

مجله علمی-ترویجی «علوم و فناوری های مدافعه غیرعالم»  
سال دوم، شماره ۱ (شماره پیاپی ۳)، بهار ۱۳۹۰: ص ۴۳-۵۰

## کاهش غلظت اکسیژن اتمی با تزریق ترکیب $He/NO_2$ در لیزرهای ید-اکسیژن الکتریکی

جبار صیدی<sup>۱\*</sup>، منصور عسکری<sup>۲</sup>، جواد خلیل زاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران-شرق، دانشکده علوم پایه

<sup>۲</sup>دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، مرکز تحقیقات فیزیک

### چکیده

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار فلونت عملکرد ترکیبی از گونه های ایجاد شده در ناحیه تخلیه الکتریکی یک لیزر اکسیژن-ید این الکتریکی با افزودن  $He/NO_2$  شبیه سازی شده است. واکنشهای ممکن در ناحیه پس از تخلیه مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر ترکیب  $He/NO_2$  بر حفظ مولکول اکسیژن یکتای ( $O_2(^1\Delta)$ ) حاصل از واکنش، از طریق حذف اکسیژن اتمی تا رسیدن به ناحیه محیط فعال لیزر مورد ارزیابی قرار گرفته است. غلظت و نرخ شارش بهینه ترکیب افزوده شده برای شرایط خاصی مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات، با تغییر سرعت تزریق  $He/NO_2$  برای حالتی که شارش  $He$  و  $NO_2$  به ترتیب ۰/۲۵ و ۲/۱ میلی مول بر ثانیه در نظر گرفته شده بود، مقدار بهینه حدود ۰/۷ m/s را به دست داد.

واژه های کلیدی: مولکول اکسیژن یکتا(برانگیخته)، اکسیژن اتمی، وارونی جمعیت، لیزر ید-اکسیژن تخلیه الکتریکی، کد فلونت

## Decrease of Atomic Oxygen Concentration by Injection of $He/NO_2$ Combination in Discharge Oxygen Iodine Lasers

J. Saydi<sup>1\*</sup>, M. Askari<sup>2</sup>, J. Khalilzadeh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Basic Sciences, Islamic Azad University

<sup>2</sup>Physics Research center, Imam Hossein University

### Abstract

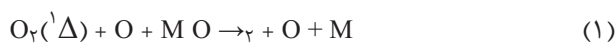
In this research, the effect of  $He/NO_2$  injection to the post-discharge region of a electric discharge oxygen iodine-laser was studied by using three-dimensional (3D) fluent code. Probable chemical reactions resulted from the presence of  $He/NO_2$  in post-discharge region were studied. Effect of  $He/NO_2$  combination on keeping the singlet oxygen molecule and depleting atomic oxygen along post-discharge region just before activation region of laser is evaluated. Optimum concentration and flow rate has investigated at special conditions. By changing the injection rate of  $He/NO_2$ , in the case of 0.25 mmol/s and 2.1 mmol/s rates for  $NO_2$  and  $He$ , optimum value of injection, about 0.7 m/s, has been obtained.

**Keywords:** Singlet Oxygen Molecules, Atomic Oxygen, Population Inversion, Electric Discharge Oxygen Iodine Laser, Fluent Code.

\* Corresponding author E-mail: J\_S1318@Yahoo.com

## ۱. مقدمه

فرکانس رادیویی (rf) روی مخلوط  $O_2/He$  با فشار پایین در حدود  $3/7$  تور در ناحیه تخلیه توان لیزر موج پیوسته (تا  $1/5$  وات) به دست آمده است [۷]. یک تفاوت کلیدی بین روش برانگیختگی شیمیایی متداول و الکتریکی حضور اکسیژن اتمی هم‌مرتب با مولکول اکسیژن برانگیخته در روش الکتریکی وجود دارد. اکسیژن اتمی، تراز بالای لیزری ( $^2P_{1/2}$ ) را از بین می‌برد، پس باید کنترل شود. این عمل با استفاده از تیتراسیون  $NO_2$  در پایین دست ناحیه تخلیه الکتریکی انجام می‌شود که منجر به حذف اکسیژن اتمی به مقداری می‌شود که هنوز مقدار کافی اکسیژن اتمی برای جداسازی مولکول ید به ید اتمی وجود داشته باشد. مقدار اکسیژن اتمی باید به اندازه کافی کم باشد. به طوری که اتلاف توان این نوع لیزر از طریق فرونشانی ید برانگیخته ( $I(^2P_{3/2}) + O \rightarrow I(^2P_{1/2}) + O$ ) به طور جدی زیان آور نباشد [۸]. افزایش توان لیزر با حفظ هر چه بیشتر بهره مولکول اکسیژن یکتا ( $O_2(^1\Delta)$ ) در طول محیط فعال، امکان پذیر می‌باشد. همچنان که اخیراً در نوعی از این لیزرها بهره ۱۵ تا ۲۰ درصدی به دست آمده است [۹]. این کار در مورد لیزری با تخلیه الکتریکی عرضی دارای فرکانس امواج رادیویی ۸۱ مگا هرتز، فشار اکسیژن ۲۰-۱۰ تور در ناحیه تخلیه، حذف اتم‌های اکسیژن در ناحیه پلاسما (محفظه تخلیه) و ناحیه پس از تخلیه الکتریکی با استفاده از ایجاد پوشش  $HgO$  در دیواره محفظه و خنک کردن کاواک تخلیه انجام شده است. نشان داده شده که افزایش کسر مولی اکسیژن اتمی، به حذف اکسیژن یکتا از طریق چندین فرآیند فرونشانی، منجر می‌شود. به عنوان مثال، یکی از این فرآیندهای فرونشانی به صورت زیر می‌باشد:



