

akoushki@aeoi.org.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۴/۳۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۲/۱۲)

۲۲۰۳

۵۰۰

روش‌های بهینه‌سازی، روش الگوریتم ژنتیک است [۲-۶]. این روش اولین بار توسط جان هلند معرفی گردید که ایده اصلی آن را از ترکیب ژنی و اصول انتخاب طبیعی داروین گرفته بود [۷]. ژن‌ها واحدهای پایه‌ای سازنده الگوریتم ژنتیک هستند. یک ژن کد دودویی<sup>۲</sup> یک متغیر است. به مجموعه ژن‌ها، کروموزوم گفته می‌شود. هر کروموزوم می‌تواند شامل یک یا چند ژن (متغیر) باشد. هر کروموزوم یک تابع هدف<sup>۳</sup> متناظر دارد. الگوریتم با تعداد زیادی کروموزوم تصادفی که به آنها جمعیت می‌گویند شروع می‌شود. تابع هدف برای همه کروموزوم‌ها محاسبه می‌شود و سپس کروموزوم‌ها، بر اساس

در لیزرهایی با شارش محوری سریع گاز، گاز با سرعت زیاد در امتداد محور کاواک عبور کرده و گرما با خارج شدن مخلوط گازها از محیط منتقل می‌شود. در این لیزرها به دلیل دایره‌ای بودن حجم تخلیه، کیفیت لیزر مطلوب بوده و در نتیجه از آنها برای کاربردهایی از جمله سوراخ کاری، برش کاری و پردازش سطح استفاده می‌شود [۱].

در طی سال‌های اخیر برای پیش‌بینی کارایی این نوع لیزرها، مدل‌های شبیه‌سازی عددی مختلفی ارائه شده است. یک مؤلفه کلیدی در طراحی لیزر، بهینه‌سازی شرایط عملکرد لیزر برای ماکزیمم کردن توان خروجی آن است. در سال‌های اخیر روش‌های بهینه‌سازی کلی<sup>۱</sup> به کار رفته است. یکی از

۲. Binary

۳. Objective function

۱. Global optimization

مقدار تابع هدف از بهترین‌ها به بدترین‌ها ارزش‌گذاری می‌شوند. کروموزوم‌ها با مقدار تابع هدف کم، حذف می‌شوند. کروموزوم‌های حذف نشده به عنوان والد<sup>۱</sup> نگه داشته می‌شوند و برای ایجاد نسل‌های جدید به اندازه کروموزوم‌های حذف شده به کار می‌روند. بنابراین بعد از هر تکرار تعداد کل کروموزوم‌ها، ثابت باقی می‌ماند. بر روی کروموزوم‌های والد، عملگرهای ترکیب<sup>۲</sup> و جهش انجام می‌گیرد و به تعداد کروموزوم‌های حذف شده، کروموزوم نسل جدید به وجود می‌آید. تابع هدف برای همه کروموزوم‌ها محاسبه می‌گردد و سپس ارزش‌گذاری می‌شوند. هنگامی که تابع هدف به حد قابل قبولی برسد (همگرا شود) الگوریتم متوقف می‌شود.

در پژوهش‌های قبلی فشارهای جزئی مخلوط گازها در لیزر گاز کربنیک موج پیوسته به کمک الگوریتم ژنتیک بهینه گردید. در این پژوهش‌ها، اثر سرعت شارش گاز در نظر گرفته نشده که پارامتر بسیار شاخصی در افزایش توان لیزرهای پر قدرت گاز کربنیک پیوسته با شارش محوری سریع گاز می‌باشد [۳ و ۱۴ و ۱۵]. علاوه بر این، مرجع [۳] هیچ معادله فیزیکی برای مسئله ارائه نکرده و تنها بهینه‌سازی را بر روی یکی از مخلوط‌های گازی تجربی انجام داده و توان انتظاری از آن مخلوط گازی را به دست آورده است. ولی در این پژوهش سرعت شارش گاز در لیزر گاز کربنیک موج پیوسته به کمک الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شود. در این کار، تابع هدف، توان خروجی لیزر بوده و هدف بیشینه کردن آن است. توان خروجی لیزر وابسته به پارامترهای مختلفی همانند نسبت فشار مخلوط گازها، ولتاژ و جریان تخلیه، قطر کاواک لیزر، سرعت شارش گاز و ... است. بنابراین بهینه‌سازی همه این پارامترها به طور همزمان مشکل است زیرا همه این پارامترها وابستگی قوی به فرآیندهای سینتیکی دارند.

