

# تحلیل دینامیکی لیزر TEA CO<sub>2</sub> با استفاده از مدل دینامیکی ارتعاشی-چرخشی ۶ دمایی

رضا ترابی<sup>۱\*</sup>، حسین ثقفی فر<sup>۱</sup> و عزیزمیراد کوشکی<sup>۲</sup>

## چکیده

در این مقاله از سه مدل دینامیکی ارتعاشی-چرخشی ۶ دمایی به منظور توصیف فرآیندهای دینامیکی تابش در لیزرهای TEA CO<sub>2</sub> استفاده می‌شود و با دریافت مشخصات ورودی لیزر از قبیل ترکیب گاز، طول محیط بهره، اتلاف درون کاواک لیزر، سطح مقطع آینه خروجی و غیره، پارامترهای خروجی لیزر از قبیل شکل پالس و توان شبیه سازی می‌شود. معادلات بصورت عددی و با استفاده از روش رانگ-کوتا مرتبه چهار در نرم افزار متلب حل شده و با استفاده از سه مدل ارتعاشی ۶ دمایی، ارتعاشی-چرخشی و نیز استفاده از یک معادله تجربی جهت شبیه سازی چگالی الکترونهای اولیه، شکل عملکرد لیزر شبیه سازی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مدل ۶ دمایی ارتعاشی-چرخشی که از جامعیت بیشتری نسبت به مدل‌های قبلی استفاده شده برخوردار است، بیشترین تطابق را با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی دارا است.

**کلمات کلیدی:** مدل دینامیکی ارتعاشی-چرخشی، روش رانگ-کوتا مرتبه چهار، تحلیل دینامیکی لیزر

## مقدمه

سیستم را تحت کنترل خود درآورد. بسیاری از مدل‌های کامپیوتری لیزر CO<sub>2</sub> به منظور کمک به طراحان این نوع لیزر توسعه یافته‌اند. در همین راستا و به جهت فراهم سازی یک توصیف تئوری از فرآیندهای دینامیکی محیط تخلیه لیزرهای CO<sub>2</sub> پالسی با توان بالا و محیط بهره تقریباً یکنواخت، یک مجموعه معادلات جنبشی با هدف تولید شکل پالس یک لیزر TEA CO<sub>2</sub> توسعه داده شده‌اند. رفتار دینامیکی مرتبط با مدولاسیون پارامترهای عملیاتی یک لیزر CO<sub>2</sub> با استفاده از یک

یک طراح لیزر CO<sub>2</sub> غالباً علاقمند است که توان خروجی لیزر را بر حسب پارامترهای قابل تغییر لیزر از قبیل طول الکترودها، حجم تخلیه، انرژی ورودی به سیستم، فشار گاز، نسبت گازها و غیره، پیشینه کند. این کار باعث می‌شود که با دقت بتوان انتخاب پارامترهای

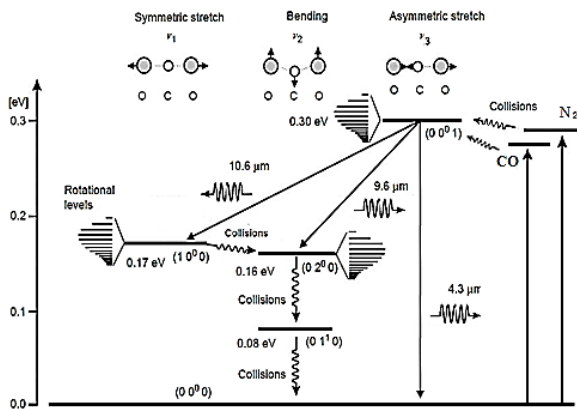
<sup>۱</sup> پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

<sup>۲</sup> پژوهشکده لیزر سازمان انرژی اتمی، تهران

CO<sub>2</sub>، مد ارتعاشی مولکول نیتروژن و اولین حالت ارتعاشی مولکول CO در تعادل درون مدی هستند.

