

## تخریب آلاینده‌های هوا شامل بنزن، متان و کربن دی‌اکسید با استفاده از پلاسمای گلایدینگ آرک

رضوان حسینی‌راد<sup>1</sup>، حامد مهدی‌کیا<sup>1</sup>، محمدرضا خانی<sup>2</sup>، بابک شکری<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> کارشناسی ارشد مهندسی پلاسما، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

<sup>2</sup> دکترای فوتونیک، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

<sup>3</sup> عضو هیئت علمی دانشکده فیزیک و پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: 1398/03/10 پذیرش: 1398/09/24

### چکیده

افزایش گرمای جهانی به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای (مانند متان و کربن دی‌اکسید) و حضور ترکیبات آلی فرار (مانند بنزن) در گاز خروجی اکثر کارخانه‌ها، عامل اصلی انجام این تحقیق با هدف تخریب این آلاینده‌ها با استفاده از تکنولوژی پلاسما شد. در این تحقیق از یک راکتور پلاسمای گلایدینگ آرک برای بررسی کارایی آن در تخریب گازهای آلاینده شامل بنزن، متان و کربن دی‌اکسید استفاده شده است. اثر پارامترهای مهم در این تحقیق شامل توان، فلوی گاز ورودی به راکتور و نوع گاز کمکی بر درصد بازده تخریب گازهای آلاینده بررسی شده است. در تخریب گاز بنزن، هوا و برای تخریب متان و کربن دی‌اکسید، آرگون و نیتروژن به عنوان گاز کمکی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد تخریب بنزن با استفاده از پلاسمای هوا به بالای 70% رسیده که در مقایسه با سایر روش‌ها قابل توجه است. در تخریب متان و کربن دی‌اکسید عمده محصول تولید شده سین گاز (H<sub>2</sub>+CO)، گاز O<sub>2</sub> و درصد اندکی از گاز CO است.

**کلمات کلیدی:** ترکیبات آلی فرار، گاز گلخانه‌ای، پلاسمای گلایدینگ آرک، تخریب آلاینده‌های گازی

## مقدمه

بنزن یکی از عمده‌ترین مواد آلی فرار به شمار می‌آید که در صنعت به ویژه در صنایع پتروشیمی، کاغذسازی، رنگ‌سازی، چرم‌سازی و محصولات چوبی کاربرد وسیعی دارد. امروزه این ماده به دلیل مصرف بالا در صنعت جزء آلاینده‌های خطرناک محسوب می‌شود. در اطراف پمپ بنزین‌ها بیش‌ترین میزان غلظت این گاز در هوا موجود است. بسته به غلظت بنزن موجود در هوا، می‌تواند اثرات مخربی روی سلامت بدن داشته باشد. عوارض تماس مزمن با بنزن، شامل کاهش خون‌سازی بدن، ناتوانی در سیستم ایمنی بدن و همچنین سرطان خون، لوسمی، اختلال در سیستم تنفسی، تأخیر در استخوان‌بندی جنین انسان، صدمه به سیستم تولید مثل انسان، ناباروری، تولید تومورهای غدد لنفاوی و صدمه به کبد است. تخریب و تبدیل بنزن به عنوان یک ماده آروماتیک و سمی به جهت تولید هیدروکربن‌های سبک‌تر قابل توجه است [1-3].

اما آلاینده‌های دیگری که سهم قابل توجهی در میزان آلودگی هوا دارند و دلیل اصلی افزایش دمای جهانی محسوب می‌شوند گازهای گلخانه‌ای هستند. اثر گلخانه‌ای به تأثیر مستقیم گازهای گلخانه‌ای در جو یک سیاره بر روی سطح آن گفته می‌شود. در این فرآیند پرتوهای موجود در جو آن سیاره سطح آن را به اندازه‌ای گرم می‌کند که گویا اتمسفر در آن موجود نیست و از این رو موجب دگرگونی آب و هوا می‌شود. بین افزایش میزان گازهای گلخانه‌ای موجود در جو با گرم شدن کره زمین ارتباط مستقیمی وجود دارد گازهای گلخانه‌ای عبارت‌اند از ترکیبات گازی که در «اثر گلخانه‌ای» نقش دارند. عمده‌ترین گازهای طبیعی از این دسته عبارت‌اند از: بخار آب، دی‌اکسید کربن، ازن و دیگر گازها که اهمیت کم‌تری دارند عبارت‌اند از: متان، اکسید نیتروژن، سولفید هگزا فلوراید، هالو کربن‌ها مثل فرئون و دیگر CFC ها. این گازها به اتمسفر زمین رفته و به شکل ابر درمی‌آید. ابرها می‌توانند مانند یک روکش عایق عمل کرده و گرمای زمین را نگه دارند و یا می‌توانند آن را منعکس و پراکنده کنند [4-6].