در این مقاله، هدف ما بهینه‌سازی سرعت شارش گاز برای به دست آوردن بیشینه توان خروجی از لیزر به کمک الگوریتم ژنتیک است.

در بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک را به عنوان برنامه اصلی و توان خروجی را تابع هدف به کار می‌بریم. اگر توان خروجی لیزر در واحد حجم  $P_L$  و توان حرارتی  $P_H$  باشند. می‌توان نوشت [۸]:

$$P_L = \left( \frac{\eta}{1-\eta} \right) P_H \quad (۱)$$

که در این رابطه  $\eta$  کارایی لیزر است. افزایش دما در اثر شارش گاز از داخل کاواک لیزر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta T = \frac{P_H}{\dot{m}C_p}, \quad (۲)$$

در این رابطه  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط گازها و  $\dot{m}$  دبی جرمی می‌باشد. با ادغام رابطه‌های (۱) و (۲) توان خروجی لیزر به صورت زیر می‌باشد:

$$P_L = \left( \frac{\eta}{1-\eta} \right) \dot{m}C_p\Delta T, \quad (۳)$$

در این رابطه فرض شده است که فشار کل مخلوط گاز داخل تیوب لیزر ثابت است. در رابطه (۳):  $\Delta T = T_2 - T_1$  است که  $T_1$  دمای ورودی گاز به تیوب و  $T_2$  دمای سینتیکی گاز در محفظه تخلیه است. دمای سینتیکی گاز برای یک تخلیه استوانه‌ای را به صورت زیر می‌توان نوشت [۹]:

$$T_2 = T_0 + \frac{W}{\lambda\pi\lambda_g}, \quad (۴)$$

در این رابطه  $T_0$  دمای سطح محفظه تخلیه،  $W$  توان در واحد طول تخلیه،  $\lambda_g$  ضریب هدایت حرارتی مخلوط گازها هستند. ظرفیت گرمایی ویژه برای هر گاز به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۰ و ۱۱]:

$$\frac{C_p}{R} = A + B\bar{T} + \frac{C}{3}(\bar{T}^2 - T_1T_2) + \frac{D}{T_1T_2} \quad (۵)$$

که در آن  $\bar{T}$  دمای میانگین گاز و  $R$  ثابت عمومی گازها،  $A$ ،  $B$  و  $C$  و  $D$  ثابت‌های مشخصه هر گاز هستند. ظرفیت حرارتی مخلوط گازهای لیزر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_p = \sum_i X_i C_{p_i}, \quad (۶)$$

که در آن  $X_i$  کسر مولی برای هر گاز در مخلوط گازهای لیزر

۱. Parent

۲. Crossover

جدول ۱. مقادیر پارامترهای ثابت لیزر.

قطر تیوب لیزر (cm)	شعاع انحنای آینه عقب (m)	بازتابندگی آینه جلو	طول موج لیزر	اتلاف نوری آینه	طول کل تشدیدگر (m)	جریان تخلیه (mA)
۲/۴	۱۰	٪۷۰	۱۰/۶	٪۱	۲/۰۴	۲۵۰

