بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک
ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و
فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

تعمیم مدل ارتعاشی- چرخشی ۶ دمایی برای شبیه سازی خروجی لیزر CO_2 پالسی فوق اتمسفری

رضا ترابی[۱] و کاوه سیلاخوری[۲]

[۱] دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، شاهین شهر

[۲] سازمان انرژی اتمی، گروه تحقیقاتی فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشکده علوم و فناوری هسته ای، تهران

چکیده -در این مقاله پارامترهای خروجی یک لیزر CO_2 پالسی ۱تا ۳ اتمسفری با استفاده از مدل ارتعاشی- چرخشی ۶ دمایی 6TVRM شبیه‌سازی شده است. با مدلسازی حجم تخلیه با استفاده از یک شبکه الکترونی توزیع شده غیر خطی RLC، چگالی الکترونی بوسیله روش خط انتقال محاسبه شد. پارامترهای خروجی لیزر ازقبیل انرژی، زمان شروع پالس، عرض پالس و دنباله پالس در شرایط عملکردی مختلف فشار، ولتاژ تخلیه و ظرفیت خازن، اندازه‌گیری شده و داده‌های بدست آمده با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است. توافق خوب مشاهده شده میان نتایج آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی، قابلیت استفاده از مدل دینامیکی ارتعاشی- چرخشی ۶ دمایی 6TVRM برای توصیف پارامترهای خروجی لیزر TEA CO_2 سوپراتمسفری را نشان داد.

کلید واژه - مدل ارتعاشی- چرخشی ۶ دمایی؛ 6TVRM و لیزر TEA CO_2 سوپراتمسفری

Generalization of the 6-Temperature Model for Simulation of Super-Atmospheric Pulsed CO_2 lasers Output

Reza Torabi[1] and Kaveh Silakhori[2]

[1] Faculty of applied Sciences, Malek Ashtar University of Technology,Iran, r.torabi@mut-es.ac.ir

[2] Photonics and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran, ksilakhori@yahoo.com

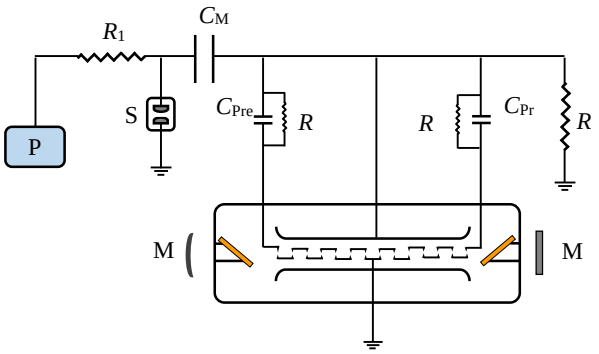
Abstract- The output characteristics of a home-made 1-3 atm pulsed CO_2 laser are simulated by using Six-Temperature Vibrational-Rotational Dynamic Model (6TVRM). The discharge volume was modeled by a non-linear distributed lumped electric circuit and the electron density was calculated by Transmission Line Method. Different characteristics of the laser pulses such as energy, build-up time and duration of the spike and tail parts were measured at various operational conditions of the pressure, discharge voltage and main capacitance. Then, the obtained data were compared with the simulation results calculated for the corresponding conditions. The good agreement observed between the experimental and simulation results has revealed the promising capability of 6TVRM to be generalized for describing the output behavior of the supper-atmospheric pulsed CO_2 lasers.

Keywords: Six-Temperature Vibrational-Rotational Dynamic Model; 6TVRM; High Pressure CO_2 Laser;