روش‌های مختلفی برای از بین بردن گازهای آلی فرار و گازهای گلخانه‌ای وجود دارد. رایج‌ترین آن‌ها، حرارتی شیمیایی، بیوشیمیایی، پرتوشیمیایی و کاتالیستی است. اما این روش‌ها معایب مهمی مانند هزینه بالا برای اجرا دارند یا مثلاً در روش‌های کاتالیستی غیر فعال شدن کاتالیست‌ها در دمای بالا است. کاتالیست‌ها از رایج‌ترین روش‌ها هستند اما متأسفانه زمانی که در راکتورهای حرارتی قرار می‌گیرند تا در دمای بالا فعال شوند و در واکنش شرکت کنند دچار سوختگی یا غیر فعال شدن سریع می‌شوند. با توجه به این عیب مهم در روش‌های رایج و قدیمی امروزه استفاده از راکتورهای پلاسمایی یکی از مناسب‌ترین و کم‌هزینه‌ترین راه‌های ممکن جهت تخریب گازهای آلاینده است که توجه بسیاری از محققان در این زمینه را در سراسر دنیا به خود جلب کرده است. راکتورهای پلاسمای مورد استفاده برای تخریب این گازها راکتور پلاسمای گلایدینگ آرک است (خصوصیات کامل این راکتور به همراه نمای از آن در قسمت چیدمان آزمایش آورده شده است). ویژگی مهم راکتورهای پلاسمایی این است که در آن‌ها واکنش‌های شیمیایی در دماهای پایین نزدیک به دمای اتاق انجام می‌شود. در واقع در راکتورهای پلاسمایی دمای گاز بین 20 تا 100 درجه سانتی‌گراد است (که در مقایسه با روش‌های سنتی و قدیمی که در آن‌ها دمای گاز در راکتور بالای 2000 درجه سانتی‌گراد است بسیار پایین است). این در حالی است که در ناحیه پلاسمای تعداد بسیار زیادی از الکترون‌های آزاد با انرژی‌های بسیار بالا تولید می‌شوند که در واقع عامل اصلی انجام واکنش‌های شیمیایی مانند تخریب گازهای آلاینده هستند. پلاسمای گلایدینگ آرک شامل هر دو رژیم تعادلی و غیر تعادلی است. رژیم تعادلی یا حرارتی به

منطقه‌ای از پلاسما گفته می‌شود که دمای الکترون‌ها با دمای گاز در این منطقه برابر است و در ناحیه غیر تعادلی دمای الکترون‌ها با دمای گاز متفاوت است و در حالی که گاز دمای پایینی دارد، الکترون‌ها دمای بالایی دارند. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی استفاده از راکتور گلایدینگ آرک برای تخریب و تولید گاز هیدروژن انجام شده است [7].

مهم‌ترین برتری استفاده از تکنولوژی پلاسما برای تخریب گازهای آلاینده کاهش دمایی مورد نیاز برای انجام واکنش‌های شیمیایی منجر به تخریب آلاینده‌هاست و همچنین اهمیت افزایش طول عمر و فعالیت کاتالیست‌ها زمانی که در راکتورهای پلاسمایی قرار می‌گیرند. راکتورهای پلاسمایی در مقایسه با راکتورهای حرارتی قدیمی برای افزایش به‌گزینی محصولات تولید شده مناسب‌تر هستند زیرا دمای پایین راکتور محصولات تولید شده را تخریب نمی‌کند. اگرچه استفاده از این تکنولوژی در دنیا یک مسیر جدید محسوب می‌شود و در واقع تمام نتایج به دست آمده در فاز آزمایشگاهی است. نصب و اجرای انواع راکتورهای پلاسمایی در صنعت همچنان مهم‌ترین چالش در دنیا برای استفاده از آن‌ها جهت تخریب آلاینده‌های گازی در صنعت محسوب می‌شود. آنچه ما در این پژوهش انجام داده‌ایم بررسی بهینه شرایط مربوط به پارامترهای مؤثر بر درصد تخریب بنزن، متان و کربن دی‌اکسید است.