که در آن،  $M$  گونه سومی است که بسته به ترکیبات ناحیه تخلیه می‌تواند  $Ar$ ،  $He$ ، یا خود  $O_2$  باشد [۱۱ و ۱۰]. علاوه بر حذف مستقیم مولکول‌های اکسیژن یکتا ( $O_2(^1\Delta)$ ) به وسیله اتم‌های اکسیژن ( $O$ ) در پلاسما (ناحیه تخلیه الکتریکی) و ناحیه پس از تخلیه، مکانیزم‌های مؤثر دیگری در از دست دادن اکسیژن مولکولی برانگیخته ( $O_2(^1\Delta)$ ) وجود دارد که این مکانیزم‌ها با اکسیژن اتمی ( $O$ ) و اتم‌های ید گازی در ارتباط هستند. در تحقیقات قبلی نشان داده شده که حتی

لیزرهای ید-اکسیژن اعم از نوع الکتریکی و شیمیایی دارای طول موجی هستند که در مقایسه با طول موج لیزرهای گاز کربنیک از عمق نفوذ بیشتری در اتمسفر برخوردار هستند. لیزرهای شیمیایی با عملکرد در رژیم پیوسته، به عنوان لیزر قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند. بازه‌های طیفی مورد نظر در پدافند غیرعامل دارای نوارهای مهم در فرورسرخ نزدیک، و میانی است که شامل لیزرهای اصلی شیمیایی نیز می‌شود. از این رو، نقش و مقابله با لیزرهای مزبور در پدافند غیر عامل مهم است. از سوی دیگر، با توجه به این که وارونی جمعیت در اتم ید ( $P_{3/2} \rightarrow P_{1/2}$ ) لیزر شیمیایی ید-اکسیژن به وسیله انتقال انرژی تشدیدی عرضی نزدیک از مولکول شبه پایدار اکسیژن برانگیخته ( $O_2(^1\Delta)$ ) و گذار الکترونیکی (با طول موج ۱۳۱۵ نانومتر) ید در سیستم‌های لیزری ید-اکسیژن به وجود می‌آید، توسعه چشمه‌های تولید مولکول اکسیژن یکتا ( $O_2(^1\Delta)$ ) بر اساس سیستم‌های تخلیه الکتریکی، هزینه‌های عملیاتی، اندازه و وزن این نوع لیزرها را کاهش داده و ایمنی در عملیات را افزایش می‌دهد که از جمله پارامترهای مورد نظر در کاربردهای مطرح در پدافند غیرعامل می‌باشد. دلیل این امر این است که در لیزرهای اکسیژن-ید این الکتریکی (DOIL) بر خلاف لیزرهای ید-اکسیژن شیمیایی کلاسیک (COIL) با ترکیبات شیمیایی مایع، خورنده و سمی مثل  $Cl_2$  و  $F_2$  و... مواجه نیستیم. توسعه این نوع لیزرها (DOIL) از سال ۲۰۰۳ میلادی به بعد شروع شده است [۱]. افرادی مانند زالسکی (Zalesskii) و فورنیر (Fournier) تلاش‌های زیادی جهت دستیابی به تولید اکسیژن مولکولی یکتا و انتقال انرژی این مولکولی شبه پایدار به مولکول ید در لیزرهای ید-اکسیژن الکتریکی انجام دادند، اما نتوانستند به بهره مثبت در این سیستم دست یابند [۲ و ۳]. هر چند که پس از این افراد گروه‌های زیادی جهت به دست آوردن بهره مثبت در این نوع لیزر تلاش کردند، اما فقط توانستند حداکثر به بازه ۱۵ درصدی از مولکول اکسیژن با استفاده از تخلیه الکتریکی در دمای اتاق برسند [۴ و ۵]. سرانجام کارول (Carroll) و همکارانش به بهره مثبت دست یافتند و عملکرد لیزری مثبت در این نوع لیزر را گزارش کردند [۶].