است. دبی جرمی به وسیله رابطه زیر تعریف می شود:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho v A, \quad (7)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی جرمی برای مخلوط گازها،  $v$  سرعت شارش مخلوط گازها و  $A$  سطح مقطع لیزر است. جرم مولکولی متوسط و چگالی متوسط برای مخلوط گازها توسط روابط زیر تعریف می شوند:

$$\bar{M} = \sum_i X_i M_i, \quad (8)$$

$$\bar{\rho} = \frac{P \bar{M}}{R \bar{T}}. \quad (9)$$

از ترکیب روابط (۳) و (۷) رابطه بین توان خروجی لیزر و سرعت شارش گاز به صورت زیر به دست می آید:

$$P_L = \left( \frac{\eta}{1-\eta} \right) \rho v A C_p \Delta T, \quad (10)$$

از لحاظ نظری یک رابطه تقریباً خطی بین توان خروجی و سرعت شارش گاز به دست می آید که به طور تجربی در مراجع ۴ و ۱۲ اثبات شده است. در این معادله سایر پارامترها ثابت فرض شده و در جدول ۱ ارائه گردیده اند.

مراحل اصلی اجرای کد گذاری الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی سرعت گاز در محیط نرم افزار Matlab به صورت زیر می باشد [۱۳]:

**گام اول:** اندازه جمعیت ( $N_p$ )، تعداد نسلها ( $G_{max}$ )، احتمال عملگر ترکیب ( $P_x$ )، احتمال جهش ( $p_m$ ) و اندازه ژن با توجه به دامنه تغییرات سرعت مخلوط گاز در شروع عمل بهینه سازی تعیین شدند و همه کروموزومها به صورت تصادفی انتخاب شدند. دامنه تغییرات سرعت شارش گاز از یک متر بر ثانیه تا ۵۰۰ متر بر

ثانیه در نظر گرفته شد. هر کروموزوم شامل ۸ بایت است.

**گام دوم:** تبدیل رشته دودویی از پایه ۲ به پایه ۱۰ (رمز گشایی رشته های دو دویی به اعداد ده دهی) و سپس عدد حقیقی معادل برای هر کروموزوم پیدا گردید.

**گام سوم:** توان خروجی لیزر با استفاده از رابطه (۱۰) برای همه کروموزومها محاسبه گردید.

**گام چهارم:** همه کروموزومها مطابق با مقدار توان خروجی آنها (تابع هدف) رتبه بندی شدند. سپس کروموزومها مطابق با توان خروجی محاسبه شده در گام سوم برای آنها، به ترتیب از بزرگترین به کوچکترین مرتب شدند و ۵۰٪ از کروموزومها که دارای توان خروجی پایین تری بودند حذف شدند. تعداد کروموزومهای حذف شده  $\frac{N_p}{2}$  و کروموزومهای نگه داشته شده نیز  $\frac{N_p}{2}$  است.