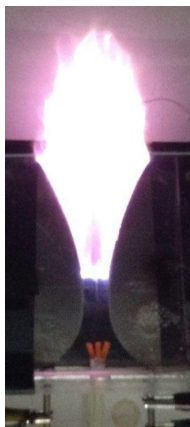
### چیدمان تجربی

چیدمان مربوط به این تحقیق شامل دو بخش مجزاست. در بخش اول چیدمان مربوط به تخریب بنزن و بخش دوم مربوط به تخریب متان و کربن دی‌اکسید است. شمای کلی از سیستم آزمایشگاهی جهت تخریب گاز بنزن به طور شماتیک در شکل 1 الف نشان داده شده است. همچنین نمایی از راکتور گلایدینگ آرک مورد استفاده در این تحقیق برای حذف آلاینده‌های هوا در شکل 1 ب نشان داده شده است. راکتور گلایدینگ آرک شامل دو الکتروود فلزی چاقویی شکل از جنس استیل ضد زنگ است که به یک منبع تغذیه الکتریکی وصل می‌شود. سپس گاز خوراک از بین این دو الکتروود رد می‌شود و به دلیل اعمال یک اختلاف پتانسیل بالا بین دو الکتروود پلاسما تشکیل شده و گاز خوراک که شامل بنزن، متان یا کربن دی‌اکسید است با عبور از این ناحیه تخریب می‌شود. سیستم آزمایشی در این مرحله شامل سه بخش است. بخش اول مربوط به تولید و آماده‌سازی گاز آلاینده زمینه با غلظت معین از بنزن به منظور ورود به مرحله بعد است. بخش دوم مربوط به محفظه تولید پلاسما برای تخریب گاز آلاینده و بخش سوم مربوط به سیستم‌های آنالیز است که گاز خروجی پس از تخریب با پلاسما را آنالیز می‌کند. در بخش اول، هوا پس از تولید توسط پمپ هوا از یک شیر سوزنی گذشته و با عبور از فلومتر کنترل کننده جرمی آن را در یک فلوی معین نگه می‌دارد. در گام نخست دمای حمام آب گرم را در  $70^{\circ}\text{C}$  قرار داده و این دما را با استفاده از دماسنجی که درون آن قرار گرفته کنترل می‌کنیم. سپس حباب شامل بنزن را درون آن در یک زمان معین نگه داشته تا هوا با بخار بنزن ترکیب شود و وارد ناحیه پلاسما شود. دقت دماسنج مورد استفاده تا  $0/1^{\circ}\text{C}$  است. پس از اطمینان از این دما، منبع تغذیه را روشن کرده و با افزایش ولتاژ به حد ولتاژ شکست، پلاسما را روشن می‌کنیم. ولتاژ شکست ولتاژی است که در آن پلاسما تشکیل می‌شود. با چک کردن خروجی محفظه جهت اطمینان از عدم تجمع گاز در محفظه و خطر انفجار در سیستم، میزان 3 ml بنزن را داخل حباب می‌ریزیم و آن را در حمام آب گرم قرار می‌دهیم. پس از قرار دادن حباب در حمام آب گرم زمان را اندازه‌گیری می‌کنیم، در هر نوبت انجام آزمایش، پس از گذشت 10 ثانیه از پردازش گاز،

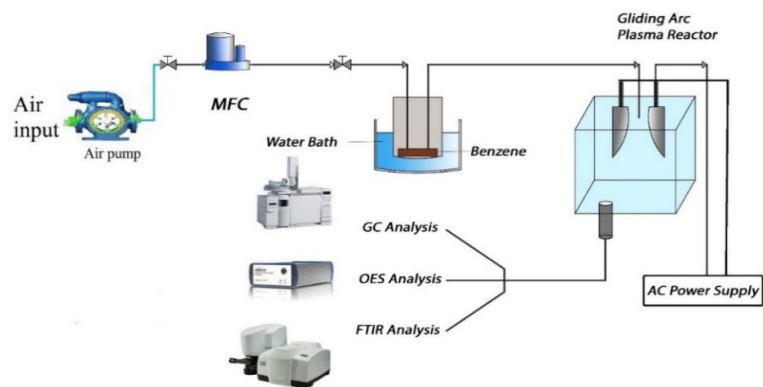
گاز را در بالن جمع‌آوری نمونه جمع می‌کنیم، جمع‌آوری نمونه گازی را به انتهای خروجی محفظه وصل کرده و در زمان 1 دقیقه و نیم گاز پردازش شده را جمع‌آوری می‌کنیم. غلظت گاز بنزن که با هوا ترکیب شده با استفاده از رابطه آنتوان  $42190 \text{ ppm}$  تا  $69700 \text{ ppm}$  محاسبه شده است. فلوی هوا  $2 \text{ Slm}$  تا  $4 \text{ Slm}$  است. پس از ورود گاز در فضای بین دو الکتروود پلاسما تشکیل می‌شود. با تشکیل پلاسما رنگ شعله سبز شده که نشان‌گر حضور بنزن در ناحیه پلاسمایی است.

