

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

جبار صیدی^{1*}، منصور عسکری²، جواد خلیل زاده²

¹دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران - شرق، باشگاه پژوهشگران جوان

²دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، مرکز تحقیقات فیزیک

چکیده

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار فلونتت 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 ملکول 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 $0/25$ و $2/1$ میلی مول بر ثانیه در نظر گرفته شده بود، مقدار بهینه حدود $0/7$ m/s را به دست داد.

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

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

J. Saydi^{1*}, M. Askari², J. Khalilzadeh²

¹Young Research Club, Islamic Azad University of East Branch

²Physics Research center, Imam Hossein University

Abstract

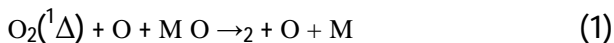
In this research, the effect of He/NO_2 injection to the post-discharge region of a electric discharge oxygen iodine-laser was studied by using three-dimensional (3D) fluent code. Probable chemical reactions resulted from the presence of He/NO_2 in post-discharge region were studied. Effect of He/NO_2 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

1. 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 [7]. 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 ($I(^2P_{1/2}) + O \rightarrow I(^2P_{3/2}) + O$) به طور جدی زیان آور نباشد [8]. افزایش توان لیزر با حفظ هر چه بیشتر بهره مولکول اکسیژن یکتا ($O_2(^1\Delta)$) در طول محیط فعال، امکان‌پذیر می‌باشد. همچنان که اخیراً در نوعی از این لیزرها بهره 15 تا 20 درصدی به دست آمده است [9]. این کار در مورد لیزری با تخلیه الکتریکی عرضی دارای فرکانس امواج رادیویی 81 مگا هرتز، فشار اکسیژن 20-10 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 و یا خود O_2 باشد [11 و 10]. 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 ($I(^2P_{3/2}) \rightarrow I(^2P_{1/2})$) 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 1315 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 الکتریکی¹ (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 2003 میلادی به بعد شروع شده است [1]. افرادی مانند زالسکی (Zalsskii) 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 [2 و 3]. 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 15 درصدی از مولکول اکسیژن با استفاده از تخلیه الکتریکی در دمای اتاق برسند [4 و 5]. سرانجام کارول (Carroll) و همکارانش به بهره مثبت دست یافتند و عملکرد لیزری مثبت در این نوع لیزر را گزارش کردند [6].

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 ، ρ چگالی مخلوط و \vec{v} بردار سرعت فاز گازی است. پایستگی تکانه در چارچوب مرجع دستگاه لخت، از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

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

که p فشار استاتیکی، $\vec{\tau}$ 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:

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

که در آن، E انرژی کل، S_h 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:

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

که $M_{\omega,i}$ وزن مولکولی گونه‌های i و $\hat{R}_{i,r}$ 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 ($\hat{R}_{i,r}$) به صورت رابطه زیر داده می‌شود:

کسر(درصد) مولی کوچکی از اتم‌های اکسیژن(یعنی اتم‌های اکسیژنی که به دلیل کافی نبودن غلظت NO₂ به طور کامل حذف نشده‌اند) به طور مؤثر اکسیژن مولکولی یکتا (O₂(¹Δ)) 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 لیز دادن به رفع کامل این مشکل، منجر می‌شود [1].

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 O₂(¹Δ)، O₂، He، O، NO₂ به منظور حذف اکسیژن اتمی با استفاده از نرم‌افزار فلوننت بررسی شده و نتایج مثبت آن بر کاهش غلظت اکسیژن اتمی در اثر تزریق ترکیب He/NO₂ به ناحیه پس از تخلیه مشاهده گردید.

2. شبیه‌سازی سه بعدی فرآیندهای پس از ناحیه تخلیه و تحلیل

سینتیک‌های شیمیایی و فرآیندهای انتقال مخلوط‌های واکنش‌پذیر حاصل از گونه‌های شارشی O₂/He/NO₂ پس از ناحیه تخلیه الکتريکی با استفاده از نرم‌افزار فلوننت محاسبه شده است. این محاسبه در ناحیه مادون صوت در موقعیتی روی محور که دقیقاً از سرچشمه جریان از حلقه تزریق NO₂ شروع و تا فاصله تقریبی 40 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 (1) نشان داده شده است-می‌باشد.