در سیستم DOIL با اعمال عمل تخلیه الکتریکی به وسیله امواج

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (2)$$

که در آن،  $R_i$  نرخ متوسط تولید گونه  $i$  در واکنش شیمیایی و  $S_i$  نرخ تولید از فاز پاشیده بعلاوه چشمه تابع تعریف شده می‌باشد.  $Y_i$  کسر جرمی هرگونه،  $\vec{J}_i$  شار پخش شده گونه  $i$ ،  $\rho$  چگالی مخلوط و  $\vec{v}$  بردار سرعت فاز گازی است. پایستگی تکانه در چارچوب مرجع دستگاه لخت، از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

که  $p$  فشار استاتیکی،  $\bar{\tau}$  تانسور کشش،  $\rho \vec{g}$  و  $\vec{F}$  به ترتیب نیروی گرانش و نیروی حجمی خارجی می‌باشند. پایستگی انرژی بر اساس معادله زیر بیان شده است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left( \sum_j h_j \vec{J}_j \right) + S_R \quad (4)$$

که در آن،  $E$  انرژی کل،  $S_R$  شامل گرمای واکنش شیمیایی سایر چشمه‌های گرمایی حجمی،  $h_j$  آنتالپی گونه  $j$  و  $\vec{J}_j$  شار پخشی گونه  $j$  می‌باشد. چشمه متوسط تولید گونه‌های شیمیایی  $i$  در اثر واکنش‌ها به صورت جمع چشمه‌های تولیدی واکنش‌های آرنیوسی حاصل از تعداد  $N_R$  واکنش محاسبه می‌شود که مقدار تولید شده از این گونه‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_i = M_{\omega,i} \sum_{r=1}^{N_R} \bar{R}_{i,r} \quad (5)$$

که  $M_{\omega,i}$  وزن مولکولی گونه‌های  $i$  و  $\bar{R}_{i,r}$  نرخ مولی تولید یا مصرف گونه  $i$  در واکنش  $r$  می‌باشد. برای یک واکنش برگشت ناپذیر نرخ مولی تولید یا مصرف گونه  $i$  در واکنش  $r$  ( $\bar{R}_{j,r}$ ) به صورت رابطه زیر داده می‌شود:

کسر(درصد) مولی کوچکی از اتم‌های اکسیژن(یعنی اتم‌های اکسیژنی که به دلیل کافی نبودن غلظت NO<sub>x</sub> به طور کامل حذف نشده‌اند) به طور مؤثر اکسیژن مولکولی یکتا (O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ)) را حذف کردند که این امر به فرونشانی اتم‌های ید برانگیخته منجر می‌شود و تا رفع این مشکل، امکان حصول نتیجه از سیستم میسر نخواهد شد. عدم لیزر دادن به رفع کامل این مشکل، منجر می‌شود [۱].

از این رو، روش‌های کنترل و دفع اتم‌های اکسیژن پس از ناحیه تخلیه و شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با مخلوط شارش گازها و سینتیک‌های شیمیایی نقش کلیدی برای عملکرد لیزری در لیزرهای ید-اکسیژن الکتريکی دارند.

در این تحقیق، دینامیک مخلوط پس از تخلیه و واکنش‌های شیمیایی مرتبط با گونه‌های O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ)، O<sub>2</sub>، He، O، NO<sub>x</sub> به منظور حذف اکسیژن اتمی با استفاده از نرم‌افزار فلونت بررسی شده و نتایج مثبت آن بر کاهش غلظت اکسیژن اتمی در اثر تزریق ترکیب He/NO<sub>x</sub> به ناحیه پس از تخلیه مشاهده گردید.

## ۲. شبیه‌سازی سه بعدی فرآیندهای پس از ناحیه تخلیه و تحلیل

سینتیک‌های شیمیایی و فرآیندهای انتقال مخلوط‌های واکنش‌پذیر حاصل از گونه‌های شارشی O<sub>2</sub>/He/NO<sub>x</sub> پس از ناحیه تخلیه الکتريکی با استفاده از نرم‌افزار فلونت محاسبه شده است. این محاسبه در ناحیه مادون صوت در موقعیتی روی محور که دقیقاً از سرچشمه جریان از حلقه تزریق NO<sub>x</sub> شروع و تا فاصله تقریبی ۴۰ سانتی‌متر از این حلقه تزریق ادامه می‌یابد، انجام گرفت. شبیه‌سازی مربوط به قسمت پس از ناحیه تخلیه با امواج رادیو فرکانسی و قبل از تزریق ید-که شماتیک کلی آن در شکل (۱) نشان داده شده است-می‌باشد.

