت نور در خلاء،  $S_{p0}$  بسامد پلاسما بر روی محور ( $r=0$ )،  $Un$  آشفتگی در چگالی الکترونی پلاسما ناشی از انتشار لیزر و  $E$  میدان الکتریکی لیزر است. همان‌طور که بیان شد، کانال پلاسما دارای پروفایل چگالی شلجمی است که با رابطه  $n(r) = n_0 + \Delta n(r/R_{ch})^2$  داده می‌شود که  $n_0$  چگالی محوری الکترون است. یکی از مسائل مهم در انتشار تپ لیزر، پراش یا همان واگرایی لیزر در طی انتشار است. در

۱. Group Velocity Dispersion (GVD)

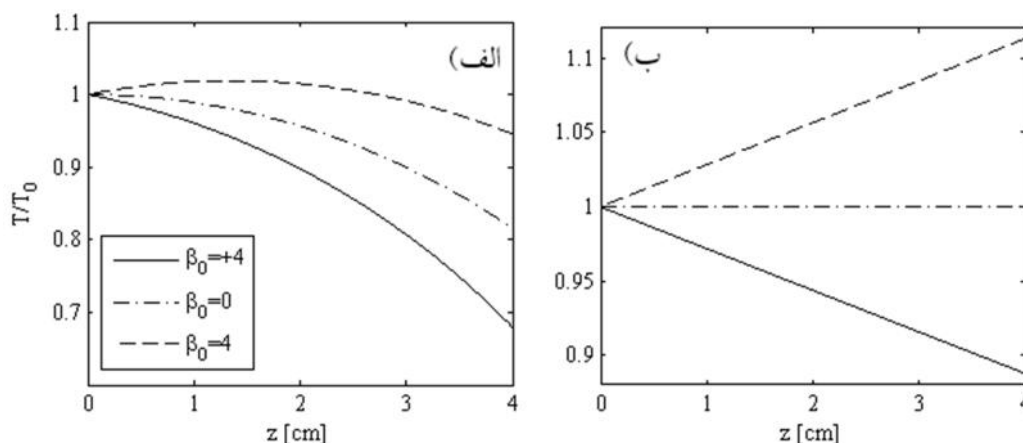
۲. Parabolic

۳. Plasma channel depth

۴. Laser spot size

۵. Phase matching

۶. Source Dependent Expansion (SDE)



شکل ۱. تغییرات دوام زمانی لیزر در حضور اثر نسبیتی (الف) و عدم حضور آن (ب).

حدی مذکور بیشتر باشد، حضور اثر نسبیتی در معادلات الزامی است و در شدت‌های پایین‌تر عملاً اثر نسبیتی تأثیر گزار نیست. در بخش بعد، چگونگی تأثیرات اثر نسبیتی و پاشندگی سرعت گروه، بر دوام زمانی لیزر و در نتیجه چرپ القایی، با رسم شکل، نشان داده خواهد شد.