نرخ شارش اتم اکسیژن در مخلوط گونه‌های پس از ناحیه تخلیه یک پارامتر متغیر می‌باشد. دمای اولیه گاز حدود 300 کلوین در نظر گرفته شده است. در محاسبات شبیه‌سازی سه-بعدی با استفاده از کد فلوننت، 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 125000 سلولی (مش) حل شده است. معادله پیوستگی براساس رابطه کلی زیر داده شده است:

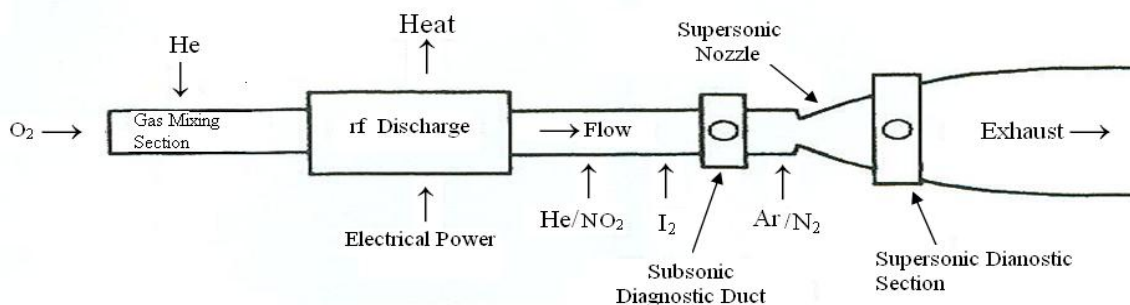
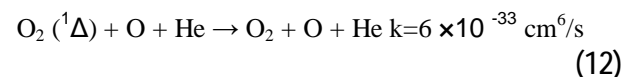
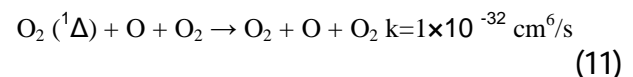
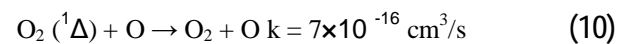
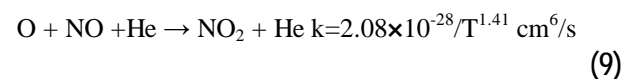
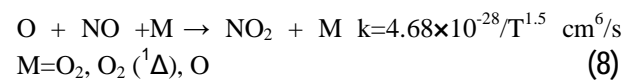
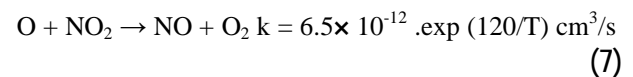
با توجه به واکنش‌ها، نقش NO_2 در کاهش اتم اکسیژن کاملاً واضح است؛ طوری که سه واکنش نخست، عمل کاهش اکسیژن اتمی را به خوبی نشان می‌دهد. تزریق گاز He/NO_2 از دو روزنه متقارن در راستای محور y محفظه (تیوب) پس از ناحیه تخلیه انجام می‌شود.

محل تزریق He/NO_2 در کانتور توزیع کسر مولی اکسیژن اتمی در شکل (2) 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 (3) غلظت مولی اتم‌های اکسیژن در صفحه‌ای در راستای محور z را نشان می‌دهد.

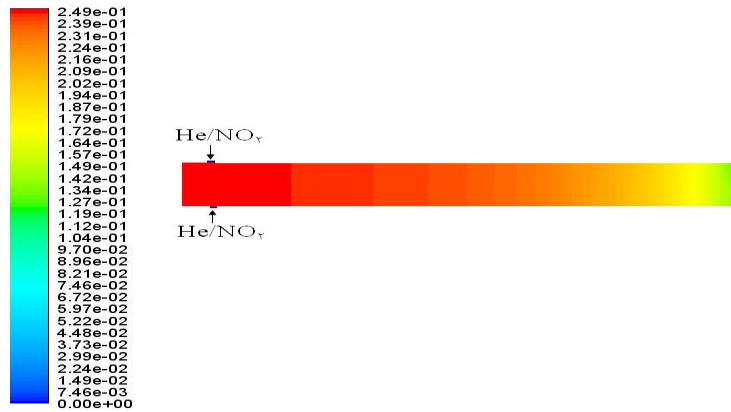
توزیع میدان‌های سرعت شارش با مقطع‌های سهموی برای کسر مولی اکسیژن یکتا در شکل (4) نشان داده شده است. شکل (5) و (6) نمودارهای کسر مولی اکسیژن اتمی را در طول تیوب به ترتیب قبل و بعد از تزریق NO_2 نشان می‌دهد. نمودار شکل (7) درصد کاهش کسر مولی اکسیژن اتمی را بر حسب سرعت‌های مختلف تزریق He/NO_2 بیان می‌کند.

