

بهینه سازی برخی پارامترهای ورودی یک لیزر تپی TEA CO₂ بر پایه معادلات تعمیم یافته لاندائو-تلر

سمیه پناهی بخش، عزیزمراد کوشکی*، و زهره رجبی

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فونونیک و فناوری کوانتومی، صندوق پستی: 14395-836، تهران، ایران

پست الکترونیکی: akoushki@aeoi.org.ir

چکیده:

در این مقاله، مدل سینتیک شش دمایی بر اساس معادلات تعمیم یافته لاندائو-تلر برای بهینه سازی برخی پارامترهای ورودی یک لیزر تپی CO₂ TEA به کار رفته است. این مدل با در نظر گرفتن معادلات حاکم بر محیط تخلیه الکتریکی برای محاسبه چگالی الکترون‌ها، به صورت عددی حل شده است. در این پژوهش، برای اولین بار تفکیک مولکول CO₂ و تولید CO به صورت یک معادله تحول زمانی با سایر معادلات دینامیکی آهنگ لیزر جفت شده است. رفتار زمانی جریان و ولتاژ تخلیه و توان تپ خروجی لیزر، در نسبت آمیزه گازهای CO₂:N₂:He به ترتیب ۱:۳:۱ شبیه سازی شد. همچنین، مقدار بهینه پارامترهای ورودی شامل بازتابندگی آینه خروجی، ظرفیت خازن پیش یونش و ظرفیت و ولتاژ شارژ خازن ذخیره برای به دست آوردن بیشینه قله توان خروجی محاسبه گردید. نتایج به دست آمده در طراحی بهینه نوسانگرهای TEA CO₂ بسیار حائز اهمیت می باشد. **واژه‌های کلیدی:** لیزر TEA CO₂، مخلوط گازی، تفکیک CO₂، مدل سینتیک شش دمایی، معادلات لاندائو-تلر.

۱. مقدمه

رادییوی (RF) جهت کاربردهای پزشکی، صنعتی، نظامی، بیناب نگاری و غیره ساخته شده است. لیزرهای گاز کربنیک مانند بسیاری از انواع لیزرها در هر دو مد پیوسته و تپی کار می کنند. در میان انواع لیزرهای گاز کربنیک، لیزرهای تپی گاز کربنیک برانگیخته عرضی فشار جوی (TEA)^۱ به خاطر کاربردهای فراوان، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. و به طور گسترده در کاربردهای علمی و صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند [۴-۹]. این دسته از لیزرهای گاز کربنیک همان طور که از نامش بر می آید، در محدوده فشار حدود یک اتمسفر کار می کنند و تخلیه الکتریکی در آن عمود بر محور اپتیکی لیزر صورت

لیزر گاز کربنیک یکی از مهمترین لیزرهای گازی مولکولی با کاربردهای فراوان است. از این رو، مطالعات زیادی روی آن انجام گرفته است. در حالی که بیشتر لیزرهای گازی دارای بازدهی حدود چند دهم درصد هستند، لیزر گاز کربنیک بازدهی به اندازه چند ده درصد دارد. لذا یک لیزر کوچک از این نوع می تواند ده‌ها وات توان تولید کند [۱-۳].

به دلیل باریک بودن خط جذبی در گازها روش دمش اپتیکی برای این لیزرها مناسب نیست و از تخلیه الکتریکی برای دمش این لیزرها استفاده می شود. از اینرو تا کنون لیزرهایی با انرژی و توان‌های متفاوت با انواع دمش، اعم از DC و فرکانس

^۱ Transverse Excited Atmospheric

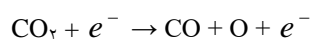
می‌گیرد و قادر به تولید تپ‌هایی با انرژی بسیار بالا در واحد حجم تخلیه است.

لیزرهای گاز کربنیک TEA عموماً تپ‌های با قله توان بالا و پهنای پالس کوتاه (۱۰۰-۲۰۰ نانوثانیه) در ناحیه مادون قرمز میانی تولید می‌کنند. از این‌رو، برای بسیاری از کاربردها نظیر جداسازی ایزوتوپی لیزری [۱۰-۱۲]، آشکارسازی نوری و فاصله یابی جوی [۱۳، ۱۴]، از بین بردن آلودگی‌های رادیواکتیو سطوح [۱۵] مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای لیزر گاز کربنیک وارونی جمعیت بین گذارهای ارتعاشی-چرخشی حالت پایه الکترونی مولکول کربن دی‌اکسید ایجاد می‌شود. ایجاد جمعیت در تراز بالای لیزری در خلال تخلیه الکتریکی در مخلوط گازی شامل کربن دی‌اکسید صورت می‌گیرد. گازهای دیگری مثل هلیم و نیتروژن به دلیل اثرات مطلوبی که بر همگن بودن تخلیه یا فرایندهای انتقال انرژی دارند، به کربن دی‌اکسید اضافه شده و باعث می‌شوند بازدهی لیزر افزایش یابد.

مولکول‌های نیتروژن در محیط تخلیه الکتریکی، در اثر برخورد الکترون‌ها تحریک می‌شوند که برانگیختگی مولکول‌های نیتروژن با این روش، فرایند بسیار مؤثری است. در اثر برخورد مولکول‌های برانگیخته نیتروژن با مولکول‌های کربن دی‌اکسید، انتقال انرژی تشدید می‌شود بین این دو مولکول صورت می‌گیرد. در این صورت دمش تراز بالایی بسیار مؤثر خواهد بود و این امر بازدهی بالای لیزر CO₂ را توجیه می‌کند.