نرخ شارش اتم اکسیژن در مخلوط گونه‌های پس از ناحیه تخلیه یک پارامتر متغیر می‌باشد. دمای اولیه گاز حدود ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. در محاسبات شبیه‌سازی سه-بعدی با استفاده از کد فلونت، معادلات پایستگی جرم، تکانه، انرژی و غلظت گونه‌ها به علاوه شرایط مرزی و معادلات حرارتی سیستم به صورت عددی در مختصات دکارتی با یک شبکه‌بندی تقریباً ۱۲۵۰۰۰ سلولی(مش) حل شده است. معادله پیوستگی براساس رابطه کلی زیر داده شده است:

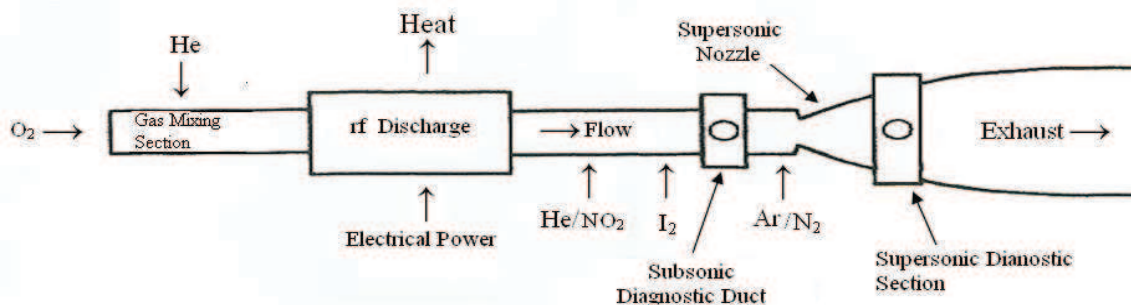
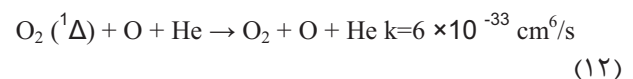
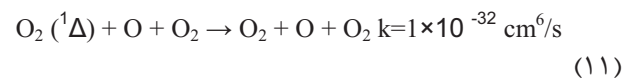
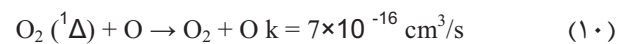
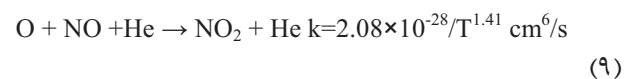
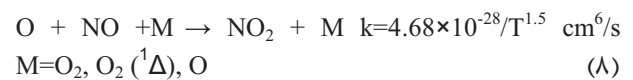
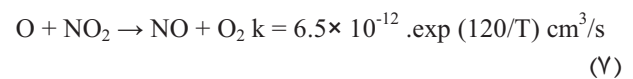
با توجه به واکنش‌ها، نقش  $\text{NO}_x$  در کاهش اتم اکسیژن کاملاً واضح است؛ طوری که سه واکنش نخست، عمل کاهش اکسیژن اتمی را به خوبی نشان می‌دهد. تزریق گاز  $\text{He}/\text{NO}_x$  از دو روزنه متقارن در راستای محور  $y$  محفظه (تیوب) پس از ناحیه تخلیه انجام می‌شود.

محل تزریق  $\text{He}/\text{NO}_x$  در کانتور توزیع کسر مولی اکسیژن اتمی در شکل (۲) نشان داده شده است. کسر مولی گونه‌های خروجی ناحیه تخلیه شامل  $0/6$  میلی‌مول بر ثانیه اکسیژن اتمی،  $0/6$  میلی‌مول بر ثانیه مولکول اکسیژن یکتا،  $2/1$  میلی‌مول بر ثانیه اکسیژن مولکولی،  $16$  میلی‌مول بر ثانیه گاز هلیوم می‌باشد. اما کسر مولی گونه‌های تزریق شده از طریق روزنه‌ها شامل  $0/25$  میلی‌مول بر ثانیه از دی‌اکسید نیتروژن و  $2/1$  میلی‌مول بر ثانیه هلیوم می‌باشد. شکل (۳) غلظت مولی اتم‌های اکسیژن در صفحه‌ای در راستای محور  $z$  را نشان می‌دهد.