### ۳. بحث و نتایج

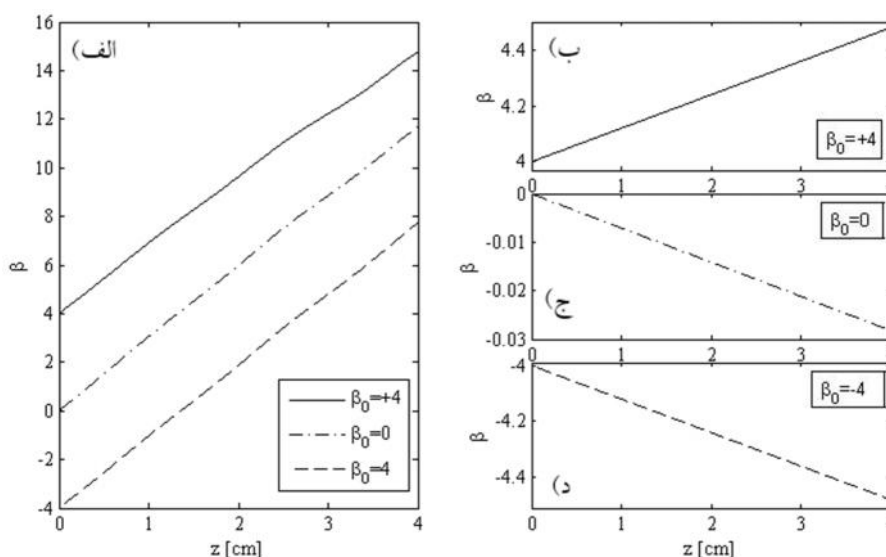
برای بررسی بهتر، شبیه‌سازی برای سه لیزر با حالت‌های مختلف چرپ اولیه انجام شده است. حالت اول لیزری که در هنگام ورود به کانال پلاسما غیرچرپ (بسامد ثابت) باشد، حالت دوم لیزر در ابتدا چرپ بوده و نوع چرپ آن خطی و مثبت باشد و در نهایت حالت سوم که در آن لیزر در ابتدا دارای چرپ خطی منفی باشد. چرپ خطی به این معنی است که بسامد لیزر از جلو به پشت تپ بصورت خطی افزایش (چرپ مثبت) یا کاهش (چرپ منفی) یابد. ضمن این که، برای تعیین تأثیر اثرات نسبیتی و پاشندگی سرعت گروه بر القای چرپ، شبیه‌سازی در حالت‌هایی که اولاً فقط اثر پاشندگی سرعت گروه در معادلات باشد و دوماً علاوه بر این اثر، به طور هم زمان، اثر نسبیتی هم دخیل باشد، انجام شده است. پارامترهای لیزر و پلاسما در این شبیه‌سازی به صورت زیر انتخاب شده است:

$$S_p \cong -\frac{1}{S_p^2 c} \left( \dot{S}_{p_0}^2 + \frac{4c^2}{R_c^2} \right). \quad (3)$$

با توجه به رابطه (۳)، مقدار این پارامتر همواره منفی و در اینجا ثابت فرض شده است. در نتیجه، با یافتن تغییرات  $T$  می‌توان چگونگی چرپ القایی بر لیزر را از معادله (۲) تعیین کرد. معادله حاکم بر تغییرات  $T$  با رابطه

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{4S_p^2}{T^3} + \frac{k_0 S_p}{4} \frac{\dot{S}_{p_0}^2}{S_p^2} \frac{B^2}{T} \left( 1 + \frac{\Delta n}{n_0} \frac{R^2}{4R_{ch}^2} \right), \quad (4)$$

داده می‌شود [۲۳]. در این رابطه  $B$  دامنه بدون بعد میدان الکتریکی لیزر است. از معادله (۴) مشخص است که تغییرات دوام زمانی لیزر، هم به اثر پاشندگی سرعت گروه (با حضور  $S_p$ )، و هم به اثر نسبیتی (با حضور  $B$ ) وابسته است. به دلیل پاشنده بودن محیط پلاسما، اثر پاشندگی سرعت گروه، همواره در تغییرات مربوطه وجود دارد و نمی‌توان آن را در معادلات کنار گذاشت. اما اثر نسبیتی تنها در صورتی در معادلات حاضر می‌شود که شدت لیزر در ناحیه غیرخطی باشد. شدت لیزرهای منتشر شونده در داخل پلاسما، عموماً به دو دسته نسبیتی (غیرخطی) که در آن  $B \geq 1$  بوده و غیر نسبیتی (خطی) که در آن  $B \geq 1$  است، تقسیم‌بندی می‌شوند. شدت نسبیتی به آن محدوده از شدت‌های لیزری گفته می‌شود که حرکت الکترون‌های پلاسما در اثر انتشار لیزر، حرکتی با سرعت نسبیتی باشد و طبیعتاً دارای جرم نسبیتی است، درحالی که در ناحیه خطی این فرآیند رخ نخواهد داد. آستانه شدت نسبیتی، حدود