هنگامی که یک لیزر گاز کربنیک برانگیخته عرضی فشار جوی بسته (sealed-off) طراحی می‌شود یکی از موضوعات اصلی و ذاتی این واقعیت هست که در طی فرایند دمش لیزر، الکترون‌های ناشی از تخلیه الکتریکی با مولکول CO₂ برخورد کرده و آن را تجزیه می‌کنند و گازهای آلاینده‌ای که به وسیله واکنش-های شیمیایی پلاسما به وجود می‌آیند در محفظه لیزر بسته انباشته شده و باعث ناپایداری محیط تخلیه الکتریکی، کاهش طول عمر لیزر و کاهش توان خروجی لیزر می‌شوند [۲۵]. واکنش اصلی تفکیک مولکول کربن دی‌اکسید در محیط تخلیه الکتریکی لیزر CO₂ به صورت زیر است:



آهنگ تولید مونوکسیدکربن به غلظت اولیه مولکول CO₂ و چگونگی توزیع انرژی الکترون‌ها وابسته است. مولکول مونوکسیدکربن دارای دوقطبی الکتریکی دائمی است، پس احتمال تحریک حالت‌های ارتعاشی آن با برخوردهای الکترونی زیاد است و می‌تواند با CO₂ تبادل انرژی انجام دهد. البته بین CO و N₂ نیز امکان تبادل انرژی تشدید وجود دارد. به علاوه CO به دلیل داشتن دوقطبی الکتریکی می‌تواند تابش کند و انرژی وارد شده به محیط از طریق فرایند دمش را تلف کند.

همان‌طور که گفته شد N₂ به CO₂ اضافه می‌شود، تا آهنگ برانگیختگی تراز بالایی افزایش یابد. پس از آن He نیز به این مخلوط افزوده می‌گردد، تا زمان واهلش تراز پایین لیزری کاهش یابد. همچنین، هلیم در اثر برخورد با الکترون‌ها مقداری از انرژی آنها را کسب می‌کند و باعث می‌شود انرژی این الکترون‌ها در محدودای که برای عمل لیزر مناسب است، تنظیم گردد. در لیزرهای تپی وجود هلیم در همگن کردن هر چه بیشتر محیط تخلیه الکتریکی نقش مهمی دارد.

لیزر گاز کربنیک تپی TEA با یک آغازگر باریک (۱۰۰ns) با یک دنباله بلند (μs) تولید می‌کند. بدلیل دمش برخوردی مولکول‌های CO₂ توسط مولکول‌های N₂، بیشتر انرژی تپ در بخش دنباله تپ لیزری قرار می‌گیرد. وقتی پهنای تپ کوتاه‌تر مد نظر باشد، لازم است تا نیتروژن از مخلوط گازی حذف شود، اما این مسئله به کاهش شدید بازدهی لیزر می‌انجامد. در عمل مقدار کمی از نیتروژن را می‌توان به مخلوط گازی اضافه کرد تا لیزر در یک بازدهی متوسط و با تولید پالس کوتاه‌تر و تقریباً بدون دنباله بلند کار کند [۱۶].

کاربردهای مختلف، نیاز به شکل پالس و مشخصات خروجی متفاوتی دارد. با تغییر مشخصات ورودی، نرخ دمش و آمیزه گازهای لیزری امکان تغییر خروجی لیزر و کنترل آن وجود دارد [۱۷]. تا کنون برای تعیین و کنترل پارامترهای خروجی لیزر، مدل‌های زیادی نظیر مدل‌های چهار، پنج و شش دمایی پیشنهاد شده‌اند. در واقع مدل‌های چهار و پنج دمایی حالت‌های خاصی از مدل شش دمایی می‌باشند.

گرفتن نقش تعیین کننده فرآیندهای دینامیکی چرخشی بهبود یافت [۲۰].

در این مقاله، علاوه بر در نظر گرفتن مدار تخلیه برای محاسبه چگالی الکترون، آهنگ تغییر غلظت مولکول CO ناشی از تفکیک CO₂ به صورت دینامیکی با سایر معادلات تحول زمانی چگالی‌های انرژی شیوه‌های ارتعاشی لیزر کربن دی‌اکسید جفت شده است. ضروری است که آهنگ تغییر غلظت CO₂ به صورت تحول زمانی با معادلات آهنگ لیزر جفت شود زیرا این کار منطبق بر واقعیت حاکم بر لیزر است. با این وجود، در تمام گزارش‌های قبلی غلظت مولکول CO₂ به صورت ثابت و با سعی و خطا وارد معادلات آهنگ لیزر شده است [۱۹، ۲۰]. این امر برخلاف دینامیک حاکم بر محیط تخلیه الکتریکی لیزر CO₂ TEA می‌باشد. هدف این مقاله، شبیه‌سازی سینتیکی یک لیزر تپی CO₂ TEA بسته منطبق بر واقعیت است.

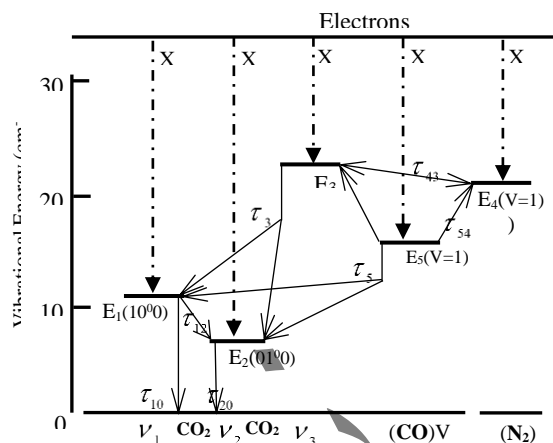
رفتار زمانی پارامترهای خروجی لیزر، همچنین قله توان و استخراج انرژی بهینه در آمیزه گازی با نسبت ۱:۳:۱ به دست آمده است. نتایج به دست آمده، راهنمای خوبی برای طراحی بهینه نوسانگرهای CO₂ TEA برای کاربردهای خاص می‌باشد و تعیین پارامترهای لیزری برای کنترل شکل پالس را با دقت بالا و سازگاری مناسب امکان‌پذیر می‌سازد.

