

مطالعه تأثیر نوع سوخت و جریان هوا بر میزان تولید محصولات گازی در احتراق مشعل‌ها

رؤیا سلیمی¹، داود کاه‌فروشان^{2*}، اسماعیل فاتحی‌فر³، جواد احمدی⁴

¹ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی

² دانشیار، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکده مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات مهندسی محیط زیست

³ استاد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکده مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات مهندسی محیط زیست

⁴ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی

دریافت: 95/2/26 پذیرش: 95/12/1

چکیده

هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر وزش باد و نوع گاز سوختی به کار رفته در تولید آلاینده‌های دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن‌های نسوخته و مطالعه اثر کیفی این تغییرات بر رنگ و ساختار شعله در احتراق مشعل گازی است. برای این منظور از احتراق ترکیب‌های مختلف سوخت‌های گاز طبیعی، بوتان و پروپان در یک مشعل گازی در ابعاد آزمایشگاهی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها نشان داد که هم وزش باد و هم تغییر ترکیب سوخت بر تولید محصولات حاصل از احتراق تأثیرگذار هستند. با کاهش جرم مولکولی سوخت تولید هر سه ترکیب دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن‌های نسوخته کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت جریان هوا بر مشعل میزان تولید ترکیبات کاهش می‌یابد. البته شدت تأثیر در مورد ترکیب دی‌اکسیدکربن به‌مراتب شدیدتر بوده و در مورد اکسیدهای نیتروژن کم‌تر است.

کلمات کلیدی: مشعل گازی، فرآیند احتراق، دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌های نسوخته.

مقدمه

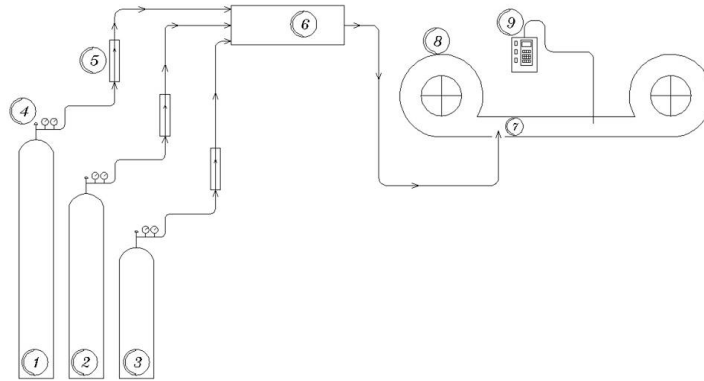
احتراق در مشعل، فرآیند اکسیداسیون با دمای بالا است که برای سوزاندن ترکیبات قابل احتراق که عمدتاً هیدروکربن‌ها و گازهای زائد در عملیات صنعتی هستند به کار می‌رود. گاز طبیعی، پروپان، اتیلن، پروپیلن، بوتادین و بوتان حدود 95% گازهای زائد سوخته شده در مشعل را تشکیل می‌دهند. آلاینده‌های