در بخش دوم که شامل محفظه تشکیل پلاسماست پس از ورود گاز به این ناحیه و اعمال ولتاژ به دو سر الکتروودها پلاسما تشکیل می‌شود. در نهایت گاز پردازش شده توسط پلاسما پس از خروج از محفظه پلاسمایی مورد آنالیز قرار گرفته است.

چیدمان دوم مربوط به تخریب گازهای متان و کربن دی‌اکسید است. نمایی از چیدمان آزمایش مربوطه به تخریب متان و کربن دی‌اکسید در شکل 2 نشان داده شده است. همان طور که مشخص است. این سیستم شامل کپسول‌های  $\text{CH}_4$ ،  $\text{CO}_2$ ، آرگون و نیتروژن است. برای بررسی تخریب گازهای آلاینده از گازهای کمکی آرگون، نیتروژن استفاده شده است. علاوه بر آن برای بررسی اثر هم‌زمان متان و کربن دی‌اکسید میزان تخریب این آلاینده‌ها به صورت هم‌زمان باهم مورد بررسی قرار گرفته است. فلوی گازها به وسیله‌ی کنترل کننده جرمی گاز، کنترل می‌شود. فلوی گاز مورد بررسی روی یک مقدار ثابت تنظیم می‌شود و برای بررسی اثر گازهای کمکی فلوی این گازها تغییر می‌کند و مولکول‌های گاز متان به کمک ذرات فعال و رادیکال‌های آزاد موجود در ناحیه پلاسما شکسته می‌شود. منبع تغذیه مورد استفاده در این سری از آزمایش‌ها منبع تغذیه  $20 \text{ kHz}$  و  $20 \text{ kV}$  است. پس از تخریب گاز آلاینده به واسطه ناحیه پلاسمایی محصول خروجی توسط آنالیزهای FT-IR و GC مورد بررسی قرار می‌گیرند.

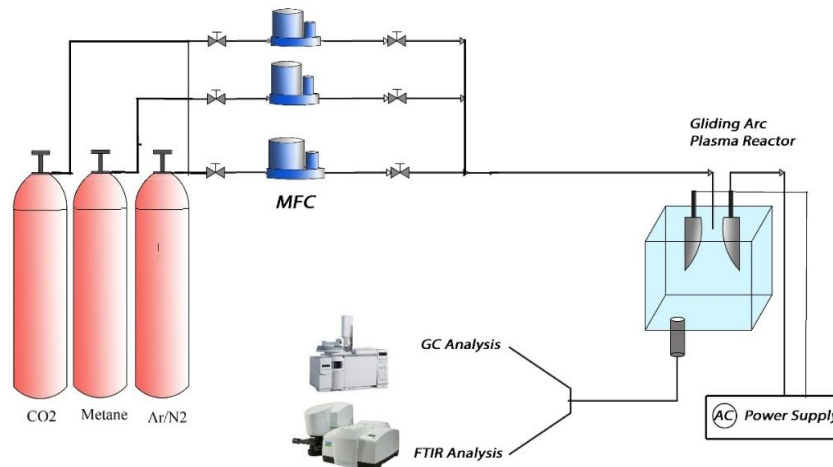


(ب)



(الف)

شکل 1. چیدمان آزمایش مربوطه به تخریب بنزن



شکل 2. چیدمان مربوط به آزمایش‌های تخریب متان و کربن دی‌اکسید

### آنالیز داده‌ها

برای محاسبه توان مصرفی منبع از دستگاه توان‌سنج (Power Analyzer DW-6090A) استفاده کرده‌ایم. برای محاسبه درصد تخریب متان از رابطه زیر استفاده شده است،

$$\eta_{removal} = \frac{X_{in} - X_{out}}{X_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

که در آن  $X_{in}$  و  $X_{out}$  به ترتیب غلظت متان و بنزن ورودی و خروجی پس از انجام فرآیند است. منظور از غلظت در این عبارت در واقع مساحت زیر منحنی نمودار کروماتوگرافی است.