۲. تحلیل نظری و معادلات آهنگ

در این مقاله، برای شبیه‌سازی لیزر CO₂ TEA از مدل سینتیکی شش دمایی توسعه یافته لاندائو-تلی که بر پایه چگالی‌های انرژی شیوه‌های ارتعاشی ترازهای درگیر در فرآیند لیزر می‌باشند، استفاده شده است [۱۹، ۲۰]. نمودار ترازهای ارتعاشی سیستم CO-N₂- شده برای گذار لیزری ۱۰/۶ میکرومتر در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، فرآیندهای اصلی برانگیختگی و فروافت لیزر مورد استفاده در مدل مشاهده می‌گردد.

فرض‌های اصلی که در مدل حاضر در نظر گرفته شده است شامل موارد زیر می‌باشد:

- (۱) پهن شدگی خط همه گذارهای ارتعاشی-چرخشی به دلیل فشار گاز بالا، به صورت پهن شدگی فشاری همگن در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱. نمودار ترازهای انرژی لیزر CO₂

مدل شش دمایی یک مدل جامع سینتیکی هست که تقریباً تمام گذارهایی که بین ترازهای ارتعاشی مختلف رخ می‌دهد را در نظر می‌گیرد و در حال حاضر برای توصیف فرآیندهای سینتیکی لیزر CO₂ به عنوان یک مدل قدرتمند استفاده می‌شود [۱۸].

با این حال، در بیشتر کارهایی که بر روی شبیه‌سازی دینامیکی لیزر CO₂ به استفاده مدل شش دمایی انجام شده است، از یک معادله تجربی برای توزیع چگالی الکترون استفاده می‌کند. استفاده از معادله تجربی برای محاسبه چگالی الکترون‌ها، عامل برخی از عدم تطابق‌های شناخته شده بین نتایج مدل‌سازی و نتایج تجربی می‌باشد. از این رو، اولین و شاید اساسی‌ترین گام در زمینه شبیه‌سازی پارامترهای خروجی یک لیزر تپی CO₂ TEA، محاسبه چگالی الکترون‌های محیط تخلیه باشد. در این پژوهش، با استفاده از معادله سازی محیط تخلیه الکتریکی با یک شبکه الکترونی RLC، چگالی الکترون‌های محیط تخلیه محاسبه شده و به تحلیل برخی رفتارهای الکتریکی و بهینه سازی پارامترهای خروجی لیزر می‌پردازیم.

در مقاله ترابی و همکارانش [۱۹]، برای شبیه‌سازی لیزر CO₂ TEA با پیش یونش UV آرایه سوزنی، رفتار زمانی پالس جریان تخلیه با در نظر گرفتن ویژگی‌های الکتریکی مدار تخلیه و همچنین هندسه پیش یونش، همراه با مدل شش دمایی برای شبیه‌سازی فرآیند انتشار دینامیکی لیزر در نظر گرفته شد که منجر به توافق خوبی با داده‌های تجربی در مورد شکل پالس و انرژی لیزر شد. در کار بعدی آنها، نتایج مدل‌سازی با در نظر

$$\begin{aligned}
& + \left(1 - \frac{hv_1}{hv_3} - \frac{hv_2}{hv_3}\right) \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} \\
& + \left(1 - \frac{hv_4}{hv_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)} \\
& + \left(1 - \frac{hv_3}{hv_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)} \\
& + \left(1 - \frac{hv_1}{hv_5} - \frac{hv_2}{hv_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)}
\end{aligned} \quad (6)$$

معادلات (۱)–(۳) تحولات زمانی چگالی انرژی ذخیره شده در سه شیوه مختلف ارتعاشی مولکول CO_2 (مقارن، خمشی و پادمقارن) را توصیف می کنند. معادلات (۴) و (۵) به ترتیب، تحول زمانی چگالی انرژی ذخیره شده در حالت ارتعاشی مولکولهای N_2 و CO را بیان می کنند. در نهایت، معادله (۶) تحول زمانی چگالی انرژی ذخیره شده در مخلوط گاز CO_2 - He - CO - N_2 را توصیف می کند. در روابط بالا f کسر تفکیک نشده مولکولهای CO_2 و N_2 چگالی الکترونها در محیط تخلیه است. چگالی انرژی سینتیکی کل گاز عبارتست از [۲۱]:

$$E = \left(\frac{5}{2}(1-f)N_{co_2} + \frac{5}{2}N_{N_2} + \frac{3}{2}N_{He} + \frac{3}{2}fN_{co}\right)KT \quad (7)$$

در معادله بالا، N_{CO_2} و N_{N_2} به ترتیب چگالی انبوهی مولکولهای CO_2 و N_2 در تراز پایه هستند که مقدار اولیه آنها برپایه‌ی تابع توزیع بولتزمن در حالت ترازمندی برآورد شده‌اند. تحول زمانی شدت فوتونها در داخل کاواک لیزر به صورت زیر به دست می آید [۲۱]:

$$\frac{dU_v}{dt} = -\frac{U_v}{\tau_c} + chv_0 \left[\frac{\Delta NWU_v}{h} + N_{001}P(J) \frac{S}{c} \right] \quad (8)$$

در معادله ۸، $I_v = cU_v$ شدت باریکه لیزری و

$$W = \frac{F\lambda^2}{4\pi^2 v_0 \tau_s \Delta v_l}$$

به ترتیب: بسامد مرکزی نوسان، ثابت پلانک، c ، h ، v و τ_c به ترتیب: بسامد مرکزی نوسان، ثابت پلانک، سرعت نور و طول عمر فوتون در داخل کاواک لیزر و X_1 ، X_2 ، X_3 ، X_4 و X_5 نیز ضرایب آهنگ برانگیختگی هستند.