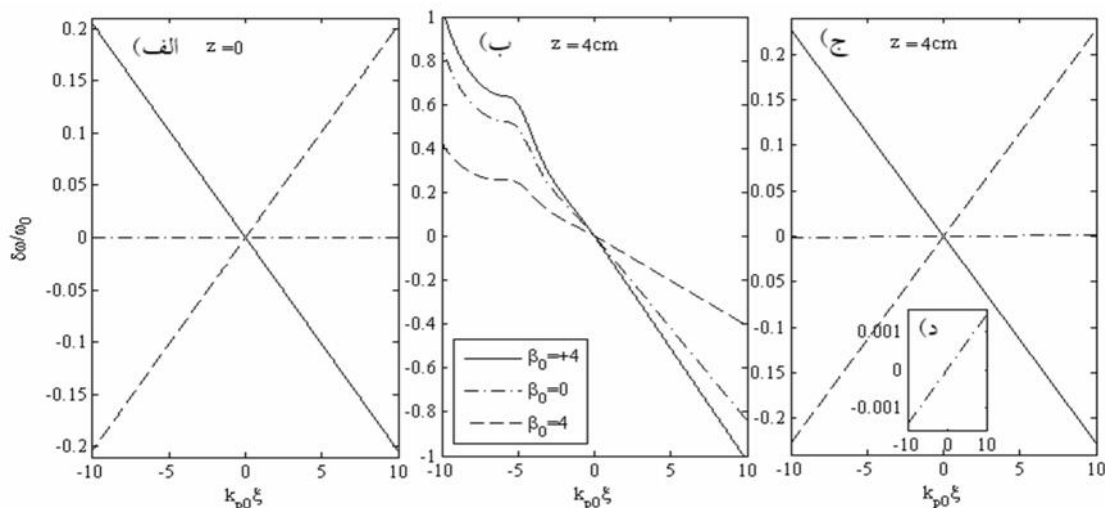
شکل ۲. تغییر میزان چرپ شدگی لیزر در حضور اثر نسبیتی (الف) و عدم حضور آن (ب)، (ج) و (د).

نسبیتی، نتایج را دچار تغییر قابل ملاحظه‌ای می‌کند. با توجه به شکل ۱ (الف)، اثر نسبیتی موجب فشردگی تپ لیزر، (برای همه انواع چرپ شدگی اولیه آن)، خواهد شد.

منحنی خط چین در شکل ۱ (الف) که مربوط به لیزر با چرپ اولیه منفی است، نشان می‌دهد که در ابتدای انتشار، اثر پاشندگی سرعت گروه، موجب پهن شدگی تپ لیزر شده و در فاصله  $z > 2 \text{ cm}$  اثر نسبیتی بر آن غلبه کرده و فشردگی تپ (منحنی نقطه-خط چین) و در حالت چرپ اولیه مثبت (منحنی خط کامل) هر دو عامل نسبیتی و پاشندگی سرعت گروه موجب فشردگی تپ لیزر شده، اثر یکدیگر را تقویت می‌کنند و در نتیجه میزان فشردگی و کاهش دوام زمانی تپ لیزر بیشتر است. معادله (۲)، با توجه به مقدار منفی  $S_p$ ، نشان می‌دهد که اگر شیب نمودار تغییرات  $T$  نسبت به  $z$  منفی و یا مثبت باشد، چرپ القایی به ترتیب مثبت و منفی خواهد بود. بدین ترتیب، از شکل ۱ (ب) می‌توان انتظار داشت که در عدم حضور اثر نسبیتی و وقتی که فقط اثر پاشندگی سرعت گروه تأثیرگذار باشد، به تپ لیزر با چرپ اولیه مثبت، چرپ مثبت اضافی دیگری القا می‌شود. این فرآیند، در حالت چرپ اولیه منفی معکوس است و چرپ القایی برای چنین تپ لیزری، در عدم حضور اثر نسبیتی منفی است. به دلیل فشردگی شدن تپ

$$R_c = 30 \mu\text{m}, R_{ch} = 100 \mu\text{m}, \beta_0 = 0.8 \mu\text{m}, \\ L_{\text{pulse}} = \beta_0 / 2 = 16 \mu\text{m}, n_0 = 1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}, \\ \Delta n = 6.78 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}, I = 10^{18} \text{ W/cm}^2, \\ S_p = -9.94 \text{ fs}^2 \text{ cm}^{-1}$$