### مدل جنبشی

نمودار سطوح انرژی ارتعاشی-چرخشی سیستم CO - N<sub>2</sub> - CO مرتبط با لیزرهای CO<sub>2</sub> نوعی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ نمودار سطوح انرژی ارتعاشی-چرخشی مرتبط با لیزرهای CO<sub>2</sub>

در این مدل سازی فرضیات زیر مدنظر قرار می گیرد [۴]:  
 ۱. همه گذارهای ارتعاشی- چرخشی پهن شدگی فشاری همگنی دارند.  
 ۲. ترازهای (۰۲۰) و (۱۰۰) در تشدید فرمی با یکدیگر به سر می برند.  
 ۳. انرژی چرخشی در بین حالت های چرخشی از طریق واهلش با ثابت زمانی مرتبط توزیع شده است.  
 بعنوان نمونه تغییرات چگالی انرژی (ergs/cm<sup>3</sup>) ذخیره شده بصورت تابعی از زمان برای تراز  $v_1(100)$  و  $v_3(001)$  را با در نظر گرفتن فرایندهای انتقال انرژی می-توان به شکل زیر بیان کرد:

$$\dot{E}_1 = N_e(t)N_{CO_2}W_1fX_1(T) + W\delta^JW_1I_v(t) + \left(\frac{W_1}{W_3}\right)\frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} -$$

فرمولبندی درونی سودمند معروف به معادلات انباشت<sup>۱</sup> مطالعه می شود [۱ و ۲]. با صرف نظر کردن از کمیت های فیزیکی عملاً غیر قابل دسترس، به مجموعه معادلات شفافی دست پیدا می کنیم که توصیف کننده ویژگی-های اصلی رفتار گذرای لیزر هستند.

در کارهای قبلی انجام شده در این زمینه [۳ و ۲] از یک مدل دینامیکی ارتعاشی ۶ دمایی<sup>۲</sup> (6TVM) جهت شبیه سازی پارامترهای خروجی لیزر استفاده شد و در محاسبات صورت گرفته فقط سینتیک ارتعاشی ترازهای لیزر TEA CO<sub>2</sub> بررسی شده است و فرایندهای چرخشی گذارهای لیزر در نظر گرفته نشده است، عبارتی در مدل ریاضی قبلی واهلشهای چرخشی در یک حالت ارتعاشی آبی فرض می شد و ترازهای چرخشی در هر حالت ارتعاشی بر طبق توزیع بولتزمن جمعیت دار می شدند. اندازه گیریهای تجربی نشان می-دهد که زمان واهلش  $\tau_R$  مربوط به زمان طی شده برای اینکه زیرترازهای چرخشی دوباره یک توزیع بولتزمن را بدست آورند پس از اینکه یکی از زیرترازها در فشار اتمسفر مختل شود، از مرتبه ۰/۱ نانوثانیه است و فرض تعادل در بین ترازهای چرخشی برای پالسهای در ناحیه نانو ثانیه اعتباری ندارد. از اینرو و در جهت افزایش دقت محاسبات تئوری و بمنظور تطابق بیشتر نتایج شبیه سازی با آزمایشات تجربی، بویژه پهنای پالس و توان قله، از مدل دینامیکی ارتعاشی-چرخشی ۶ دمایی<sup>۳</sup> (6TVRM) بهره خواهیم برد. به این منظور در ادامه فرایندهای واهلشی ترازهای چرخشی را در تحلیل خود منظور می کنیم. زیرا این مدل از دقت بهتر و جامعیت بیشتری برای پیش بینی پارامترهای خروجی لیزر نسبت به مدل های موجود برخوردار است. این مدل سازی براساس این فرض است که سه مد ارتعاشی مولکول

1-Reservoir equation

2 Six-temperature vibrational dynamic model

3- Six-temperature vibrational-rotational dynamic model

### نتایج و بحث

روش های عددی متفاوتی برای حل مجموعه معادلات دیفرانسیل جزئی کوپل شده وجود دارد. در این شبیه سازی از یک برنامه کامپیوتری در نرم افزار مطلب برپایه ی روش رانگ-کوتا مرتبه ۴ استفاده کرده ایم. با حل عددی معادلات حاکم بر تغییرات زمانی چگالی انرژی مدهای ارتعاشی و چرخشی با در نظر گرفتن گذار بین ترازهای چرخشی و نیز اعمال پارامتر دمش و همچنین معادله شدت درون کاواک، شبیه سازی پارامترهای خروجی لیزر صورت گرفت. در اینجا این کار را برای لیزر TEA CO<sub>2</sub> که ساخته ایم [۵] انجام می-دهیم و پارامترهای خروجی لیزر از قبیل تغییرات زمانی ولتاژ و جریان هد لیزر و نیز توان خروجی لیزر را محاسبه می کنیم و نتایج را با اندازه گیری های تجربی آن مقایسه می کنیم. محاسبه چگالی الکترونها،  $N_e$ ، به منظور پارامتر دمش در محیط تخلیه با استفاده از معادل سازی تخلیه الکتریکی با یک شبکه الکترونی RLC انجام می شود [۵]. در برخی شبیه سازی ها از یک معادله تجربی جهت محاسبه چگالی الکترونهای اولیه استفاده می شود. که نتایج حاصل از این روش نیز در اینجا ارائه می شود. حل معادلات برای نسبت گاز 1: 1: 8  $(P_{CO_2}: P_{N_2}: P_{He})$  در فشار اتمسفر صورت می گیرد. مقادیر اولیه ی دماهای متناظر با هر یک از ترازهای انرژی و دمای گاز را 300 K، مقدار اولیه چگالی انرژی درون کاواک را  $10^{-9} (erg/cm^3)$ ، چگالی الکترونهای اولیه درون محفظه لیزر را  $10^8 (1/cm^3)$  و ولتاژ اعمالی به الکترودها را ۳۵ KV انتخاب کردیم. در لیزر TEA CO<sub>2</sub> استفاده شده  $L = 82 \text{ cm}$  و  $F = 0.6$  است. در شکل های ۲ تا ۵ نتایج حاصل از شبیه سازی کامپیوتری با استفاده از مدل های مختلف با اندازه گیری های تجربی مقایسه شده است که برخی پارامترهای خروجی در جدول ۱ خلاصه شده است.