$\tau_{ij} = \frac{1}{X_{ij}}$ زمان واهلش از تراز i به تراز j است.

آهنگ تولید کربن مونوکسید به صورت زیر می باشد:

$$\frac{dP_{co}}{dt} = 2kN_e P_{co} \quad (9)$$

در این رابطه، k آهنگ تولید مولکول CO است.

(۲) ترازهای انرژی پایینی (۱۰۰) و (۰۲۰)، به دلیل تشدید فرمی به عنوان یک تراز انرژی واحد نظر گرفته می شود.

(۳) فشار گاز در ناحیه تخلیه نسبت به زمان ثابت در نظر گرفته می شود.

(۴) گسیل القایی فقط برای خط $P(20)$ رخ می دهد. برپایه‌ی شکل ۱، تغییرات زمانی چگالی انرژی ترازهای درگیر در فرآیند لیزر را می توان بدین گونه نوشت [۲۱]:

$$\begin{aligned}
\frac{dE_1}{dt} = & N_e(t) f N_{co_2} h v_1 x_1(T) \\
& + \frac{c h v_1 \Delta N W U_v(t)}{h} + \left(\frac{h v_1}{h v_3}\right) \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} \\
& - \frac{E_1 - E_1(T)}{\tau_{10}(T)} - \frac{E_1 - E_1(T_2)}{\tau_{10}(T_2)} + \left(\frac{h v_1}{h v_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)}
\end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
\frac{dE_2}{dt} = & N_e(t) f N_{co_2} h v_2 x_2(T) + \frac{E_1 - E_1(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} \\
& + \left(\frac{h v_2}{h v_3}\right) \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} - \frac{E_2 - E_2(T)}{\tau_{20}(T)} \\
& + \left(\frac{h v_2}{h v_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)}
\end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
\frac{dE_3}{dt} = & N_e(t) f N_{co_2} h v_3 x_3(T) - \frac{c h v_3 \Delta N W U_v(t)}{h} \\
& - \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} - \frac{E_4 - E_4(T_3)}{\tau_{43}(T)} \\
& + \left(\frac{h v_3}{h v_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{\tau_5(T, T_3)}
\end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
\frac{dE_4}{dt} = & N_e(t) f N_{N_2} h v_4 x_4(T) - \frac{E_4 - E_4(T_3)}{\tau_{43}(T)} \\
& + \left(\frac{h v_4}{h v_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)}
\end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
\frac{dE_5}{dt} = & N_e(t) (1-f) N_{co_2} h v_5 x_5(T) \\
& - \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)} - \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)} \\
& - \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)}
\end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E_1 - E_1(T)}{\tau_{10}(T)} + \frac{E_2 - E_2(T)}{\tau_{20}(T)}$$

۳. مدار تخلیه الکتریکی لیزر و معادلات حاکم بر آن

برای مطالعه نظری لیزر تپی گاز کربنیک و شبیه سازی آن حل دقیق مدار تخلیه الکتریکی ضروری می باشد. معمولاً از مدار شبکه تشکیل تپ (PFN) برای دمش این لیزر استفاده می کنند. در این کار نیز این مدار برای تخلیه الکتریکی لیزر TEA CO₂ در نظر گرفته شده است. معادلات دیفرانسیل حاکم بر مدار با استفاده از قوانین ولتاژ و جریان کیرشهف نوشته می شود. شکل (۲) مدار الکتریکی معادل برای تخلیه الکتریکی لیزر CO₂ تپی را نشان می دهد.

در این شکل $L_1=0.2 \mu H$ ، $L_2=600 nH$ ، $C_1=8 nF$ ، $C_2=43 nF$ ، $V_0=45 KV$ ، $R=10 \Omega$ ، $L=150 nH$ ، $R_d=0.15 \Omega$ (مقاومت تاپروترون) و V_d ، I_1 و I_2 به ترتیب ولتاژ تخلیه، جریان تخلیه و جریان کل و مقاومت پلاسمای تخلیه هستند.

با توجه به شکل (۲)، معادلات دیفرانسیل حاکم بر مدار با استفاده از قوانین ولتاژ و جریان کیرشهف به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{V_1 - I_1 R_d}{L_1} \quad (16)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{V_2 - V_1}{L_2} \quad (17)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{I_2 - I_1}{C_1} \quad (18)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{I_2}{C_2} \quad (19)$$

$$\frac{d(I_2 - I_1)}{dt} = \frac{V_2 - V_1}{L_2} - \frac{V_1 - I_1 R_d}{L_1} - \frac{V_{AB} - (I_2 - I_1)R}{L} \quad (20)$$