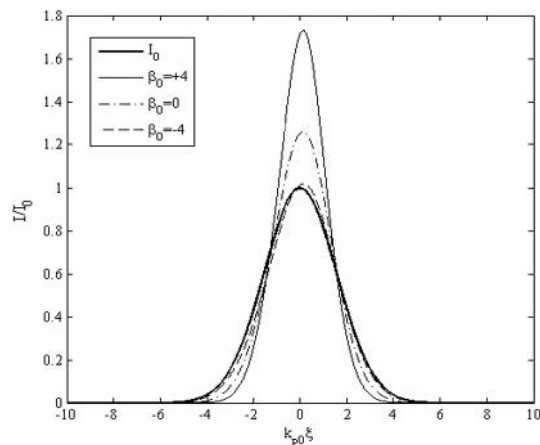
با توجه به رابطه (۲)، میزان و نوع القای چرپ به  $S_p$  و تغییرات  $T$  بستگی دارد. از آنجایی که،  $S_p$  عددی ثابت و منفی است، با یافتن چگونگی تغییرات دوام زمانی لیزر، می‌توان تغییرات پارامتر چرپ و در نتیجه چرپ القایی را به دست آورد. شکل ۱، تغییرات دوام زمانی لیزر، در طول انتشار آن در کانال پلاسما را نشان می‌دهد. شکل ۱ (الف)، مربوط به حالتی است که هر دو اثر پاشندگی سرعت گروه و نسبیتی در معادلات قرار گرفته و در فرآیند برهم‌کنش دخیل هستند ولی در شکل ۱ (ب)، فقط اثر پاشندگی سرعت گروه در نظر گرفته شده است. منحنی با خط کامل مربوط به لیزر با چرپ اولیه مثبت، خط چین، لیزر با چرپ اولیه منفی و نقطه-خط چین مربوط به لیزر با چرپ اولیه صفر (غیرچرپ) است. با توجه به این قسمت (ب) شکل، اثر پاشندگی سرعت گروه موجب می‌شود تا دوام زمانی یا همان طول تپ لیزر با چرپ اولیه منفی در طی انتشار افزایش یافته و یا به عبارت دیگر موجب پهن شدگی تپ لیزر می‌شود. در حالی که این اثر موجب فشردگی تپ وقتی که دارای چرپ اولیه مثبت باشد، خواهد شد. در این فرآیند تپ غیر چرپ دچار پهن شدگی نامحسوسی می‌شود. حضور اثر



شکل ۳. اختلاف بسامد جلو و عقب تپ لیزر، در ابتدای انتشار (الف) و در  $z = 4$  cm، در حضور اثر نسبیتی (ب) و عدم حضور آن (ج) و (د).

اولیه مثبت همچنان القای چرپ مثبت را متحمل شده در حالی که برای دو نوع دیگر، چرپ القایی منفی خواهد بود. ضمن این که در این حالت، میزان درصد چرپ شدگی به طور قابل توجهی کمتر از حالتی است که اثر نسبیتی تأثیر گزار باشد. در شکل ۳، همین نتیجه با رسم بسامد تپ لیزر نشان داده شده است.