محاسبه درصد به‌گزینی محصولاتی که در جدول 1 ارائه شده است از روابط زیر به‌دست آمده:

$$N = n_{H_2}^{produced} + n_{O_2}^{produced} + n_{CO}^{produced} \quad (2)$$

در رابطه بالا  $n_{H_2}^{produced}$  غلظت گاز هیدروژن، پس از تخریب متان و کربن دی‌اکسید به وسیله پلاسما است. همچنین عبارت مشابه برای  $O_2$  و  $CO$  نیز همین مفهوم را دارد. در رابطه بالا  $N$  به معنی مجموع غلظت کل (مجموع مساحت‌های زیر منحنی GC) است.

درصد به‌گزینی گاز  $H_2$ ،  $O_2$  و  $CO$  به طور مشابه از روابط زیر محاسبه شده است.

$$S_{H_2}(\%) = \frac{[n_{H_2}^{produced}]}{N} \times 100 \quad (3)$$

در اکثر تحقیقاتی که بر روی تخریب آلاینده‌ها با استفاده از سیستم‌های پلاسمایی انجام شده است درصد تخریب آن‌ها بر اساس واحد SIE (Specific Input Energy) بیان می‌گردد. مقدار این پارامتر از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

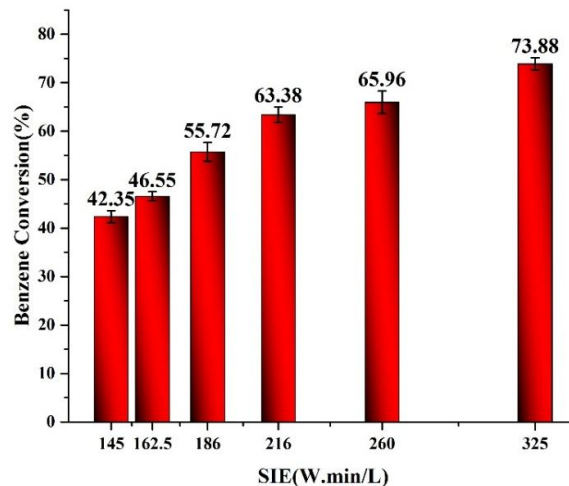
$$SIE(J/L) = \frac{P(W)}{Q(L \cdot \min^{-1})} \quad (4)$$

در این رابطه  $P$  توان پلاسما و  $Q$  فلوی کلی گاز ورودی به سیستم است.

## بحث و نتایج

### تخریب بنزن با افزایش SIE:

شکل 3 درصد تخریب بنزن را بر اساس افزایش SIE نشان می‌دهد. همان طور که نشان داده شده است، با افزایش SIE درصد تخریب بنزن افزایش یافته است. در واقع با افزایش انرژی داده شده به الکترون‌ها یون‌ها و ذرات فعال (ذراتی که با بمباران گاز آلاینده منجر به تخریب آن می‌شوند) در ناحیه پلاسما، درصد تخریب بنزن افزایش یافته است.



شکل 3. درصد تخریب بنزن بر اساس افزایش واحد SEI

### درصد و نوع محصولات تولید شده حاصل از تخریب بنزن

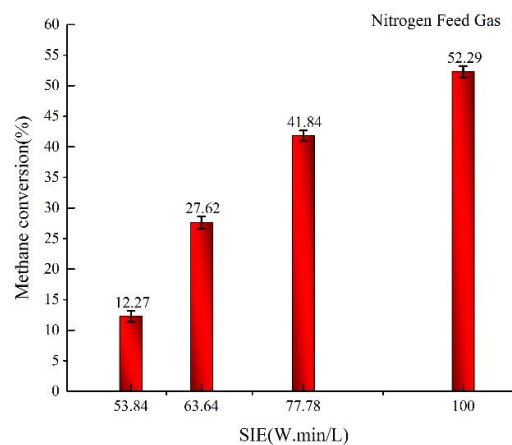
با توجه به داده‌های جدول 1 می‌توان دریافت که به‌گزینی  $\text{CO}_2$  حدوداً 88% بوده و نشان‌گر این موضوع است که در طی واکنش‌های مربوط به تخریب بنزن اکسیداسیون کامل اتفاق افتاده و 88% از این محصولات تولید شده شامل  $\text{CO}_2$  است. در فرآیند اکسیداسیون کامل محصولات حاصل شامل  $\text{CO}_2$  بیش‌تر در مقایسه با CO است زیرا CO یک محصول جانبی ناشی از فرآیند اکسیداسیون ناقص بوده و برای سلامتی خطرناک است. در اکثر تحقیقات انجام شده به کمک فناوری پلاسما تولید CO نیز گزارش می‌شود، اما در سیستم‌های مختلف درصد تولید این محصول متفاوت است. برای حذف این محصول جانبی اکثراً از کاتالیست‌ها استفاده می‌کنند و این محصول را به طور کامل حذف می‌کنند. در سیستم پلاسمای گلاپدینگ آرک میزان تولید این گونه تنها 10% است در نتیجه می‌توان گفت برای حذف آن کاتالیست کم‌تری نیاز است.