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

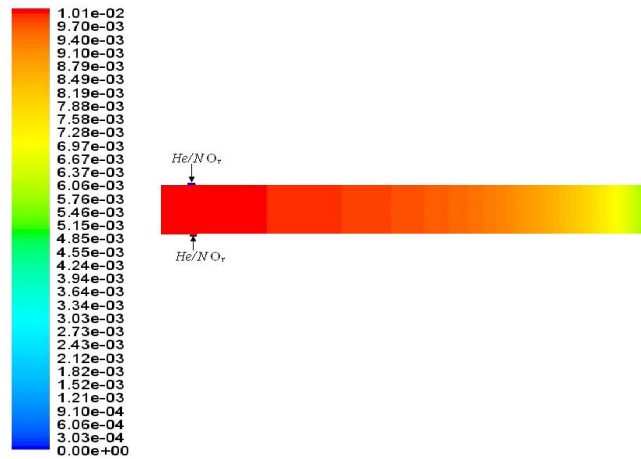
که $C_{j,r}$ غلظت مولی گونه‌های زد در واکنش i ، $\eta'_{j,r}$ توان (نما) نرخ برای گونه‌های واکنش دهنده زد در واکنش i ، $\eta''_{j,r}$ توان نرخ برای گونه‌های محصول زد در واکنش i ، $v_{i,r}'$ ضریب استوکیومتری برای واکنش دهنده i در واکنش r و $v_{i,r}^*$ ضریب استوکیومتری برای محصول i در واکنش r می‌باشند. مکانیزم واکنش‌های شیمیایی و سینتیک حاکم بر گونه‌ها در خروجی ناحیه تخلیه به صورت زیر می‌باشند [12,11,10].



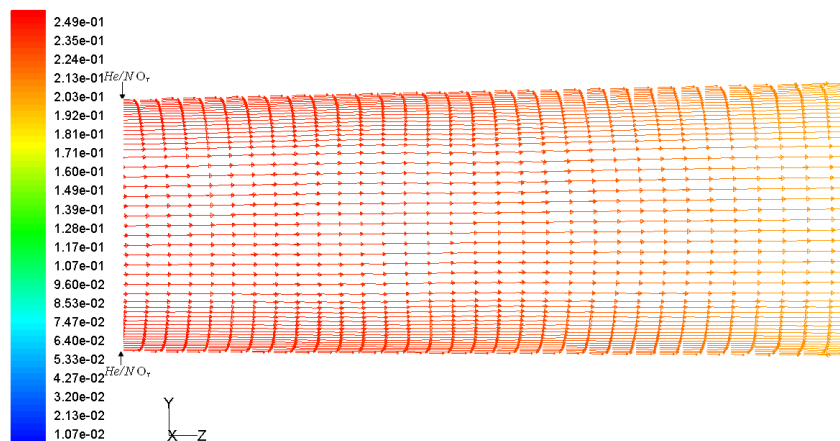
شکل 1. شمای کلی از لیزر اکسیژن - یداین با تخلیه الکتریکی [1]



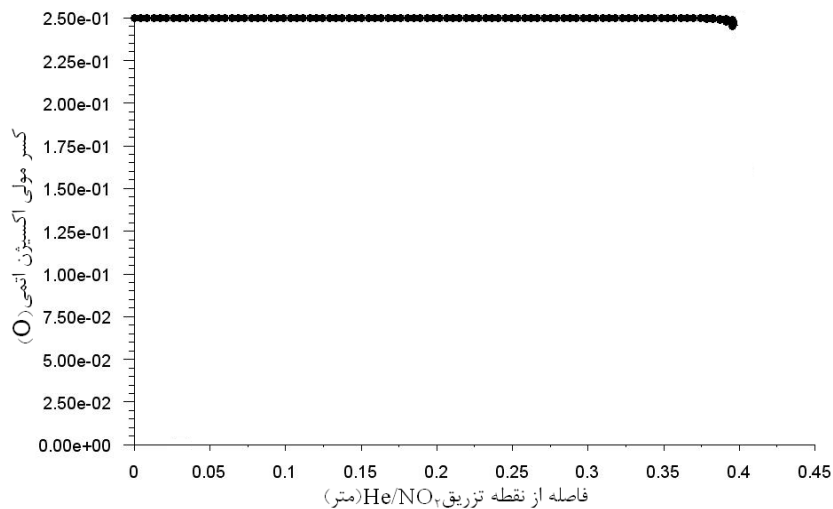
شکل 2. کانتور توزیع کسر مولی اکسیژن اتمی در طول محفظه (تیوب) پس از تزریق He/NO_2