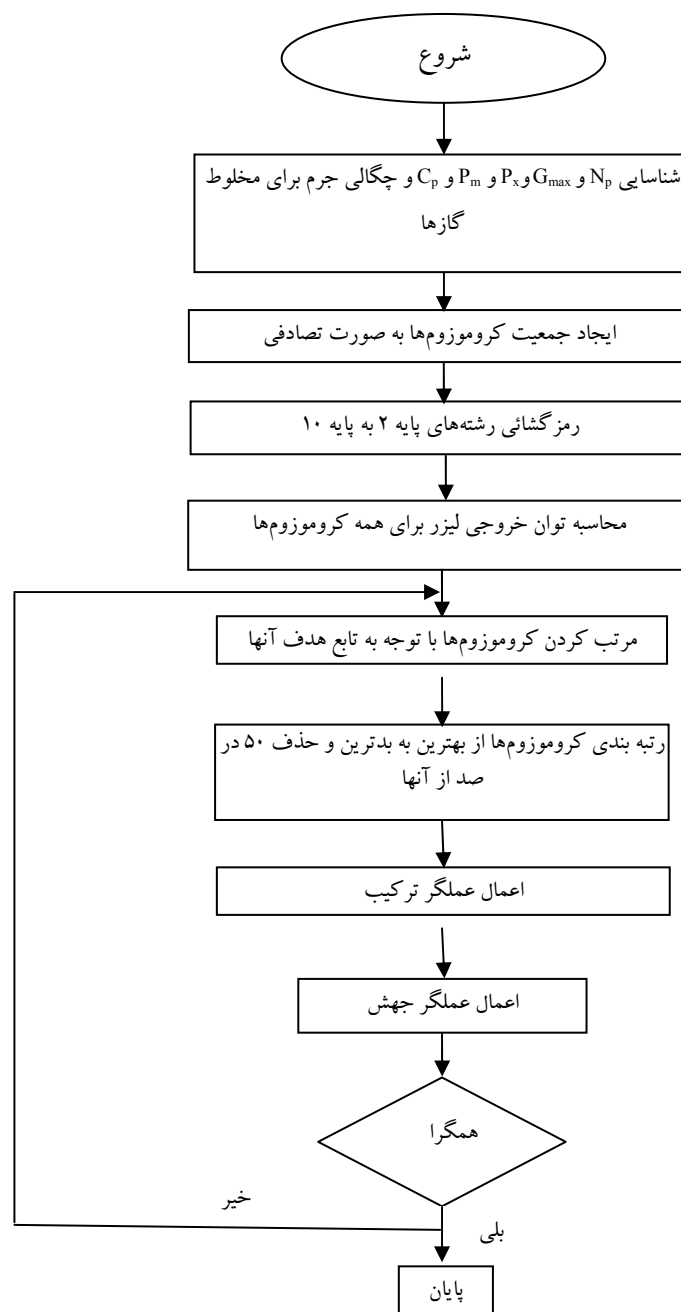
**گام پنجم:** عملگر ترکیب بر اساس قاعده چرخ گردان (roulette wheel) اعمال شد و کروموزومهای والد، کروموزومهای فرزند<sup>۱</sup> را به وجود می آورند. تعداد کروموزومهای فرزند  $\frac{N_p}{2}$  است که با کروموزومهای باقی مانده از گام پنجم، جمعیت جدید را به وجود می آورند.

**گام ششم:** عملگر جهش<sup>۲</sup> اعمال می شود. در اثر عمل جهش ژنی کروموزومها، در صد کمی از بیت های ۰ به ۱ و ۱ به ۰ تبدیل می شود (حدود ۲٪).

**گام هفتم:** توان خروجی لیزر (تابع هدف) برای کل جمعیت جدید بعد از گام ششم محاسبه شد. این فرآیند آنقدر تکرار شد تا تابع هدف (توان خروجی لیزر) همگرا شد و توان خروجی لیزر برای همه کروموزومها در مرحله ششم یکسان شد. در این حالت الگوریتم متوقف شد و از طرفی بهترین کروموزوم معادل با سرعت

۱. Offspring

۲. Mutation



شکل ۱. فلوچارت اجرای الگوریتم برای بهینه سازی سرعت مخلوط گاز داخل کاواک لیزر.

شارشی که تابع هدف (توان خروجی لیزر) ماکزیمم دارد پیدا شد. در شکل ۱ فلوچارت اجرای الگوریتم برای بهینه سازی سرعت شارش مخلوط گاز آمده است.

حال اجرای عمل بهینه سازی که در بخش ۲ ذکر گردید شروع می‌شود. در هنگام اجرای الگوریتم جریان تخلیه، ولتاژ تخلیه، فاصله بین آینه‌های تشدیدگر و فاصله بین الکترودها ثابت بودند.

برای به دست آوردن دمای گاز که به عنوان یکی از پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده است می بایست ضریب هدایت حرارتی مخلوط گازها محاسبه گردد این کار با استفاده

قبل از بهینه کردن ابتدا چگالی گاز و ظرفیت حرارتی ویژه، سپس هدایت حرارتی و دمای مخلوط گازهای لیزر محاسبه گردیدند.

جدول ۲. توان خروجی لیزر قبل و بعد از بهینه سازی فشار گازها.