* kahforoushan@sut.ac.ir

غیرهیدروکربنی ناشی از احتراق گازها که از لحاظ زیست‌محیطی اهمیت دارند شامل اکسیدهای نیتروژن، مونواکسید کربن و دی‌اکسیدکربن هستند [1]. بازده احتراق در مشعل‌ها به چندین عامل بستگی دارد که شامل دمای شعله، زمان ماند گاز در منطقه احتراق و اختلاط می‌باشد. در مشعل‌ها، این عوامل تحت تأثیر متغیرهای عملیاتی و محیطی شامل ترکیب گاز ورودی به مشعل، سرعت گاز خروجی از مشعل و شرایط باد قراردارند [2-3]. ارزش حرارتی گاز وابسته به ترکیب گاز می‌باشد و چنانچه ارزش حرارتی گاز مشعل کافی نباشد، معمولاً به دلیل کاهش دمای شعله، ممکن است احتراق ناقص گاز به وجود آید [4]. سرعت وزش باد نیز به دلیل جلوگیری از عدم ورود هوای کافی به ناحیه احتراق می‌تواند اندازه شعله را به کم‌تر از مقادیر بهینه کاهش داده و سبب افت بازده احتراق در مشعل‌ها گردد [5]. لذا با توجه به تأثیر سایر عوامل فرآیندی، معمولاً احتراق کامل در مشعل‌ها حاصل نمی‌گردد. در طول یک واکنش احتراق ناقص، واکنش‌های جانبی و محصولات واسطه‌ای متعددی تشکیل می‌شوند. مهم‌ترین آلاینده‌هایی که به واسطه‌ی اکسیداسیون ناقص طی عملیات فلرینگ به وجود می‌آیند مونواکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته هستند [6]. در مشعل‌های گازی حتی در صورت احتراق کامل، مهم‌ترین محصولات احتراق، دی‌اکسید کربن و آب هستند. هرچند این محصولات در گذشته به‌ظاهر بی‌ضرر بودند، ولی امروزه دی‌اکسید کربن یک منبع قابل‌ملاحظه در عدم تعادل اتمسفر به حساب می‌آید و نگرانی‌های جهانی در مورد تأثیرات گلخانه‌ای این گاز در حال افزایش است. بنابراین لازم است شرایط تولید این ترکیبات در مشعل‌ها برای کنترل بهینه تولید آلاینده‌ها برای جلوگیری از آلودگی هوا موردبررسی قرار گیرد [2].

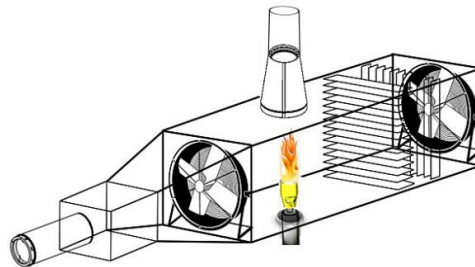
مواد و روش‌ها

در این تحقیق از یک مشعل آزمایشگاهی برای انجام آزمایش‌ها استفاده گردید. در شکل 1 قسمت‌های مختلف دستگاه آزمایشگاهی ارائه شده است. نازل استفاده شده در آزمایش‌ها، نازل با قطر $\frac{1}{8}$ اینچ (3/175 میلی‌متر) است. از یک سر مشعل 4 اینچی نیز برای اطمینان از تشکیل مناسب جبهه‌ی شعله در ابتدای خروج از نازل استفاده شد. برای اطمینان از اختلاط کامل گازهای ورودی به مشعل آزمایشگاهی، از یک محفظه‌ی اختلاط استفاده شد. طول محفظه 60 سانتیمتر و قطر داخلی آن 4 سانتیمتر است. درون محفظه از تیغه‌هایی با ابعاد 3/9 در 11 سانتیمتر و ضخامت 2 میلی‌متر استفاده شد که با زوایای 90 و 180 درجه به یکدیگر متصل شده‌اند. همزن قابلیت مخلوط نمودن 5 نوع گاز را داراست. با توجه به فشارهای بالای کپسول‌های گاز (120-160 بار)، برای ترکیب گازها لازم است ابتدا فشار کپسول هر گاز به مقادیر نزدیک اتمسفر کاهش یابد. بدین منظور از شیرهای فشارشکن و رگلاتور استفاده شد. سپس با استفاده از جریان سنج، مقدار جریان هر گاز به نسبت مورد نیاز تنظیم شده و سپس گازها وارد محفظه‌ی اختلاط گردید. خروجی هر فلومتر به ورودی‌های میکسر متصل می‌شود و پس از آن گاز ترکیب شده از خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل 1. قسمت‌های مختلف دستگاه آزمایشگاهی: 1. مخزن گاز نیتروژن 2. مخزن گاز طبیعی 3. مخزن مخلوط گازهای پروپان و بوتان 4. فشارسنج 5. دبی سنج (فلومتر شیشه‌ای) 6. محفظه‌ی اختلاط 7. محفظه‌ی احتراق 8. فن هوا 9. آنالیزور گاز