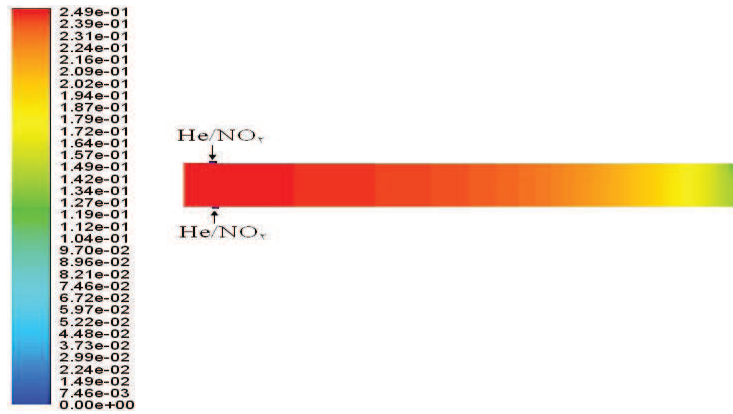
توزیع میدان‌های سرعت شارش با مقطع‌های سهموی برای کسر مولی اکسیژن یکتا در شکل (۴) نشان داده شده است. شکل (۵) و (۶) نمودارهای کسر مولی اکسیژن اتمی را در طول تیوب به ترتیب قبل و بعد از تزریق  $\text{NO}_x$  نشان می‌دهد. نمودار شکل (۷) درصد کاهش کسر مولی اکسیژن اتمی را بر حسب سرعت‌های مختلف تزریق  $\text{He}/\text{NO}_x$  بیان می‌کند.

$$\bar{R}_{i,r} = \Gamma(v_{i,r}'' - v_{i,r}') \left( k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{\eta_{j,r}'} \eta_{j,r}'' \right) \quad (6)$$

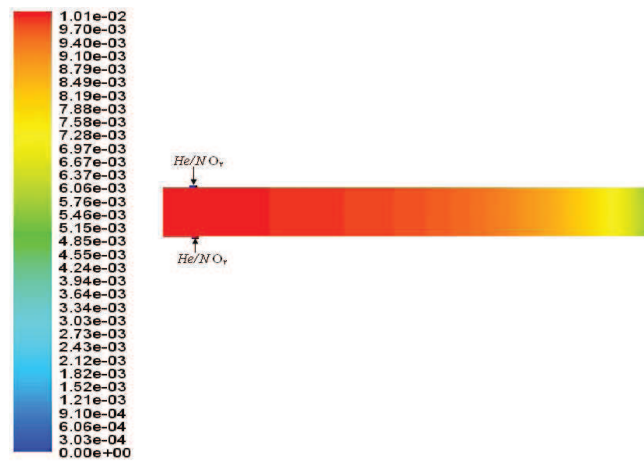
که  $C_{j,r}$  غلظت مولی گونه‌های  $r$  در واکنش  $i$  توان  $\eta_{j,r}'$  (نما) نرخ برای گونه‌های واکنش دهنده  $r$  در واکنش  $i$  توان  $\eta_{j,r}''$  (نما) نرخ برای گونه‌های محصول  $r$  در واکنش  $i$  و  $v_{i,r}'$  و  $v_{i,r}''$  ضریب استوکیومتری برای واکنش دهنده  $i$  در واکنش  $r$  و  $v_{i,r}'$  و  $v_{i,r}''$  ضریب استوکیومتری برای محصول  $i$  در واکنش  $r$  می‌باشند. مکانیزم واکنش‌های شیمیایی و سینتیک حاکم بر گونه‌ها در خروجی ناحیه تخلیه به صورت زیر می‌باشند [۱۲، ۱۱، ۱۰].



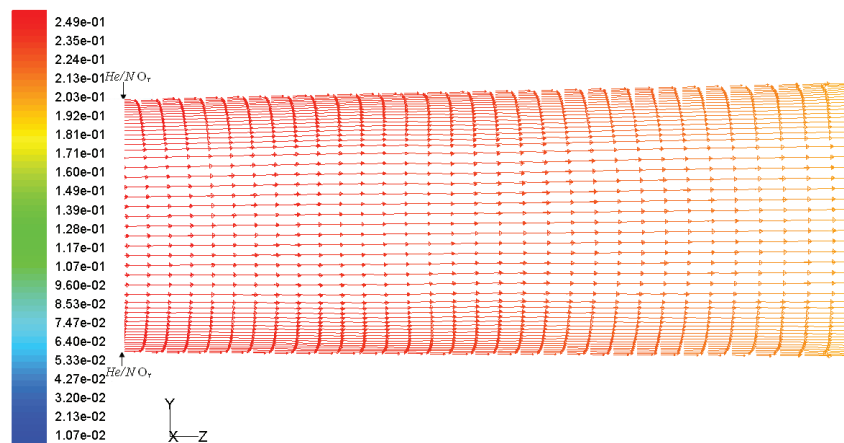
شکل ۱. شمای کلی از لیزر اکسیژن - یداین با تخلیه الکتریکی [۱]