جدول 1. درصد تولید محصولات حاصل از تخریب بنزن در فلوی 3 لیتر بر دقیقه و توان 650 وات

نوع محصول	$\text{CO}_2$	CO	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	سایر هیدروکربن‌ها
درصد تولید (%)	88	10	0/79	0/6	0/15	0/46

### تخریب متان به کمک پلاسمای نیتروژن:

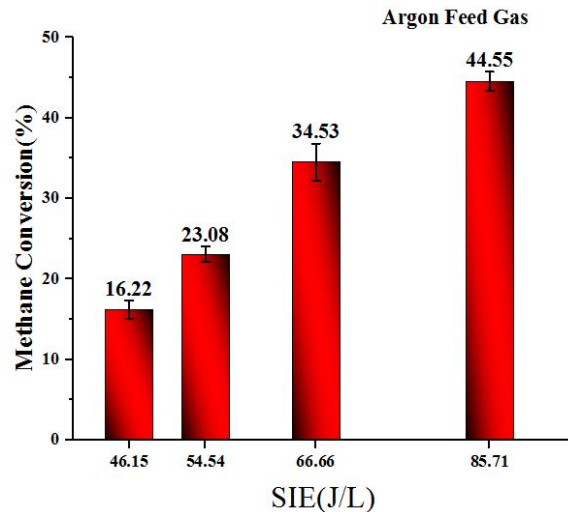
شکل 4 درصد تخریب متان را با استفاده از گاز نیتروژن برحسب افزایش SIE نشان می‌دهد. برای بررسی درصد تخریب متان به کمک پلاسمای گلایدینگ آرک از گاز کمکی نیتروژن استفاده شده است. این نتایج با استفاده از آنالیز کروماتوگرافی و FT-IR گازی به دست آمده است. فلوی گاز نیتروژن از  $3 \text{ L.min}^{-1}$  تا  $6 \text{ L.min}^{-1}$  تغییر کرده و فلوی گاز متان در  $0/5 \text{ L.min}^{-1}$  ثابت است. همان‌طور که از شکل 4 مشخص شده با افزایش SIE درصد تخریب متان افزایش می‌یابد. افزایش SIE می‌تواند ناشی از کاهش فلوی گاز یا افزایش انرژی ورودی با افزایش ولتاژ باشد. تغییر فلوی گاز ورودی از  $3/5 \text{ L.min}^{-1}$  تا  $6/5 \text{ L.min}^{-1}$  در توان ثابت 350W است. تغییر فلوی گاز در واقع به معنی همان تغییر زمان ماندگاری گاز آلاینده در راکتور است.



شکل 4. نمودار مربوط به تخریب متان با استفاده از گاز نیتروژن

### تخریب متان به کمک پلاسمای آرگون:

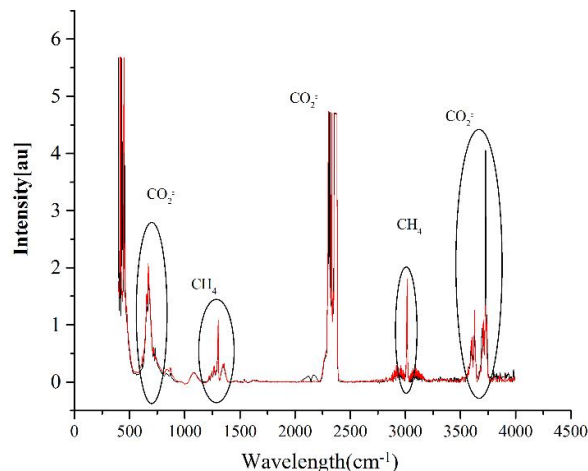
شکل 5 درصد تخریب متان را با استفاده از گاز آرگون برحسب افزایش SIE نشان می‌دهد. فلوی گاز آرگون از  $3 \text{ L.min}^{-1}$  تا  $6 \text{ L.min}^{-1}$  تغییر کرده و فلوی گاز متان در  $0/5 \text{ L.min}^{-1}$  ثابت است. همان‌طور که از شکل 5 مشخص شده با افزایش SIE درصد تخریب متان افزایش می‌یابد. تغییرات SIE ناشی از تغییر فلوی گاز ورودی از  $3 \text{ L.min}^{-1}$  تا  $6/5 \text{ L.min}^{-1}$  در توان ثابت 300W است. توان مورد استفاده برای روشن شدن پلاسمای آرگون نسبت به پلاسمای نیتروژن کم‌تر بوده و در نتیجه مقادیر SIE در توان ثابت 300 و فلوی  $3 \text{ L.min}^{-1}$  تا  $6 \text{ L.min}^{-1}$  از  $46/15 \text{ J/L}$  تا  $85/71 \text{ J/L}$  تغییر می‌کند. بیش‌ترین بازده تخریب متان با استفاده از گاز کمکی آرگون 44/55٪ است.