توان خروجی لیزر (watt)	$P_{He}$ (torr)	$P_{N_2}$ (torr)	$P_{CO_2}$ (torr)	
۵۰۰	۴۲/۷۵	۲۳/۲۵	۵/۲۵	بهینه نشده (تجربی)
۲۲۰۰	۴۲	۲۶/۴	۲	بهینه شده (محاسباتی)

جدول ۳. توان خروجی لیزر قبل و بعد از بهینه سازی سرعت شارش گازها.

توان خروجی لیزر (watt)	سرعت شارش گاز (m/s)	
۵۰۰	۲۰۰	بهینه نشده (تجربی)
۲۲۰۳	۴۸۷	بهینه شده (محاسباتی)

سریع گاز (FAF) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، برای به دست آوردن ماکزیمم توان خروجی از لیزر ارائه گردید. توان خروجی لیزر تابع هدف بوده است و سرعت شارش مخلوط گازها متناظر با این تابع هدف به دست آمده است. توان پیش بینی شده در این پژوهش با توان تجربی به دست آمده از یک لیزر مشابه در مرجع [۱۶] کاملاً مطابقت دارد.

از فشارهای جزئی بهینه شده انجام گردید و جدول ۲ مقادیر فشار گازها را نشان می دهد. مشاهده می شود که بعد از بهینه کردن فشار گازها، توان خروجی لیزر به ۲۲۰۰ وات افزایش می یابد [۱۵ و ۱۴]. فشارهای بهینه به طور عملی آزمایش گردیدند و توان حدود ۸۰۰ وات به دست آمد که با مقدار پیش بینی نظری اختلاف دارد. علت این اختلاف مربوط به ساخت قطعات اپتیکی لیزر همانند درصد عبور آینه ها، تنظیم آینه ها، همچنین شکست مولکول  $CO_2$  و ایجاد پلازما در محیط لیزر و خطای دستگاه های اندازه گیری همانند فشار سنج ها و دلیل دیگری مربوط به پارامتر دقت هنگام کد گذاری برنامه می باشد. دقت هر متغیر تا چهار رقم بعد از اعشار در نظر گرفته شده است و تعداد بیت های هر ژن (متغیر) با توجه به دقت تعریف شده تعیین می گردد. اما دستگاه های اندازه گیری در آزمایشگاه فاقد چنین دقتی می باشند. عدم کوپل همه این پارامترها در معادلات سینتیک نیز، یکی دیگر از این دلایل می باشد.

جدول ۳ سرعت شارش گاز را قبل و بعد از بهینه سازی نشان می دهد. توان خروجی لیزر بعد از بهینه سازی سرعت شارش گاز به ۲۲۰۳ وات افزایش می یابد. متأسفانه پمپ توربو مورد استفاده توان افزایش سرعت شارش گاز بیش از ۲۰۰ متر بر ثانیه را ندارد.

در این کار، یک روش کلی برای بهینه کردن سرعت شارش مخلوط گازهای لیزر گاز کربنیک پیوسته با شارش محوری

ضریب وشکسانی در دمای  $T$  برای یک گاز خالص با وزن مولکولی  $M$  تابعی از پارامترهای  $\sigma_m$  (قطر مشخصه مولکول بر حسب آنگستروم) و  $\Omega_{\mu}$  (برابر با  $\frac{k_B T}{\epsilon_m}$  که  $k_B$  ثابت بولتزمن و  $\epsilon_m$  انرژی مشخصه برهم کنش بین مولکولها هستند) است و به صورت زیر تعریف می شود [۱۰ و ۱۶]:

$$\mu_i = \frac{\sqrt{MT}}{\sigma_m^2 \Omega_{\mu}}, \quad (1)$$

جدول ۴ مقادیر  $\sigma_m$ ،  $\epsilon_m$  و  $C_p$  را برای مولکولهای  $CO_2$ ،  $N_2$  و  $He$  نشان می دهد.