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

افزایش روزانه کاربردهای لیزرهای CO_2 پالسی در زمینه‌های مختلف از جمله طیف‌سنجی لیزری، لیدار، صنعت، پزشکی و همچنین فعالیت‌های تحقیقاتی، محققان را قویاً تشویق کرده است تا مدل‌های نظری جدیدی را برای شبیه‌سازی ویژگی‌های ذاتی، دینامیک عملکردی و مشخصه‌های خروجی این نوع لیزر، توسعه دهند. در این راستا، K. Manes و H. Sequin [۱] مجموعه ای از معادلات جنبشی را برای شبیه‌سازی پارامترهای خروجی لیزرهای TEA CO_2 ایجاد کردند و توصیفی نظری از فرآیندهای دینامیکی محیط تخلیه با فرض محیط بهره‌ی یکنواخت ارائه کردند. اولین کار برجسته در مدلسازی کامپیوتری حجم تخلیه لیزر CO_2 توسط K. Smith و همکاران انجام شد. [۲]. آنها همچنین اولین کسانی بودند که حالت های ارتعاشی مولکول‌های CO را به حالت‌های CO_2 و N_2 برای پیش بینی ویژگی های خروجی لیزر CO_2 توسط مدل ۶ درجه دمایی (6TM) اضافه کردند. این مدل با در نظر گرفتن سطوح انرژی ارتعاشی بیشتر درگیر در توزیع جمعیت، نتایج شبیه‌سازی بهتری (در مقایسه با مدل‌های قبلی ۴ و ۵ دمایی) ارائه می‌کند. امروزه، این مدل به طور گسترده‌ای برای تجزیه و تحلیل نظری عملکرد لیزرهای CO_2 پیوسته و پالسی، مدل سازی ریاضی لیزرهای CO_2 کوک‌پذیر و هیبریدی، استفاده می‌شود. اگرچه کارهای زیادی تاکنون بر روی شبیه‌سازی عملکرد لیزرهای TEA CO_2 انجام شده است، گزارش‌های کمی در مورد شبیه‌سازی لیزرهای CO_2 پالسی با فشار گاز بالاتر از فشار اتمسفر منتشر شده است که عمدتا در بر روی تخمین تئوری و تجربی طیف بهره سیگنال کوچک در لیزرهای با پیش یونش UV در فشارهای تا ۱۵ اتمسفر آن هم با استفاده از مدل‌های اولیه ۵ دمایی متمرکز بوده است. همچنین گزارشاتی در زمینه فرایندهای تقویت در پالس‌های لیزری پیکوثانیه CO_2 منتشر شده است. با این حال، با توجه به دانش ما، تاکنون هیچ تلاشی برای شبیه‌سازی شکل پالس یا سایر ویژگی‌های خروجی لیزرهای CO_2 پالسی چند اتمسفری با استفاده از مدل ۶ دمایی انجام نشده است. بنابراین، در این کار، در ادامه کار قبلی ما بر روی شبیه‌سازی حجم تخلیه و استخراج پارامترهای خروجی لیزرهای TEA CO_2 با استفاده از مدل 6TVRM، این مدل به لیزرهای CO_2 پالسی با فشار گاز بالاتر از فشار اتمسفر تعمیم داده شده است. شماتیک لیزر CO_2 پالسی چند اتمسفری ساخته‌شده که در آزمایش‌ها به کار رفته است، در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ نمایی شماتیک از لیزر CO_2 چند اتمسفری استفاده شده.

این لیزر کوچک دارای حجم فعال ۵ سانتی متر مکعب است که از یک جفت الکترود صاف لبه گرد $0.6cm \times 14cm$ که 0.6cm از یکدیگر جدا شده اند، تشکیل شده است. سیستم پیش UV محیط فعال، توسط دو سری ۱۵ عددی شکاف جرقه به عرض ۰,۲۵ میلی متر است که به طور موازی در امتداد حجم فعال قرار دارند. مدار تخلیه توسط یک کلید شکاف جرقه که توسط گاز N_2 در فشارهای مختلف تغذیه می شود تا ولتاژ شکست را کنترل کند، روشن می شود. به طوری که با تغییر ولتاژ تخلیه و خازن اصلی، نرخ تکرار پالس ثابت ۱ هرتز با تنظیم فشار گاز N_2 و همچنین مقاومت R_1 قابل حصول است. تشدید کننده لیزری متشکل از یک آینه عقب تمام تابنده از

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

جنس مولیبدن با شعاع انحنای ۵ متر و یک آینه جلویی تخت ژرمانیوم طبیعی است که به فاصله ۳۵ سانتی متر از یکدیگر قرار دارند. دو پنجره بوستر ZnSe در امتداد محور تشدیدگر محفظه لیزر را از محیط پیرامون جدا می‌کنند. یک جریان ثابت گاز با نسبت گاز CO_2:N_2:He≡1:1:8 توسط یک سیستم گاز مناسب شامل شیرهای متغیر، فشارسنج و جریان‌سنج گاز به محفظه لیزر تزریق می‌شد. انرژی و شکل زمانی پالس های خروجی لیزر توسط یک ژول‌متر (Coherent، LM-P10) و یک فوتون درگ (ORIEL، 7455) متصل به یک اسیلوسکوپ دیجیتال ۲۵۰ مگاهرتز (DS-1250-EZ) پایش شد.