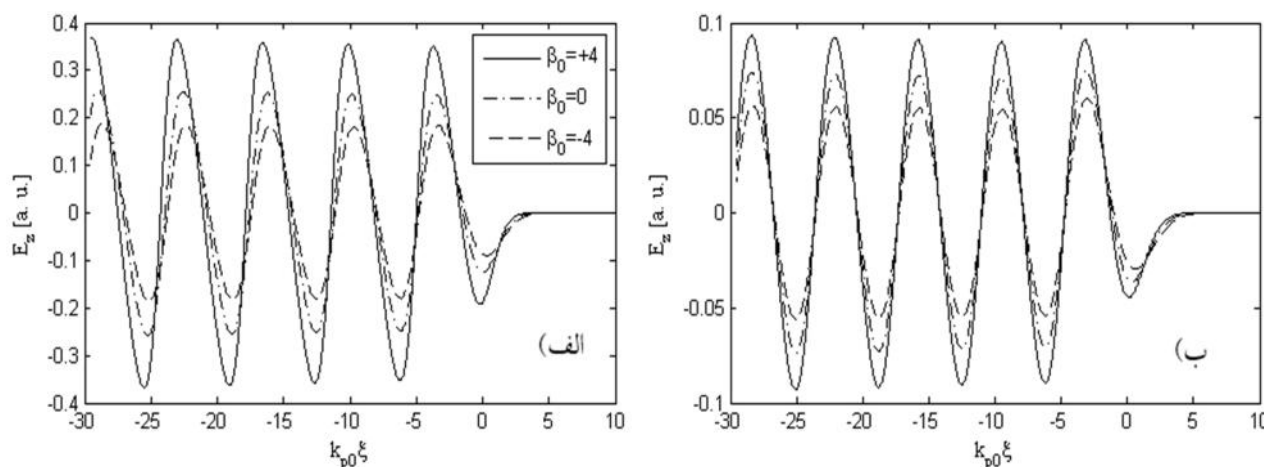
شکل ۳ (الف) اختلاف بسامد جلو و پشت تپ لیزر را در ابتدای ورود به کانال نشان می‌دهد.  $k_{p,z} = 10$  مکان جلوی تپ و  $k_{p,z} = -10$  مکان پشت تپ لیزر است. با مشاهده این اختلاف بسامدی، نوع چرپ اولیه برای هر سه حالت کاملاً مشخص است. به عنوان مثال، برای لیزر غیرچرپ اختلاف بسامد جلو و پشت تپ صفر است، که نشان‌دهنده ثابت بودن بسامد در طول تپ است. شکل ۳ (ب)  $u\bar{S}/\bar{S}$  را بعد از انتشار به اندازه  $z = 4$  cm در طول کانال نشان می‌دهد. در این شکل اثر نسبیتی حضور دارد. مشخص است که هر سه نوع چرپ اولیه، بعد از انتشار تبدیل به لیزر با چرپ مثبت شده‌اند. شکل ۳ (ج) و (د) در عدم حضور اثر نسبیتی رسم شده است. تپ با چرپ اولیه مثبت (منفی)، متحمل القای چرپ مثبت (منفی) شده و تپ غیرچرپ با انتشار در کانال کمی چرپ منفی خواهد گرفت. در این دو شکل، منحنی با خط کامل مربوط به لیزر با چرپ اولیه مثبت، خط چین، لیزر با چرپ اولیه منفی و نقطه-خط چین مربوط به لیزر با چرپ اولیه صفر (غیرچرپ) است.



شکل ۴. تغییرات شدت لیزر در حضور اثر نسبیتی.

لیزر در هر سه نوع چرپ اولیه، در حضور هم زمان هر دو اثر پاشندگی سرعت گروه و نسبیتی، شکل ۱ (الف)، القای چرپ مثبت بر تپ، قابل پیش‌بینی است. شکل ۲ و ۳ که به ترتیب، تغییرات پارامتر چرپ و بسامد لیزر را در طول انتشار نشان می‌دهند، مطالب بالا را تایید می‌کنند.

شکل ۲ (الف)، در حضور هم زمان دو اثر مذکور و شکل ۲ (ب) تا ۲ (د) در عدم حضور اثر نسبیتی، رسم شده‌اند. با توجه به شکل ۲ (الف)، القای چرپ مثبت در هر سه نوع چرپ اولیه قابل مشاهده است. حتی تپ لیزر با چرپ اولیه منفی، بعد از انتشار به اندازه ۴ سانتی‌متر در کانال پلاسما تبدیل به تپی با چرپ مثبت می‌شود. شکل ۲ (ب)، (ج) و (د) نشان می‌دهد در عدم حضور اثر نسبیتی، تپ لیزر با چرپ



شکل ۵. میدان عقبه تولید شده در حضور اثر نسبی (الف) و عدم حضور آن (ب).