شکل 5. درصد تخریب متان با استفاده از پلاسمای آرگون

#### تخریب کربن دی اکسید به کمک گاز متان:

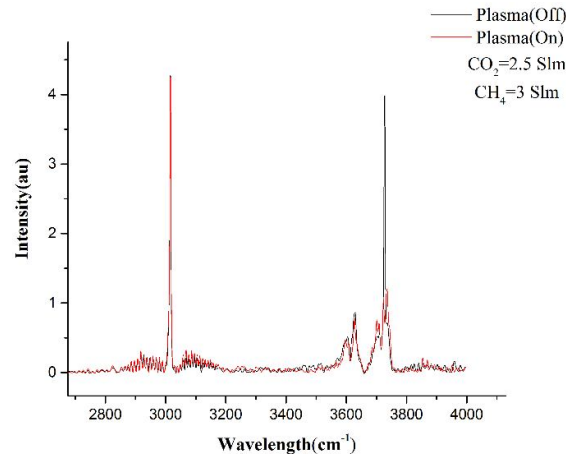
به منظور بررسی درصد تخریب گاز کربن دی اکسید از آنالیز FT-IR استفاده کرده ایم. اثر حضور گاز کمکی متان و اثر آن بر تخریب گاز  $CO_2$  را می توان از تغییرات موجود در طیف های به دست آمده دریافت. شکل (6) نمایی از پیک های مربوط به این ترکیب را نشان می دهد. نمودار مشکی رنگ مربوط به ترکیبات موجود در گاز خوراک قبل از پردازش پلاسمایی و نمودار قرمز رنگ مربوط به نتایج به دست آمده پس از عبور گاز از ناحیه بین الکترودهاست. شدت پیک های مربوط به متان و کربن دی اکسید با تغییر فلوی گاز ورودی تغییر می کنند. طول موج های مربوط به گاز متان و کربن دی اکسید در شکل 6 نشان داده شده است.



شکل 6. آنالیز FT-IR مربوط به ترکیب گازی متان و کربن دی اکسید قبل و بعد از پردازش پلاسمایی.

زمانی که نسبت  $[CH_4/CO_2]$  برابر با  $[3/2.5]$  باشد، تخریب کربن دی اکسید به خوبی قابل مشاهده است. این نتیجه به وضوح در شکل (7) نشان داده شده است. توان مصرفی منبع تغذیه در این آزمایش برابر 400W است.

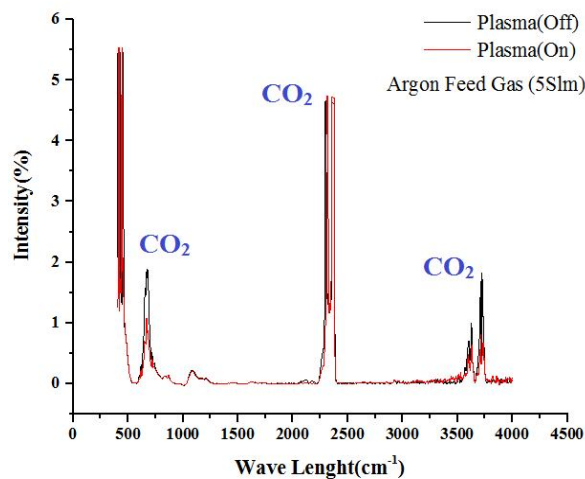




شکل 7. طیف FT-IR گاز ترکیبی متان و کربن دی اکسید قبل و بعد از پردازش پلاسمایی با نسبت  $[\text{CH}_4/\text{CO}_2]=[3/2.5]$