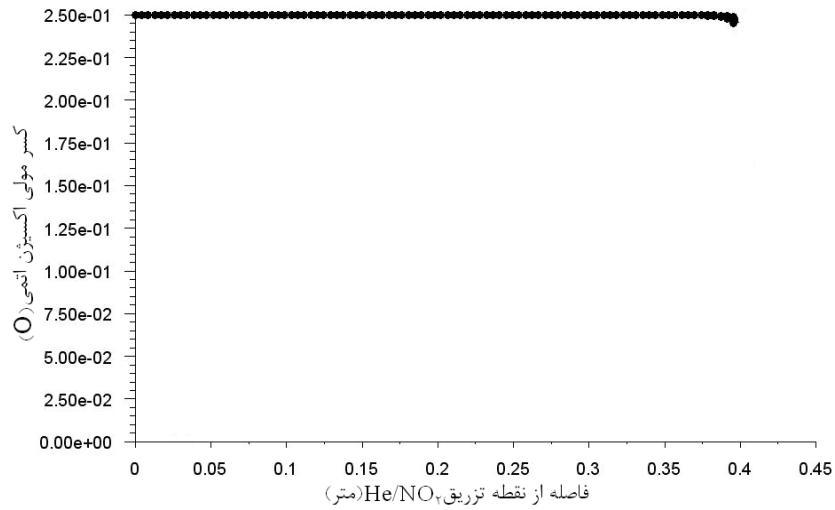
شکل ۲. کانتور توزیع کسر مولی اکسیژن اتمی در طول محفظه (تیوب) پس از تزریق  $\text{He}/\text{NO}_x$



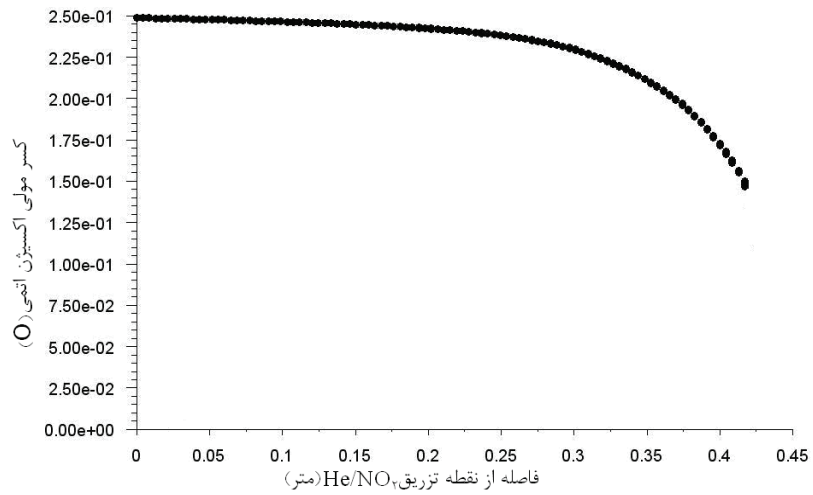
شکل ۳. غلظت مولی اتم‌های اکسیژن در طول محفظه پس از تزریق  $\text{He}/\text{NO}_x$  (بر حسب  $\text{kmol}/\text{m}^3$ )



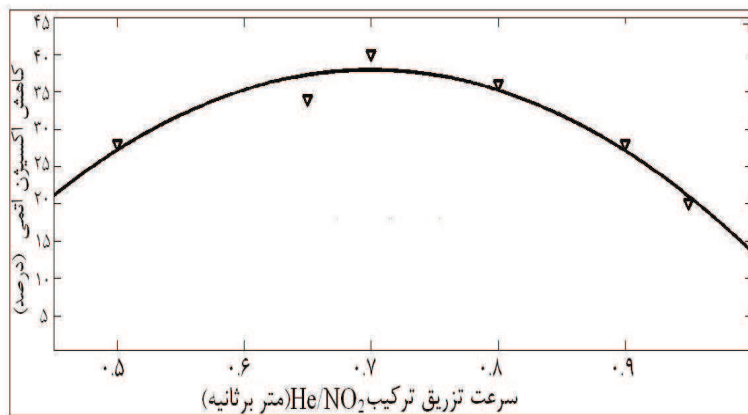
شکل ۴. توزیع میدان‌های سرعت شارش با مقطع‌های سهموی برای کسر مولی اکسیژن یکتا در طول محفظه پس از تزریق  $\text{He}/\text{NO}_x$



شکل ۵. نمودار کسر مولی اکسیژن اتمی در طول محفظه قبل از تزریق  $\text{He}/\text{NO}_2$