#### ۴. نتیجه گیری

برهم کنش تپ لیزر و پلاسما، تغییراتی را در پارامترهای هر دو به همراه دارد. از جمله پارامترهای لیزر که در این برهم کنش دستخوش تغییر می شود، دوام زمانی یا طول تپ لیزر و بسامد آن است و از مهمترین اثراتی که محیط پلاسما متحمل می شود، تغییر در ساختار چگالی الکترونی آن و تولید میدانی الکترواستاتیکی معروف به میدان عقبه است. در این مقاله نشان داده شد که تغییر در دوام زمانی لیزر، بر شدت آن اثر گذاشته و در نتیجه اندازه دامنه میدان عقبه، بر اساس آن تغییر خواهد کرد. در این مقاله، یک کانال پلاسما برای انتشار تپ لیزر در آن در نظر گرفته شد تا با برقراری شرط سازگاری از واگرایی لیزر و کاهش شدت آن، ناشی از پراش جلوگیری به عمل آید. در نهایت، مشاهده شده است که چرپ القایی بر بسامد لیزر، وقتی که فقط اثر پاشندگی سرعت گروه در نظر گرفته شود، بسته به نوع چرپ اولیه لیزر می تواند مثبت و یا منفی (با مقدار کم) باشد. اما در ناحیه غیرخطی، اثر نسبی بر اثر پاشندگی سرعت گروه غالب شده و موجب القای چرپ مثبت بر تپ لیزر (با هر نوع چرپ اولیه) خواهد شد و فشردگی و کاهش دوام زمانی تپ لیزر نیز رخ می دهد. این اثرات افزایش شدت لیزر و به تبع آن افزایش دامنه میدان عقبه را موجب می شود. بدین ترتیب می توان گفت، انتشار سازگار تپ لیزر با چرپ اولیه مثبت در کانال پلاسما، نتایج بهتری را در فرآیند شتابدهی الکترونها به روش میدان عقبه لیزری خواهد داشت.

بررسی نوع چرپ القایی زمانی حائز اهمیت می شود که بدانیم تأثیر آن در دامنه میدان عقبه تولید شده در پلاسما چقدر خواهد بود. همان طور که قبلاً ذکر شد برای دستیابی به شرایط شتابدهی بهتر الکترونها نیازمند به میدانهای الکتریکی عقبه با دامنه بزرگ هستیم. در ادامه نشان داده شده است که تغییرات دوام زمانی و القای چرپ بر اندازه شدت لیزر تأثیر خواهد گذاشت و بدیهی است که افزایش شدت لیزر افزایش بزرگی دامنه میدان عقبه را به همراه خواهد داشت. شکل ۴ شدت لیزر بعد از انتشار به اندازه  $z = 4 \text{ cm}$  در کانال پلاسما، برای حالت های مختلف چرپ، در حضور اثر نسبی (الف) و عدم حضور آن (ب) را نشان می دهد. مشاهده می شود که شدت لیزر با چرپ اولیه مثبت در حضور اثر نسبی به مراتب افزایش می یابد. خط کامل پررنگ در شکل ۴ شدت بهنجار اولیه لیزر را نشان می دهد. در شکل ۵، میدان عقبه تولید شده،  $E_z$ ، در حضور و عدم حضور اثر نسبی نشان داده شده است. در دو شکل ۴ و ۵، منحنی با خط کامل مربوط به لیزر با چرپ اولیه مثبت، خط چین، لیزر با چرپ اولیه منفی و نقطه - خط چین مربوط به لیزر غیرچرپ است. با توجه به شکل ۵، حضور اثر نسبی به طور کلی موجب افزایش دامنه میدان عقبه شده و علاوه بر آن لیزر با چرپ مثبت، میدان عقبه با دامنه بزرگتری را در مقایسه با حالت های دیگر تولید می کند که می تواند در شتاب لیزری الکترونها کیفیت بهتری را ارائه دهد.