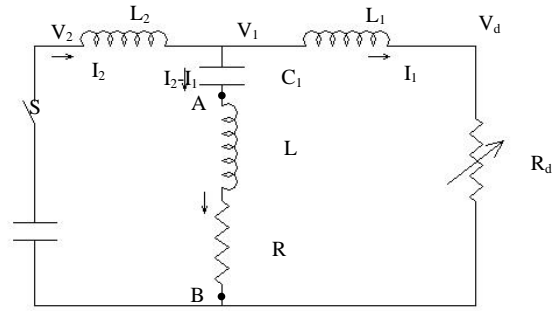
$$V_{AB} = L \frac{dI_2}{dt} - L \frac{dI_1}{dt} + R(I_2 - I_1) \quad (21)$$

$$\frac{dR_d}{dt} = B - Z R_d \quad (22)$$

در این روابط $B = \frac{\beta_{eff} \cdot d}{e \cdot \mu_e \cdot S}$

تعریف می شوند. چگالی الکترودها در محیط تخلیه از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$N_e = \frac{I_1}{A \cdot e \cdot V_d} \quad (23)$$



شکل ۲. نمودار مدار الکتریکی معادل برای تخلیه

اختلاف انبوهی جمعیت بین تراز بالایی و پایینی لیزر نیز از رابطه زیر به دست می آید [۲۰]:

$$\Delta N = N_{001} P(J(001)) - \frac{2J+1}{2J+3} N_{100} P(J+1) \quad (10)$$

در این رابطه:

$$\begin{aligned} N_{001} &= f N_{CO_2} \exp(-hv_3/kT_3) Z \\ N_{100} &= f N_{CO_2} \exp(-hv_1/kT_1) Z \end{aligned} \quad (11)$$

تابع پارش ارتعاشی در این روابط از معادله زیر به دست می آید:

$$Z = [1 - \exp(-hv_1/kT_1)]^{-1} [1 - \exp(-hv_2/kT_2)]^{-2} [1 - \exp(-hv_3/kT_3)]^{-1} \quad (12)$$

P(J) نسبت انبوهی تراز چرخشی لام در تراز ارتعاشی ν ام می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$P(J) = \left(\frac{hB_\nu c}{kT} \right) (2J+1) \exp \left[\frac{-hcB_\nu J(J+1)}{kT} \right] \quad (13)$$

در معادله (۱۳)، B_ν ثابت چرخشی مولکول CO₂ می باشد. به علت فشار بالا در محفظه لیزر TEA CO₂، پهن شدگی خط از نوع لورنتسی می باشد و از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\Delta \nu_L = \sum_i \left[\frac{N_i Q_i}{\pi} \left(\frac{8kT}{\pi \mu_i} \right)^{1/2} \right] \quad (14)$$

در این رابطه N_i چگالی جمعیت گونه i و μ_i جرم کاهش یافته و Q_i سطح مقطع برخورد گونه i است.

توان خروجی لیزر از رابطه زیر به دست می آید [۲۰]:

$$P_{out} = -\frac{A}{2} (\ln R) \cdot I_\nu \cdot \frac{1 - R_{out} - K_{loss}}{1 - R_{out}} \quad (15)$$

که در آن، A مساحت سطح مقطع آینه‌ی خروجی، R بازتابندگی آینه‌ی خروجی و I_ν شدت فوتون‌های گسیلی است.

در این رابطه e بار الکترون، A مساحت سطح الکتروود تخلیه و $V_d = 12 \times 10^6 \text{ cm/sec}$ سرعت کاتوره‌ای الکترون‌ها می باشد.

۴. نتایج شبیه‌سازی و محاسبات

معادلات دینامیکی ۱-۶ با معادله تحول زمانی فوتون‌های داخل کاواک لیزر و معادلات حاکم بر مدار تخلیه الکتريکی لیزر برای محاسبه چگالی الکترون‌ها ۱۶-۲۳ جفت شده و به صورت عددی و به روش رانگ-کوتای مرتبه ۴ به کمک نرم افزار متلب حل گردیدند. در این محاسبات، نسبت آمیزه گازی $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1:1:3$ ، طول محیط فعال $l = 113 \text{ cm}$ ، طول بازتابندگی آینه‌ها $l = 160 \text{ cm}$ ، اتلاف آینه‌ها $\alpha = 0.5\%$ بازتابندگی آینه‌ها $R = 0.65$ ، طول موج نوسان $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ پهنای الکتروودها و فاصله بین الکتروودها هر کدام $2/3 \text{ cm}$ و ولتاژ اولیه 45000 V در نظر گرفته شدند.

شکل ۳ نمودار رفتار زمانی ولتاژ تخلیه شبیه سازی شده و شکل ۴ منحنی تغییرات جریان تخلیه بر حسب زمان با استفاده از معادلات حاکم بر تخلیه را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، با اعمال ولتاژ مورد نیاز برای شکست گاز، این فرآیند در طی 0.2 میکروثانیه در حجم تخلیه رخ می‌دهد در طی این زمان پیک جریان پلاسما رخ داده و مقاومت پلاسما به کمترین میزان می‌رسد. و سپس ولتاژ و جریان شروع به افت می‌کنند و از آنجائیکه مقاومت پلاسما بی‌نهایت نیست، ولتاژ به مقدار غیرصفر در طی 4 میکروثانیه می‌رسد.

تغییرات زمانی توان خروجی نیز به دست آمد و نمودار آن در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار قله توان خروجی برای ورودی‌های داده شده و مدار تخلیه الکتريکی شکل ۲، $12/45 \times 10^6$ وات به دست می‌آید.