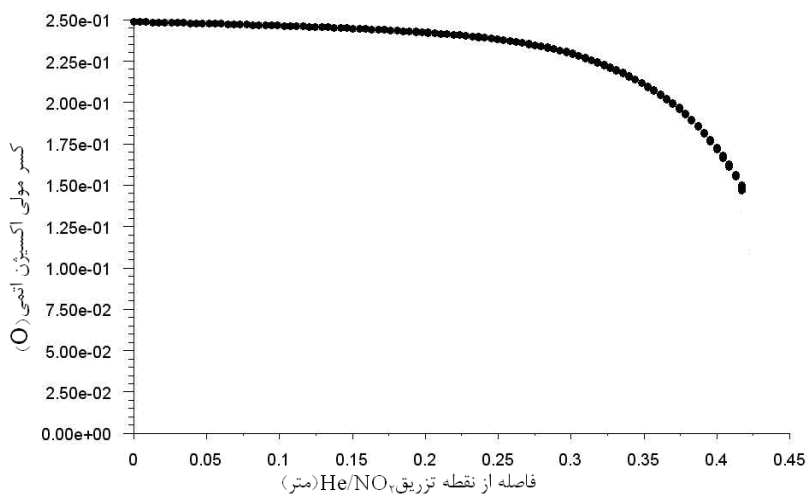
شکل 3. غلظت مولی اتم‌های اکسیژن در طول محفظه پس از تزریق He/NO_2 (بر حسب kmol/m^3)



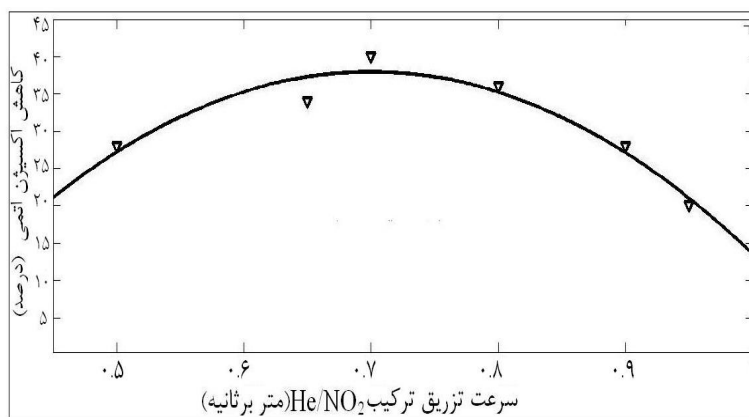
شکل 4. توزیع میدان‌های سرعت شارش با مقطع‌های سهموی برای کسر مولی اکسیژن یکتا در طول محفظه پس از تزریق He/NO_2



شکل 5. نمودار کسر مولی اکسیژن اتمی در طول محفظه قبل از تزریق He/NO_2



شکل 6. نمودار کسر مولی اکسیژن اتمی در طول محفظه پس از تزریق He/NO_2



شکل 7. نمودار درصد کاهش کسر مولی اکسیژن اتمی در طول محفظه برحسب سرعت تزریق ترکیب He/NO_2