$$\frac{E_1 - E_1(T)}{\tau_{10}(T)} - \frac{E_1 - E_1(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} + \left(\frac{W_1}{W_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)} \quad (1)$$

$$\dot{E}_3 = N_e(t) N_{CO_2} W_3 f X_3(T) - W \delta^J W_3 I_v(t) - \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \frac{E_4 - E_4(T_3)}{\tau_{43}(T)} + \left(\frac{W_3}{W_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)} \quad (2)$$

و تحول زمانی شدت درون کاواک را می توان به شکل زیر بیان کرد:

$$\frac{d}{dt}(I_v) = -\frac{I_v}{\tau_c} + chv \left[ \frac{\delta^J W I_v}{h} + N_{001} P(J) S \right] \quad (3)$$

که تغییرات زمانی چگالی وارونی جمعیت میان ترازهای بالایی و پایینی لیزر،  $\delta^J$  به شکل زیر بیان می شود:

$$\frac{d}{dt}(\delta^J) = -2\delta^J W I_v - \frac{\delta^J - P(J)\Delta}{\tau_R} \quad (4)$$

در روابط بالا  $c$  سرعت نور،  $h$  ثابت پلانک،  $J$  عدد کوانتمی چرخشی،  $F W = F \lambda^2 / 4 \pi^2 h v \Delta v \tau_{sp}$ ، فاکتور هم پوشانی،  $l$  طول کاواک،  $L$  طول تشدیدگر،  $\tau_c$  طول عمر فوتون درون کاواک است.  $S = (2\lambda^2 / \pi A \tau_{sp})(d\nu / \Delta\nu)$  که نرخ گسیل خودبخودی است،  $\Delta\nu$  پهنای خط برخوردی تابش،  $d\nu$  پهنای خط تابش لیزر است،  $A$  سطح بازتابنده کوچکترین آینه کاواک،  $N_e(T)$  چگالی الکترونی در واحد حجم،  $W_i = h\nu_i$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) ها انرژی سطوح مختلف انرژی هستند،  $X_i(T)$  نرخ برانگیزش ملکول بواسطه الکترون است،  $T$  دمای گاز است  $T_i$  ها دماهای لحظه ای مدها هستند  $\Delta$  اختلاف جمعیت تراز بالایی  $N_{001}$  و پایینی  $N_{100}$  لیزر است و  $f$  کسری از ملکول های CO<sub>2</sub> است که شکسته نشده اند. مفهوم پارامترهای ذکر شده و نیز مقادیر ثابت های استفاده شده را می توان در [۳، ۲، ۵] یافت.

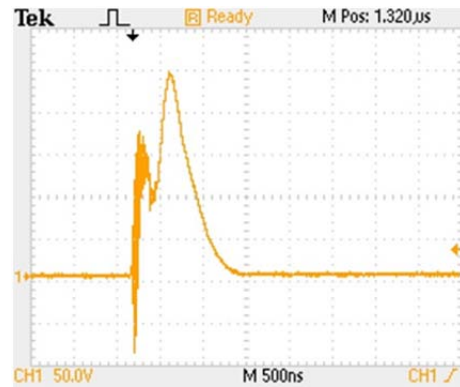
جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی لیزر TEA با انرژی ۵ ژول

نسبت انرژی قله به کل پالس	پهنای پالس) (ns)	بیشینه توان قله (MW) ( )	انرژی (ژول)	لیزر TEA
۰/۶۳	۶۱	۱۵	۱/۸	6TVM با $N_e$ محاسبه شده
۰/۵۳	۷۰	۱۲	۱/۷	6TVRM محاسبه شده
۰/۷۰	۷۹/۲	۱۴	۲/۱	6TVRM با $N_e$ تجربی
۰/۴۶	۷۵	۱۲	۱/۷	تجربی