## مراجع

۱. م لامعی رشتی و همکاران، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۵، ویژه نامه، ۲ (۱۳۹۴).
۲. M Laméhi Rashti *et al.*, *Iranian Journal of Physics Research*, Special Issue, **15** (2015) 2.
۳. Y Glinec, J Faure, V Malka, T Fuchs, H Szymanowski, and U Oelfke, *Med. Phys.* **33** (2006) 155.
۴. T Fuchs, H Szymanowski, U Oelfke, Y Glinec, C Rechatin, J Faure, and V Malka, *Phys. Med. Biol.* **54** (2009) 3315.
۵. K Shimoda, *Appl. Opt.* **1** (1962) 33.
۶. <http://home.web.cern.ch/>
۷. <http://www.fnal.gov/>
۸. I P X Wang, Y K Ho, X Q Yuan, Q Kong, N Cao, L Shao, A M. Sessler, E Esarey, E Moshkovich, Y Nishida, N Yugami, H Ito, J X. Wang, and S Scheid, *J. Appl. Phys.* **91** (2002) 856.
۹. Z Yan, Y K Ho, P X Wang, J F Hua, Z Chen, and L Wu, *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* **81** (2005) 813.
۱۰. Y I Salamin, *Phys. Rev. A* **73** (2006) 043402.
۱۱. M O Scully and M S Zubairy, *Phys. Rev. A* **44** (1991) 2656.
۱۲. R Bingham, U D E Angelis, M R Amin, R A Carins and B Mcnamara, *Plasma Phys. Control. Fusion* **34** (1992) 557.
۱۳. T Tajima and J M Dawson, *Phys. Rev. Lett.* **43** (1979) 267.
۱۴. V Malka, S Fritzler, E Lefebvre, M M Aleonard, F Burgy, J P Chambaret, J F Chemin, K Krushelnick, G Malka, S P D Mangles, Z Najmudin, M Pittman, J P Rousseau, J N Scheurer, B Walton, and A E Dangor, *Science* **298** (2002) 1596.
۱۵. S Mirzanejhad, F Sohbatzadeh, M Asri, and K Ghanbari, *Phys. Plasmas* **17** (2010) 033103.
۱۶. A G Khachatryan, *Phys. Rev. E* **60** (1999) 6210.
۱۷. D Strickland and G Mourou, *Opt. Commun.* **56** (1985) 219.
۱۸. F V Hartemann *et al.*, *Phys. Plasmas* **6** (1999) 4104.
۱۹. A G Khachatryan, F A van Goor, J W J Verschuur, and K J Boller, *Phys. Plasmas* **12** (2005) 062116.
۲۰. F Sohbatzadeh, S Mirzanejhad, and M Ghasemi, *Phys. Plasmas* **13** (2006) 123108.
۲۱. F Sohbatzadeh, S Mirzanejhad, and H Akou, *Phys. Plasmas* **16** (2009) 023106.
۲۲. C B Schroeder, E Esarey, B A Shadwick and W P Leemans, *Phys. Plasmas* **10** (2003) 285.
۲۳. D F Gordon, B Hafizi, R F Hubbard, J R Penano, P Sprangle, and A Ting, *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 215001.
۲۴. F Sohbatzadeh and H Akou, *Phys. Plasmas* **20** (2013) 043101.
۲۵. P Sprangle, E Esarey, J Krall, and G Joyce, *Phys. Rev. Lett.* **69** (1992) 2200.
۲۶. P Sprangle, A Ting and C M. Tang, *Phys. Rev. A* **36** (1987) 2773.
۲۷. P Sprangle, B Hafizi, and J R Penano, *Phys. Rev. E* **61** (2000) 4381.