4. نتایج و بحث

وجود کسر مولی خیلی کم از اکسیژن اتمی، در حذف مولکول های برانگیخته اکسیژن یکتا و جلوگیری از عملکرد لیزری در لیزرهای ید- اکسیژن الکتريکی نقش مهمی دارد. از این رو، کاهش غلظت آن به حداقل مقدار ممکن ضروری است. در نمودار شکل (6) نقش اضافه کردن ترکیب He/NO₂ مشاهده می شود. هم چنان که از شکل پیداست، با فاصله گرفتن از نقطه تزریق، کسر مولی اکسیژن اتمی به طور محسوسی کاهش می یابد. هم چنین، این کاهش غلظت و کسر مولی اکسیژن اتمی در طول محفظه (تیوب)، در اثر اضافه کردن ترکیبات He/NO₂ در کانتورهای کسر مولی اکسیژن اتمی در شکل (2) و غلظت اکسیژن اتمی در شکل (3) به وضوح مشخص است. در شکل (4) که توزیع میدان های سرعت شارش با مقطع های سهموی مطابق با کسر مولی مولکول اکسیژن یکتا را پس از تزریق He/NO₂ نشان می دهد، کاهش کسر مولی مولکول اکسیژن یکتا در طول محفظه (تیوب) خیلی کم است که هدف، دستیابی به این شرایط می باشد. نمودار شکل (7) درصد کاهش کسر مولی اکسیژن اتمی را بر حسب سرعت شارش ترکیب He/NO₂ بیان می کند. این نمودار نشانگر این امر می باشد که برای تزریق He/NO₂ سرعت بهینه ای وجود دارد، به گونه ای که با سرعت های کم تر یا بیشتر از آن، تغییرات کاهش کسر مولی اکسیژن اتمی کم می شود. بر طبق این نمودار، سرعت بهینه حدود 0/7 m/s می باشد. می توان این گونه تحلیل کرد که در سرعت های کم تر از این مقدار، بخشی از اکسیژن اتمی قبل از رسیدن ترکیب تزریقی، از محل تزریق عبور می نماید، و در سرعت های بیش از سرعت بهینه، گونه های تزریقی احتمال خروج از محفظه را از طریق روزنه مقابل به دست می آورند. بنابراین، این سرعت بیشترین کاهش را در غلظت اکسیژن اتمی ایجاد کرده است. نمودار شکل (6) براساس این سرعت بهینه رسم شده و بیشترین کاهش در اکسیژن اتمی را نشان می دهد. نمودار شکل (5) بیانگر کسر مولی اکسیژن اتمی در شرایطی که تزریق He/NO₂ انجام نشده می باشد. در این شرایط، دیده شده که تغییر کسر مولی اکسیژن اتمی خیلی کم بوده و به وضوح قابل مشاهده نیست. پس روش های دفع اتم های اکسیژن در خروجی ناحیه تخلیه و شبیه سازی فرآیندهای مرتبط با شارش گاز مخلوط و سینتیک های شیمیایی مربوطه، نقش مهمی در

بهبود راندمان لیزر ید- اکسیژن الکتريکی دارد. شبیه سازی فرآیندهای پس از تخلیه الکتريکی، به وسیله امواج رادیو فرکانسی (تزریق He/NO₂، مخلوط شارش، انتقال جرم و گرما، سینتیک شیمیایی) نشان می دهد که تزریق NO₂، با یک شیب تند به کاهش اتم های اکسیژن در قسمت پایین دست شارش ناحیه تزریق He/NO₂ منجر می شود.

5. نتیجه گیری

مولکول اکسیژن یکتا اصلی ترین گونه در لیزرهای ید- اکسیژن است. بنابراین، هرچه مقدار مولکول اکسیژن یکتا بیشتر باشد، عملکرد و بهره لیزر بیشتر می باشد. علاوه بر مولکول اکسیژن یکتا، گونه ای دیگر که از عمل تخلیه الکتريکی روی مولکول اکسیژن O₂ تولید می شود، اکسیژن اتمی (O) می باشد. اکسیژن اتمی با مولکول اکسیژن یکتا واکنش داده و این مولکول ها را حذف می کند و دستیابی به بهره مثبت را غیرممکن می سازد. افزایش ترکیب He/NO₂ به گونه های حاصل از ناحیه تخلیه این مشکل را از بین می برد که در این تحقیق، نقش مهم این ترکیب به عنوان عامل حذف کننده اکسیژن اتمی (O) و تقویت کننده مولکول های اکسیژن یکتا بیان شده است.

6. 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.; Yuryshev, 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 O₂ (1Δ) Produced in an Electric Discharge."; Appl. Phys. Lett. 2004, 85(8), 1320-1332.

- [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: α -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.