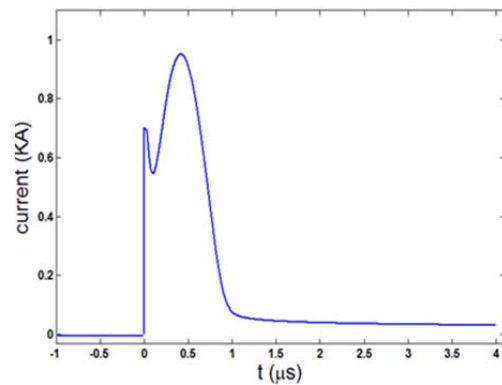
همانگونه که دیده می‌شود علاوه بر یک تفاوت از مرتبه ۵ نانوثانیه‌ای در پهنای زمانی پالس، توافق خوبی میان شکل پالس شبیه‌سازی شده و تجربی توسط مدل 6TVRM با  $N_e$  محاسبه شده بویژه از لحاظ محاسبه انرژی، زمان شروع پالس و همچنین نسبت انرژی قله به کل پالس دیده می‌شود.

### نتیجه گیری

در این مقاله از سه مدل دینامیکی ارتعاشی-چرخشی ۶ دمایی به منظور توصیف فرآیندهای دینامیکی تابش در لیزرهای TEA CO<sub>2</sub> استفاده شد. در این شبیه‌سازی معادلات بصورت عددی و با استفاده از روش رانگ-کوتا مرتبه چهار در نرم افزار متلب حل شد و با استفاده از سه مدل 6TVM، 6TVRM با بهره‌گیری از  $N_e$  محاسبه شده و با استفاده از معادل سازی تخلیه الکتریکی با یک شبکه الکترونی RLC و نیز مدل 6TVRM با استفاده از  $N_e$  تجربی، پارامترهای خروجی لیزر TEA CO<sub>2</sub> ساخته شده صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مدل ۶ دمایی ارتعاشی-چرخشی با  $N_e$  محاسبه شده که از جامعیت بیشتری نسبت به



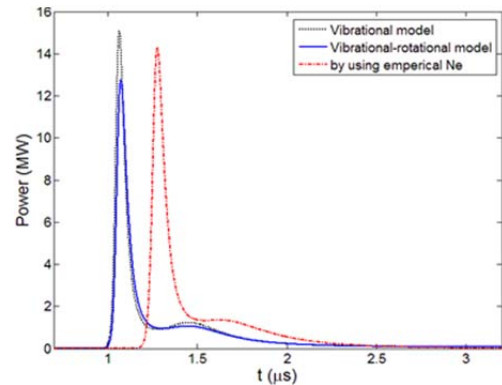
شکل ۲ تغییرات زمانی جریان تخلیه اصلی



شکل ۳ شبیه‌سازی تغییرات زمانی جریان تخلیه اصلی



شکل ۴ تصویر پالس خروجی لیزر



شکل ۵ نمایش پالس شبیه سازی شده لیزر با استفاده از مدل‌های مختلف

### منابع

- [1] Toebaert D., Muys p. , Desoppere E., *Theoretical study of the properties of a modulated fast-flow CO<sub>2</sub>*, Infrared Physics & Technology 38 , 1997, PP. 337-355.
- [2] Ghani B. A., *CO<sub>2</sub> laser simulator: A software tool to predict the output pulse characteristics of TEA CO<sub>2</sub> laser*. Computer Physics Communications 171, 2005, PP. 93–106.
- [3] Smith K, Thomson RM. *Computer modeling of gas laser*. New York:Plenum Press, 1978.
- [4] Yan Chen Qu, Deming Ren, Lii Zhang, Xiaoyong Hu and Fengmei Liu, *Five temperature mathematical modeling of TEA CO<sub>2</sub> laser*, Proc. of SPIE 2006, PP. 62630J-1-7.
- [5] Torabi R., Saghafifar H., Koushki A. M. and Ganjovi A. A., *Simulation and initial experiments of a high power pulsed TEA CO<sub>2</sub> laser*, Phys. Scr. 91 , 2016, PP.015501 (9pp)

مدل‌های قبلی استفاده شده برخوردار است، بیشترین تطابق را با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی دارا است.

### سپاسگزاری

از پژوهشکده علوم و فن آوری اپتیک و لیزر دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان که ساخت لیزر و نیز شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در آنجا انجام شده تشکر لازم را بعمل می‌آوریم.