ضریب وشکسانی برای مخلوط گازها برای مولکولهای  $CO_2$ ،  $N_2$  و  $He$  براساس معادله نیمه تجربی Wilke محاسبه می گردد:

جدول ۴. مقادیر  $\sigma_m$ ،  $\varepsilon_m$  و  $C_p$  برای مولکول‌های  $\text{CO}_2$ ،  $\text{N}_2$  و  $\text{He}$ .

گاز	M(gr/mol)	$\sigma_m (A^\circ)$	$\Omega_\mu$	$\frac{\varepsilon_m}{k_B} (K^{-1})$	$C_p (j/mol.k)$
$\text{CO}_2$	۴۴/۱۰	۳/۹۹۶	۱/۲۱۱	۱۹۰	۳۹/۲۶
$\text{N}_2$	۲۸/۰۲	۳/۶۸۱	۰/۹۷۹	۹۱/۵	۲۹/۱۹
He	۴/۰۰۳	۲/۵۷۶	۰/۶۸۸	۱۰/۲	۲۰/۷۹

ضریب هدایت حرارتی مخلوط گازهای لیزر با استفاده از رابطه واسیلجیوا (Wassiljewa) محاسبه گردید:

$$\lambda_g = \frac{\sum_{i=1}^r x_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^r x_j B_{ij}} \quad (5)$$

بعد از انجام محاسبات، ضریب هدایت حرارتی مخلوط گازهای لیزر  $\frac{W}{m.k}$  ۰/۰۷۶ به دست آمد.

از زحمات و کمک‌های آقایان دکتر اکبر حریری، مهندس محسن منتظرالقائم، مهندس محمد جابری و خانم هدیه پازوکیان سپاسگزاریم.

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^r x_i \mu_i}{\sum_{i=1}^r x_j B_{ij}} \quad (2)$$

در این رابطه  $B_{ij}$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$B_{ij} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{\sqrt{8} \left[ 1 + \left( \frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2} \quad (3)$$

در این رابطه  $M_i$  جرم مولکولی گونه  $i$  است. ضریب هدایت حرارتی برای هر گاز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda_i = \frac{\mu_i}{M_i} \left( C_p + \frac{5}{4} R \right) \quad (4)$$

55 (1988) 668.

10. R B Bird, *Transport Phenomena*, New York: Wiley (1960).
11. J M Smitt, H C Van Ness, *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company (1989).
12. W B Tiffany, R Targ and J D Foster, *Applied Physics Letters* **15**, 3 (1969) 91.
13. D Goldberg, *Genetic Algorithm*, Addison-wesley, (1989).
14. S Jelvani and A M Koushki, "Optimization of gas pressures ratio in fast-axial-flow CW CO2 laser using genetic algorithm", *Optical Engineering*, to be Published.
15. A M Koushki et al., *Annual Physics Conference of Iran*, Kashan University, 25-28 August (2008).
16. R E Beverly III, *Optical and Quantum Electronics*, **14** (1982) 24.

1. S Jelvani, S A Naeimi, G Dehghan, M Montazerolghaem, and D Esmailpour, *Optical Engineering*, **45**, 10 (2006) 104201.
2. S Jelvani, and H Saeedi, *Optics and Laser Technology*, **40** (2008) 459.
3. V R Adineh, C Aghanajafi, G H Dehghan, and S Jelvani, *Optics and Laser Technology*, **40** (2008) 1000.
4. Sharif Al-Hawat, Kheir Al-Mutaib, *Optics and Laser Technology*, **39** (2007) 610.
5. C Cheng, Y Ma, and S He, *Optics and Laser Technology*, **34** (2002) 231.
6. C Cheng, Y Ma, and S He, *Optics and Laser Technology*, **33** (2001) 601.
7. J Holland, *Practical Genetic Algorithm*, Michigan University Press (2003).
8. W J Witteman, *The CO2 Laser*. Springer Press (1987).
9. G I Kozlov and V A Kuznetsov, *Sov. J. Quant. Elect.*