شکل ۶. نمودار کسر مولی اکسیژن اتمی در طول محفظه پس از تزریق  $\text{He}/\text{NO}_2$



شکل ۷. نمودار درصد کاهش کسر مولی اکسیژن اتمی در طول محفظه برحسب سرعت تزریق ترکیب  $\text{He}/\text{NO}_2$

#### ۴. نتایج و بحث

بهبود راندمان لیزر ید- اکسیژن الکتریکی دارد. شبیه‌سازی فرآیندهای پس از تخلیه الکتریکی، به‌وسیله امواج رادیو فرکانسی (تزریق He/NO<sub>2</sub>)، مخلوط شارش، انتقال جرم و گرما، سینتیک شیمیایی) نشان می‌دهد که تزریق NO<sub>2</sub>، با یک شیب تند به کاهش اتم‌های اکسیژن در قسمت پایین‌دست شارش ناحیه تزریق He/NO<sub>2</sub> منجر می‌شود.

#### ۵. نتیجه‌گیری

مولکول اکسیژن یکتا اصلی‌ترین گونه در لیزرهای ید- اکسیژن است. بنابراین، هرچه مقدار مولکول اکسیژن یکتا بیشتر باشد، عملکرد و بهره لیزر بیشتر می‌باشد. علاوه بر مولکول اکسیژن یکتا، گونه‌ای دیگر که از عمل تخلیه الکتریکی روی مولکول اکسیژن O<sub>2</sub> تولید می‌شود، اکسیژن اتمی (O) می‌باشد. اکسیژن اتمی با مولکول اکسیژن یکتا واکنش داده و این مولکول‌ها را حذف می‌کند و دستیابی به بهره مثبت را غیرممکن می‌سازد. افزایش ترکیب He/NO<sub>2</sub> به‌گونه‌های حاصل از ناحیه تخلیه این مشکل را از بین می‌برد که در این تحقیق، نقش مهم این ترکیب به‌عنوان عامل حذف‌کننده اکسیژن اتمی (O) و تقویت‌کننده مولکول‌های اکسیژن یکتا بیان شده است.

#### ۶. مراجع

- [1] Rakhimova, T. V.; Palov, A. P.; Mankelevich, Yu. a.; Popov, N. A.; Carroll, D. L. " XVI International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High Power Lasers."; Proceeding of SPIE, 2007, 6346, 22.
- [2] Zalesskii, V. Yu.; Eksp. Zh. Teor. Fiz. "A Discharge Laser Operating on the Iodine 1315-nm Transition."; Sov. Phys. JETP 1975, 40(1), 14.
- [3] Fournier, G.; Bonnet, J.; Pigache, D. J. "A Potential Atomic Iodine Laser Pumped by Electrically Generated Singlet Oxygen."; Physique 1981, 41(Colloque C9), 449.
- [4] Carroll, D. L.; Verdeyen, J. T.; King, D. M.; Woodard, B. S.; Skorski, L. W.; Zimmerman, J. W.; Solomon, W. C. "Recent Experimental Measurements of the Electric COIL System. Presented at 34th AIAA Plasma Dynamics and Laser Conference."; Orlando, FL, 2003; AIAA Paper 2003.
- [5] Ionin, A. A.; Kochetov, I. V.; Napartovich, A. P.; Yuryshv, N. N. "Physics and Engineering of Singlet Delta Oxygen Production in Low Temperature Plasma."; J. Phys. D: Appl. Phys. 2007, 40, R25.
- [6] Carroll, D. L.; Verdeyen, J. T.; King, D. M.; Zimmerman, J. W.; Laystrom, J. K.; Woodard, B. S.; Richardson, N.; Kittell, k.; Kushner, M. J.; Solomon, W. C. "Measurement of Positive Gain on the 1315 nm Transition of Atomic Iodine Pumped by O<sub>2</sub> (1Δ) Produced in an Electric Discharge."; Appl. Phys. Lett. 2004, 85(8), 1320-1332.