نمودار 8 مربوط به شدت پیک‌های مربوط به گاز  $\text{CO}_2$  با نسبت فلوی  $[\text{Ar}/\text{CO}_2]=[2.5/2.5]$  است. همان‌طور که مشخص شده شدت پیک مربوط به  $\text{CO}_2$  بعد از پردازش پلاسمایی کاهش یافته است. توان پلازما در این آزمایش 360 W است. این توان، در واقع توان مربوط به روشن شدن پلازماست که بعد از تشکیل ناحیه پلاسمایی و بعد از پردازش گاز این نتایج به دست آمده است.

تخریب کربن دی اکسید به کمک گاز آرگون:



شکل 8. طیف FT-IR جهت بررسی کیفی میزان تخریب کربن دی اکسید با استفاده از پلاسمای آرگون با نسبت

$$[\text{Ar}/\text{CO}_2]=[2.5/2.5]$$

جدول 2 نوع و درصد گزینش محصولات تولید شده در تخریب متان و کربن دی اکسید با فلوی کلی 2SIm نسبت  $[\text{CO}_2/\text{CO}=1]$  و توان 360W را نشان می‌دهد.

جدول 2. نوع و درصد محصولات تولید شده در تخریب متان و کربن دی‌اکسید در فلوی 2 لیتر بر دقیقه و توان 360 وات

نوع محصول	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO
درصد تولید (%)	72	15/5	12/5

### نتیجه‌گیری

در بررسی درصد تخریب بنزن با استفاده از راکتور گلایدینگ آرک در توان ثابت 650 W و فلوی 3 لیتر بر دقیقه بدون استفاده از کاتالیست تا 73/88% تخریب بنزن به دست آمده است. محصول عمده تولید شده در این فرآیند شامل 80% CO<sub>2</sub> است و این به معنای اکسیداسیون کلی بنزن است. سایر محصولات تولید شده شامل CO، C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> و H<sub>2</sub> به ترتیب با به‌گزینی 10، 0/79 و 0/6 درصد است که در مقایسه با سایر روش‌ها بدون استفاده از کاتالیست به‌گزینی بالای تولید کربن دی‌اکسید را نشان می‌دهد. درصد تخریب گازهای آلاینده و انواع محصولات تولید شده در تخریب گازهای متان و کربن دی‌اکسید نیز با بررسی پارامترهای توان، فلوی گاز ورودی و نوع گاز بررسی شده است. درصد تخریب گاز متان با استفاده از گازهای کمکی نیتروژن و آرگون به ترتیب 52% و 44/55% است. میزان تخریب گاز CO<sub>2</sub> به صورت کیفی بررسی شد. عمده محصولات حاصل از این پردازش شامل 72% هیدروژن، 15/5% اکسیژن و 12/5% مونوکسید کربن است.

### تشکر و قدردانی

از مدیریت محترم پژوهش و فناوری شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران و کارشناسان محترم آن مجموعه به خاطر همکاری‌های صورت گرفته در انجام پروژه و حمایت مالی آن‌ها و همچنین جناب آقای مهندس طاووسی به‌عنوان مشاور صنعتی این پروژه صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

### منابع

- [1] Fan, X., et al., Removal of low-concentration BTX in air using a combined plasma catalysis system. *Chemosphere*, 2009. 75(10): pp. 1301-1306.
- [2] Nichipor, H., et al., Kinetic modeling of benzene and toluene decomposition in air and in flue gas under electron beam irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 2012. 81(5): pp. 572-579
- [3] Baowei, W., et al., Steam Reforming of Dimethyl Ether by Gliding Arc Gas Discharge Plasma for Hydrogen Production. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2014. 22(1): pp. 104-112.
- [4] Tu, X. and J. Whitehead, Plasma-catalytic dry reforming of methane in an atmospheric dielectric barrier discharge: Understanding the synergistic effect at low
- [5] Tu, X. and J.C. Whitehead, Plasma dry reforming of methane in an atmospheric pressure AC gliding arc discharge: Co-generation of syngas and carbon nanomaterials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014. 39(18): pp. 9658-9669
- [6] Liu, Q., et al. Kinetic Effects of Non-Equilibrium Plasma-Assisted Methane Steam Reforming on Heat Recovery in Chemically Recuperated Gas Turbine. In ASME 2013
- [7]. Fridman, A., *Plasma chemistry*. 2008: Cambridge University Press.