پس از آن بهینه سازی قله توان خروجی لیزر مورد شبیه سازی قرار گرفت. برای بهینه سازی نتایج در محاسبات تمام پارامترها به جز متغیر مورد نظر ثابت در نظر گرفته شدند. ابتدا تغییرات توان خروجی بر حسب تغییرات بازتابندگی آینه خروجی محاسبه گردید و نمودار آن در شکل ۶ داده شده است. همانطور

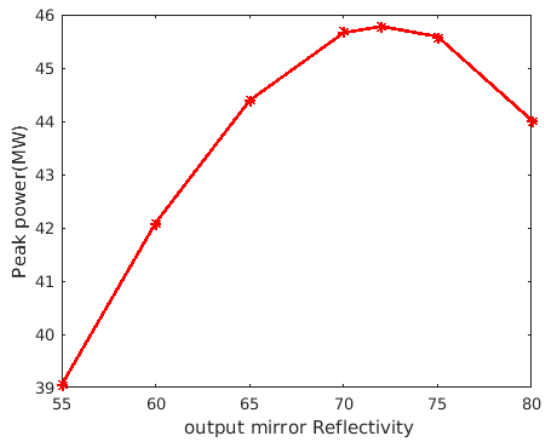
که مشاهده می گردد قله توان خروجی در بازتابندگی $R = 0.72$ به دست می‌آید.

پس از آن تغییرات قله توان خروجی بر حسب ظرفیت خازن پیش یونش محاسبه گردید که در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که از شکل بالا مشاهده می‌شود تغییرات ظرفیت خازن پیش یونش در بازه ۵ تا ۴۰ نانوفاراد رسم شده است و بهینه قله توان خروجی برابر ۲۵ نانوفاراد برای ظرفیت خان پیش یونش به دست آمد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد بهینه ظرفیت خازن پیش یونش اثر مهمی بر به دست آوردن توان خروجی بیشینه در شرایط ورودی یکسان به همراه دارد و لازم است در طراحی، ساخت و چیدمان لیزر محاسبه و شبیه سازی گردد.

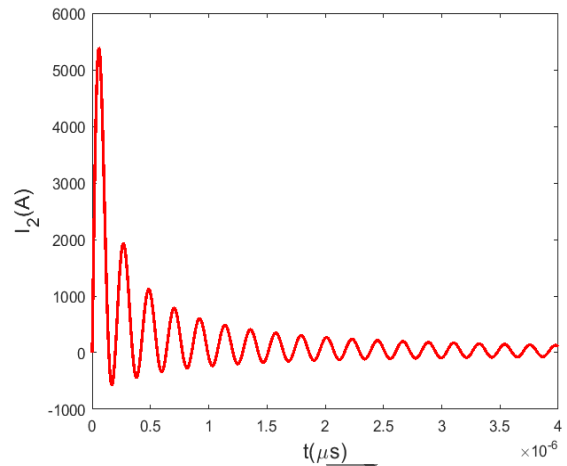
در ادامه، تغییرات قله توان خروجی بر حسب ظرفیت و ولتاژ خازن ذخیره محاسبه گردید. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمودار قله توان خروجی بر حسب ظرفیت و ولتاژ شارژ خازن ذخیره را نشان می‌دهند.

شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند بر خلاف خازن پیش یونش، در مورد خازن ذخیره ولتاژ شارژ به شدت بر قله توان خروجی اثرگذار است و قله توان در ولتاژ ۵۵ کیلوولت به دست می‌آید. همچنین با تغییر ظرفیت خازن ذخیره از ۳۰ تا ۹۰ نانوفاراد، بیشینه توان خروجی در ظرفیت خازن ۵۲ به دست می‌آید.

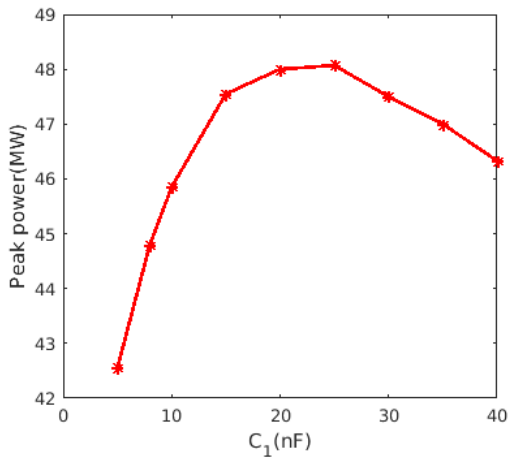
در نهایت نمودار دینامیکی آهنگ گسیست مولکول کربن دی اکسید بر حسب زمان در شکل ۱۰ داده شده است که در زمانی از مرتبه ۴ میکروثانیه به حالت اشباع می‌رسد. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود در کسری از ثانیه بخشی از مولکول‌های CO_2 به CO و O_2 و گونه‌های مولکولی و یونی فراوان دیگری تبدیل می‌شود که این گونه‌ها سبب ناپایداری محیط تخلیه الکتريکی، کاهش طول عمر لیزر و توان خروجی لیزر می‌شوند [۲۵]. بر اساس گزارش اسمیت، چنانچه غلظت درصد گازهای CO به ۲۲٪ و O_2 به ۴٪ برسد توان خروجی لیزر نصف خواهد شد [۲۲]. از نقطه نظر عملی، برای جلوگیری از افت توان خروجی لیزر افزایش طول عمر آن معمولاً از کاتالیست‌های همگن گازی H_2 ، H_2O و... و یا کاتالیست‌های ناهمگن جامد مانند Pd و Pt تلقیح شده بر روی SnO_2 استفاده می‌شود [۲۳، ۲۴].