مدل ارتعاشی-چرخشی ۶ دمایی

دو روش مرسوم برای تجزیه و تحلیل عملکرد و توصیف دینامیک تابش لیزرهای CO_2 وجود دارد که اصطلاحاً مدل دمایی و مدل معادله نرخ نامیده می شوند. ما ترجیح می‌دهیم با مدل دمایی به دلیل جامعیت، سادگی بکارگیری آن برای روش های مختلف برانگیزش و تطابق بهتر با داده های تجربی کار کنیم.

اکثر مدل های کاربردی در این زمینه با معادلات دیفرانسیل جفت شده متعددی سروکار دارند که در حالت پایدار به معادلات جبری غیرخطی تبدیل می شوند. توزیع جمعیت در سطوح مختلف هر مد ارتعاشی با دمای مشخصه معین بر اساس توزیع بولتزمن تعیین می‌شود. بنابراین، توصیف انتقال انرژی انتقالی و ارتعاشی مولکول‌ها بر اساس معادلات لاندو-تلر امکان پذیر می شود [۲]. این معادلات را می‌توان به صورت عددی با این فرض حل کرد که توزیع فضایی چگالی الکترون و نرخ برانگیزش هر سطح انرژی مشخص است. این رویکرد باعث می‌شود که فرآیندهای انتقال انرژی بین سطوح چرخشی حالت‌های ارتعاشی N_2، CO و CO_2 به صورت کیفی توضیح داده شوند (مدل ۶ درجه حرارت). در این مدل، محیط فعال کاملاً همگن فرض می‌شود. از سوی دیگر، فرآیندهای واهلش هر تراز ارتعاشی را می توان به طور کامل توسط فرآیندهای انتقال انرژی مربوطه توصیف کرد. بنابراین، چگالی انرژی حالت های مختلف را می‌توان بر اساس دماهای انتقالی و ارتعاشی سیستم تعیین کرد.

تغییرات زمانی وارونی جمعیت بین زیرترازهای چرخشی ترازهای ارتعاشی بالایی و پایینی لیزر به شکل زیر است:

$$\dot{\delta}^J = -2\delta^J W I_\upsilon - \frac{\delta^J - P(J)\Delta}{\tau_R} \qquad (۱)$$

که $\Delta = N^u - N^l = N_{00^01} - N_{10^00}$ چگالی وارونی جمعیت بین تراز بالایی و پایینی لیزر و I_υ شدت دورن کاواک است. وابستگی فشاری پهنای خط برخوردی تابش لیزر به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta\upsilon = \sum_i \left\{ \frac{P_i Q_i}{\pi KT} \left[\frac{8kT}{\pi} \left(\frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{1}{M_i} \right) \right]^{1/2} \right\} \qquad (۲)$$

که $(i=CO_2, CO, N_2, He)$ و Q_i سطح مقطع برخورد هر یک از مولکول‌هاست. ضریب بهره موضعی محیط لیزر به شکل زیر بیان می‌شود:

$$g(\upsilon) = \upsilon h W \Delta = \frac{F\lambda^2 \Delta}{4\pi^2 \Delta\upsilon \tau_{sp}} \qquad (۳)$$

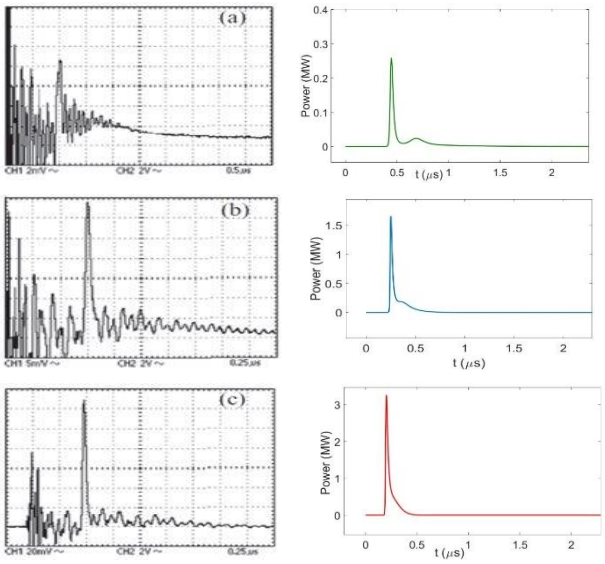
سایر جزئیات ریاضی و فیزیکی و مجموعه کامل معادلات مشتق شده و نیز تمام ثوابت فیزیکی و پارامترهای استفاده شده جهت شبیه‌سازی را می‌توان در گزارش های قبلی ما یافت [۳]. برخی مشخصات فیزیکی و هندسی لیزر در **Error! Reference source not found.** آورده شده است.