وجود کسر مولی خیلی کم از اکسیژن اتمی، در حذف مولکول‌های برانگیخته اکسیژن یکتا و جلوگیری از عملکرد لیزری در لیزرهای ید- اکسیژن الکتریکی نقش مهمی دارد. از این‌رو، کاهش غلظت آن به حداقل مقدار ممکن ضروری است. در نمودار شکل (۶) نقش اضافه کردن ترکیب He/NO<sub>2</sub> مشاهده می‌شود. هم‌چنان که از شکل پیداست، با فاصله گرفتن از نقطه تزریق، کسر مولی اکسیژن اتمی به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. هم‌چنین، این کاهش غلظت و کسر مولی اکسیژن اتمی در طول محفظه (تیوب)، در اثر اضافه کردن ترکیبات He/NO<sub>2</sub> در کانتورهای کسر مولی اکسیژن اتمی در شکل (۲) و غلظت اکسیژن اتمی در شکل (۳) به‌وضوح مشخص است. در شکل (۴) که توزیع میدان‌های سرعت شارش با مقطع‌های سهموی مطابق با کسر مولی مولکول اکسیژن یکتا را پس از تزریق He/NO<sub>2</sub> نشان می‌دهد، کاهش کسر مولی مولکول اکسیژن یکتا در طول محفظه (تیوب) خیلی کم است که هدف، دستیابی به این شرایط می‌باشد. نمودار شکل (۷) درصد کاهش کسر مولی اکسیژن اتمی را برحسب سرعت شارش ترکیب He/NO<sub>2</sub> بیان می‌کند. این نمودار نشانگر این امر می‌باشد که برای تزریق He/NO<sub>2</sub> سرعت بهینه‌ای وجود دارد، به‌گونه‌ای که با سرعت‌های کم‌تر یا بیشتر از آن، تغییرات کاهش کسر مولی اکسیژن اتمی کم می‌شود. بر طبق این نمودار، سرعت بهینه حدود ۷ m/s می‌باشد. می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که در سرعت‌های کم‌تر از این مقدار، بخشی از اکسیژن اتمی قبل از رسیدن ترکیب تزریقی، از محل تزریق عبور می‌نماید، و در سرعت‌های بیش از سرعت بهینه، گونه‌های تزریقی احتمال خروج از محفظه را از طریق روزنه مقابل به‌دست می‌آورند. بنابراین، این سرعت بیشترین کاهش را در غلظت اکسیژن اتمی ایجاد کرده است. نمودار شکل (۶) براساس این سرعت بهینه رسم شده و بیشترین کاهش در اکسیژن اتمی را نشان می‌دهد. نمودار شکل (۵) بیانگر کسر مولی اکسیژن اتمی در شرایطی که تزریق He/NO<sub>2</sub> انجام نشده می‌باشد. در این شرایط، دیده شده که تغییر کسر مولی اکسیژن اتمی خیلی کم بوده و به‌وضوح قابل مشاهده نیست. پس روش‌های دفع اتم‌های اکسیژن در خروجی ناحیه تخلیه و شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با شارش گاز مخلوط و سینتیک‌های شیمیایی مربوطه، نقش مهمی در

- [7] King, D. M.; Carroll, D. L.; Verdeyen, J. T.; Laystrom, J. K.; Benavides, G. F.; Palla, A. D.; Zimmerman, J. W.; Woodard, B. S.; Solomon, W. C. "Power Enhancement of the Hybrid Electric OIL System."; AIAA Paper, 2006, 3756.
- [8] Palla, A. D.; Zimmerman, J. W.; Woodard, D. L.; Carroll, D. L.; Verdeyen, J. T.; Lim, T. C.; Solomon, W. C.; 2007 American Chemical Society, Page EST: 8.7.
- [9] Rakhimova, T. V.; Kovalev, A. S.; Kolopovsky, K. S.; Lopaev, D. L.; Mankelevich, Yu. A.; Vasilieva, A. N.; Braginsky, O. V.; Popov, N. A.; Porshina, O. V.; Rakhimova, A. T. "Singlet Oxygen Generator at High Oxygen Pressure."; AIAA 37th Plasma Dynamics and Lasers Conf; San Francisco, Paper NO. 3762(2006).
- [10] Braginsky, O. V.; Vasilieva, A. N.; Klopovskiy, K. S.; Kovalev, A. S.; Lopaev, D. V.; Proshina, O. V.; Rakhimova, T. V.; Rakhimova, A. T. "Singlet Oxygen Generation in O2 Flow Excited by RF Discharge: I. Homogeneous Discharge Mode:  $\alpha$ -mode."; J. Phys. D: Appl. Phys. 2005, 38, 3609-3625.
- [11] Braginsky, O. V.; Vasilieva, A. N.; Kovalev, A. S.; Lopaev, D. V.; Mankelevich, Yu. A.; Rakhimova, T. V.; Rakhimova, A. T. "Singlet Oxygen Generation in O2 Flow Excited by RF Discharge: II. Inhomogeneous Discharge Mode: Plasma Jet."; J. Phys. D: Appl. Phys. 2005, 38, 3626-3634.
- [12] Carroll, D. L.; Verdeyen, J. T.; King, D. M. "Recent Work on the Develop of an Electric Discharge Oxygen Iodine laser."; <http://Cuaerospace.com>; CU Aerospace, 2004S.