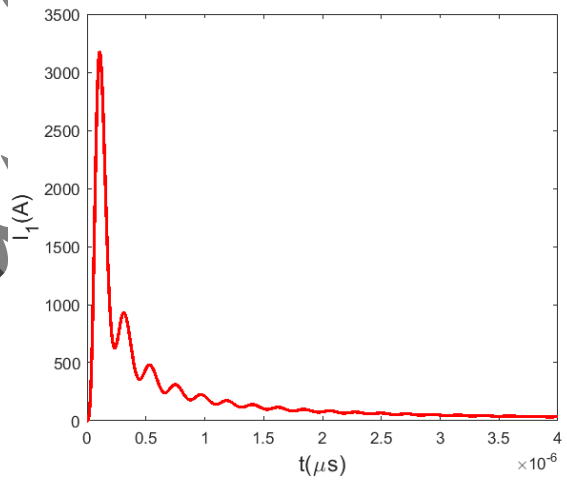
شکل ۶. نمودار قله توان خروجی بر حسب بازتابندگی آینه خروجی



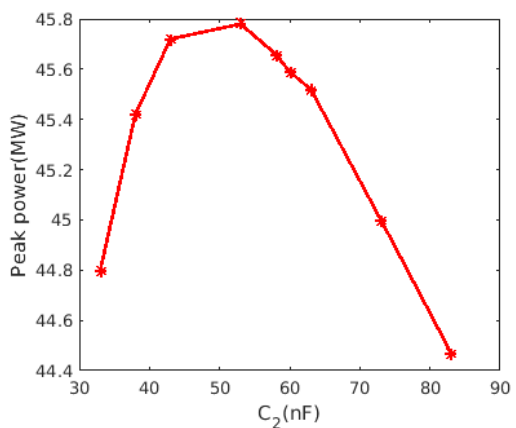
شکل ۳. نمودار رفتار زمانی ولتاژ تخلیه



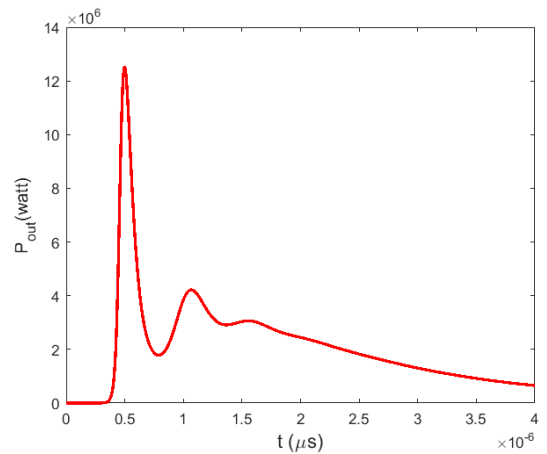
شکل ۷. نمودار قله توان خروجی بر حسب ظرفیت خازن پیش یونش



شکل ۴. منحنی تغییرات جریان تخلیه بر حسب زمان



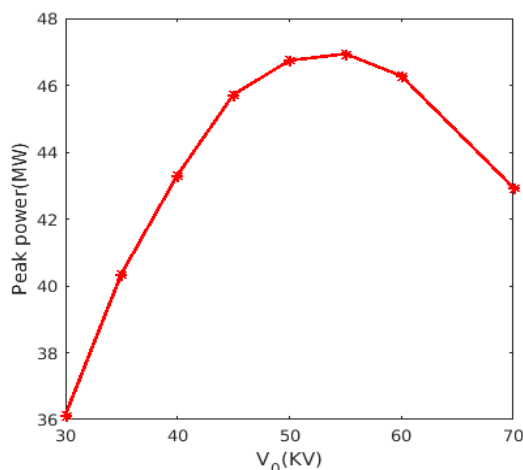
شکل ۸. نمودار قله توان خروجی بر حسب ظرفیت خازن ذخیره



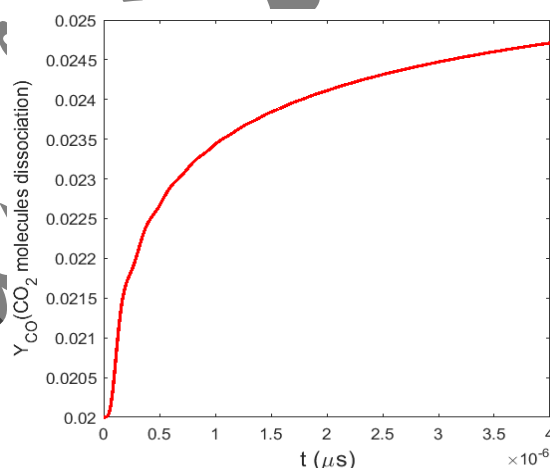
شکل ۵. نمودار رفتار زمانی تپ لیزری با استفاده از معادلات حاکم بر تخلیه

۴. نتیجه گیری

به منظور بیشینه کردن توان خروجی یک لیزر CO_2 TEA، مدل سینتیک شش دمایی بر اساس معادلات توسعه یافته لاندائو-تلا با معادلات حاکم بر محیط تخلیه الکتریکی جفت گردیدند و به روش رانگ-کوتای مرتبه ۴ به صورت عددی حل شده‌اند. در محاسبات تفکیک مولکول CO_2 به CO نیز به صورت یک معادله تحول زمانی در نظر گرفته شد و با سایر معادلات جفت گردید. تفکیک مولکول CO_2 به CO تا پیش از این پژوهش، صرفاً به صورت یک مقدار ثابت و به صورت دستی در معادلات سینتیک لیزر CO_2 وارد می‌شد. که منطبق بر واقعیت حاکم بر لیزر تپی TEA CO_2 بسته نمی‌باشد. سپس رفتار زمانی جریان و ولتاژ تخلیه و قله توان تپ خروجی لیزر، در آمیزه گازی با نسبت ۱:۱:۳ به دست آمد. همچنین مقادیر بهینه برخی پارامترهای لیزر همانند بازتابندگی آینه خروجی، ظرفیت خازن پیش یونش و ظرفیت و ولتاژ شارژ خازن ذخیره برای به دست آوردن بیشینه قله توان خروجی نیز محاسبه گردید. نتایج به دست آمده، راهنمای خوبی برای طراحی بهینه نوسانگرهای TEA CO_2 می‌باشد.