آنچه به وضوح در شکل پالس‌های واقعی دیده می‌شود و به طور منطقی در نمودارهای مشابه شبیه‌سازی شده منعکس می‌شود، افت قابل‌توجه در دامنه و مدت زمان دنباله پالس‌ها با افزایش فشار گاز است. علاوه بر این، زمان ایجاد پالس های لیزر با افزایش فشار گاز کاهش می یابد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

جدول ۱ مقادیر برخی کمیت‌ها

علامت	کمیت	مقدار	واحد
L	طول تشدیدگر	35	سانتی‌متر
λ	طول موج	10.6	میکرومتر
J	عدد کوانتومی چرخشی	20	---
F	فاکتور همپوشانی	0.46	---
R_{out}	ضریب بازتاب آیینه خروجی	0.65	---
$f_{1\,atm}$	فاکتور نشکستن مولکول CO_2 در فشار ۱ اتمسفر	0.15-0.2	---
$f_{2\,atm}$	فاکتور نشکستن مولکول CO_2 در فشار ۲ اتمسفر	0.15-25	---
$f_{3\,atm}$	فاکتور نشکستن مولکول CO_2 در فشار ۳ اتمسفر	0.12-22	---
$f_{5\,atm}$	فاکتور نشکستن مولکول CO_2 در فشار ۵ اتمسفر	0.25	---
$f_{10\,atm}$	فاکتور نشکستن مولکول CO_2 در فشار ۱۰ اتمسفر	0.27	---
A	سطح مقطع موثر آینه خروجی	0.49	cm^2



شکل ۲ شکل پالس‌های نوعی تجربی و شبیه سازی شده لیزر
a) P=1 atm, V=15 kV, C_M=5.4 nF; b) P=2 atm, V=25 kV, C_M=8.1 nF; c) P=3 atm, V=35 kV, C_M=10.8 nF.

جدول ۲ مشخصات پالس‌های لیزر تجربی و شبیه‌سازی شده در شرایط متفاوت

P (atm)	E_{in} (J)	E_{out} (mJ)		E_s / E_t		τ_s (ns)		τ_t (μs)		t_b (μs)	
		Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim
1	0.6	20	18	~0.7	~0.8	110	45	1.2	0.8	0.7	0.45
1	2.5	45	42	---	~0.8	---	42	---	0.7	---	0.4
2	2.4	55	50	~1.1	~1.3	47	42	0.8	0.6	0.6	0.35
2	3.6	90	90	~1.1	~1.3	45	40	0.7	0.6	0.5	0.35
2	6.6	115	120	~1.1	~1.3	45	40	0.7	0.5	0.5	0.3
3	3.3	50	48	~1.4	~1.5	47	46	0.6	0.4	0.4	0.3
3	4.9	100	98	~1.4	~1.5	40	35	0.6	0.3	0.4	0.3
3	6.6	160	155	~1.4	~1.5	37	30	0.5	0.3	0.3	0.25

به منظور تحلیل دقیق توافق نتایج شبیه‌سازی با آزمایشات تجربی، برخی پارامترهای کمی شکل پالس‌ها در شرایط عملیاتی مختلف در جدول ۲ خلاصه شده است.

نتیجه‌گیری

از مدل ارتعاشی- چرخشی ۶ دمایی 6TVRM جهت شبیه‌سازی انرژی خروجی و برخی مشخصه‌های زمانی پالس اصلی و دنباله پالس یک لیزر CO_2 پالسی فشار بالا استفاده شد. توافق خوبی بین مقادیر تجربی و شبیه سازی‌شده انرژی پالس خروجی در فشارهای مختلف گاز مشاهده شد. این مدل همچنین می‌تواند رفتار نسبت انرژی پالس اصلی به دنباله را در شرایط مختلف عملکردی پیش‌بینی کند.

مراجع

[1] K. R. Manes and H. J. Seguin, **Analysis of the CO_2 TEA laser**, J. Appl. Phys. 43, 5073 (1972).

[2] K. Smith, R.M. **Thomson, Computer Modeling of Gas Lasers**, Plenum Press, New York, 1978.

[3] R. Torabi, et al., **Theoretical and experimental analyses of the TEA CO_2 lasers dynamics by six temperature vibrational-rotational model**, Optik 135 (2017)

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]