شکل ۹. نمودار قله توان خروجی بر حسب ولتاژ شارژ خازن ذخیره



شکل ۱۰. آهنگ تولید CO حاصل از گسست CO_2 در محیط تخلیه لیزر

۵. مراجع

1. Dumitras, D. C., CO2 laser: Optimisation and application. 2012: BoD-Books on Demand.
2. Witteman, W. J., The CO2 laser. Vol. 53. 2013: Springer.
3. Omi, T. and Numano, K., The role of the CO2 laser and fractional CO2 laser in dermatology. Laser therapy, 2014. 23(1): p. 49-60.
4. Fenske, H. and T. Czotscher, Tailoring the pressure profile of TEA-CO2 laser-induced shock waves for mechanical forming and separation processes. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2020. 7(1): p. 1-14.
5. Momcilovic, M., et al., An original LIBS system based on TEA CO2 laser as a tool for determination of glass surface hardness. Applied Physics B, 2019. 125(11): p. 1-7.
6. Momcilovic, M., et al., Laser-induced plasma as a method for the metallic materials hardness estimation: An alternative approach. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2020. 40(2): p. 499-510.
7. Pezh, A., Development of a dielectric corona pre-ionized TEA CO2 laser with CO2-rich gas mixture suitable for second harmonic generation. Optics Communications, 2022. 515: p. 128187.
8. Li, X., et al., Laser paint stripping strategy in engineering application: A systematic review. Optik, 2021. 241: p. 167036.
9. Luk, K., et al., Use of carbon dioxide lasers in dentistry. Lasers in Dental Science, 2019. 3(1): p. 1-9.
10. Kumar, M., V. Gupta, and A. Nath, Efficient laser isotope separation of ^{13}C using novel linear multi-pass cavity. Applied Physics B, 2005. 80(6): p. 757-763.

11. Kumar, M., et al., Maximization of yield of C-13 isotope by multiphoton dissociation of Freon-22 using high average power TEA CO₂ laser. *Journal of Chemical Sciences*, 2002. 114(6): p. 659-673.
12. Fuß, W., et al., Macroscopic isotope separation of ¹³C by a CO₂ laser. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 1994. 30(2-3): p. 199-203.
13. Bahrapour, A. and A. Askari, Fourier-wavelet regularized deconvolution (ForWaRD) for lidar systems based on TEA–CO₂ laser. *Optics communications*, 2006. 257(1): p. 97-111.
14. Karapuzikov, A., A. Malov, and I. Sherstov, Tunable TEA CO₂ laser for long-range DIAL lidar. *Infrared Physics & Technology*, 2000. 41(2): p. 77-85.
15. Milijanac, S.S., N.N. Stjepanovic, and M.S. Trtica. Possibilities of a metal surface radioactive decontamination using a pulsed CO₂ laser. in *High-Power Lasers in Civil Engineering and Architecture*. 2000. SPIE.
16. Kumar, M., et al., Theoretical estimation and experimental studies on gas dissociation in TEA CO₂ laser for long term arc free operation. *Optics & Laser Technology*, 2013. 52: p. 57-64.
17. Kumar, M., et al., Theoretical and experimental study of V–I characteristics of UV pre-ionized TEA CO₂ laser for variety of laser gas mixtures. *Optics & Laser Technology*, 2007. 39(1): p. 129-135.
18. Ghani, B. A., TEA CO₂ laser simulator: a software tool to predict the output pulse characteristics of TEA CO₂ laser. *Computer physics communications*, 2005. 171(2): p. 93-106.
19. Torabi, R., et al., Simulation and initial experiments of a high power pulsed TEA CO₂ laser. *Physica Scripta*, 2015. 91(1): p. 015501.
20. Torabi, R., H. Saghafifar, and A. M. Koushki, Theoretical and experimental analyses of the TEA CO₂ lasers dynamics by six temperature vibrational-rotational model. *Optik*, 2017. 135: p. 238-243.
21. Soukieh, M., B.A. Ghani, and M. Hammadi, Mathematical modeling of CO₂ TEA laser. *Optics & Laser Technology*, 1998. 30(8): p. 451-457.
22. Smith, A., T. Bett, and P. Browne, The effects of gas additives on TEA CO₂ lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1975. 11(7): p. 335-340.
23. Hokazono, H., et al., Plasma chemistry of the closed-cycle 1 kHz transversely excited atmospheric CO₂ laser with an efficient catalytic CO₂ regenerator. *IEEE journal of quantum electronics*, 1992. 28(8): p. 1792-1797.
24. Zand, M., et al., A 490 W transversely excited atmospheric CO₂ spark gap laser with added H₂. *Laser Physics*, 2018. 28(2): p. 025002.
25. Hokazono, H., Fujimoto, H., Theoretical analysis of the CO₂ molecule decomposition and contaminants yield in transversely excited atmospheric CO₂ laser discharge. *J. Appl. Phys*, 1987. 62(5): p. 1585-1598.