برای انجام آزمایشگاه تأثیر باد بر شعله و مطالعه فرآیند احتراق در مشعل‌های در معرض باد، از کانال باد (شکل) استفاده شد. این کانال با سطح مقطع 55 سانتیمتر در 45 سانتیمتر و به طول 115 سانتیمتر است. برای ایجاد جریان باد از دو عدد فن با دور متغیر استفاده شد. فن با گستره‌ی دور بالاتر (1800 دور در دقیقه) در عقب مشعل و فن با دور کم‌تر (1550 دور در دقیقه) در جلوی مشعل نصب گردید. هدف از این کار ایجاد یک حالت مکش درون کانال و جلوگیری از ازدیاد فشار هوا در اطراف مشعل و به وجود آمدن گردابه‌ها در گوشه‌های تونل بود. برای هرچه یکنواخت‌تر کردن جریان باد و جلوگیری از جریان‌های چرخشی و رشد لایه‌ی مرزی از تیغه‌های فلزی عمود بر راستای جریان باد استفاده شد. ضخامت تیغه‌ها یک میلی‌متر و پهنای آن‌ها سه سانتیمتر است.



شکل 2. کانال باد برای مطالعه فرآیند احتراق مشعل‌های در معرض باد

برای انجام آزمایش‌های موردنظر، از روش طراحی آزمایش فاکتوریل عمومی¹ با سطح اطمینان 95% ($\alpha=0/05$) و توسط نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شد. برای تحلیل آماری نتایج و بررسی تأثیر متغیرها نیز از آنالیز واریانس استفاده شد. این تحلیل‌ها با استفاده از آزمون فیشر² صورت می‌پذیرد. بر این اساس برای بررسی تأثیر متغیرها از مقادیر F و P در جداول آنالیز واریانس استفاده می‌شود. پارامتری تأثیرگذار است که

¹ Full Factorial Design

² Fisher (F)

مقدار P آن کوچکتر از 0/05 باشد. هرچه این مقدار به عدد صفر نزدیکتر باشد، تأثیر اثر مربوطه بیشتر خواهد بود. همچنین در پارامترهایی که مقدار P آن‌ها یکسان یا نزدیک به هم است، پارامتری که مقدار F آن بزرگتر باشد، مؤثرتر واقع می‌شود. [7].

متغیرهای موردنظر در آزمایش‌ها ترکیب سوخت و سرعت باد بودند. نوع سوخت بر اساس نسبت دبی حجمی گاز طبیعی به نسبت حجمی مخلوط پروپان و بوتان (ترکیب 75% بوتان و 25% پروپان) تعریف شد. تعداد و مقادیر سطوح برای هرکدام از متغیرها در جدول 1 نشان داده شده است. تعداد آزمایش‌های لازم از روش فاکتوریل عمومی 16 آزمایش تعیین شد که به صورت کاملاً تصادفی انجام شدند. همچنین جهت اطمینان از صحت نتایج و به حداقل رساندن خطاها برای کلیه آزمایشات دو بار تکرار در نظر گرفته شد.

جدول 1. پارامترها و تعداد سطوح انتخاب شده برای طراحی آزمایش

سطح 4	سطح 3	سطح 2	سطح 1	
0 به 1	1 به 2	1 به 2	0 به 1	نوع سوخت (CH ₄ /C ₃ H ₈ +C ₄ H ₁₀) (نسبت حجمی ترکیب دو سوخت)
سوخت 4	سوخت 3	سوخت 2	سوخت 1	
1/2	0/8	0/4	0/0	سرعت باد (m/s)

با توجه به جدول 1، سوخت 1 تنها حاوی پروپان و بوتان و سوخت 4 نیز گاز طبیعی در نظر گرفته شد مشخصات آنالیز گاز طبیعی مورد استفاده در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2. مشخصات و ترکیب درصد اجزای گاز طبیعی استفاده شده در آزمایش‌ها*

89/59554	متان	ترکیبات گاز (% مولی)
2/98131	اتان	
1/64861	پروپان	
0/55455	بوتان	
0/09999	پنتان و هیدروکربن‌های بالاتر	
4/27935	نیتروژن	
0/83266	دی‌اکسید کربن	
0/00799	اکسیژن	سولفور (mg/scm)
0/386	سولفید هیدروژن	
4/870	مرکاپتان سولفور	
10/985	کل گوگرد	ارزش حرارتی ناخالص (kcal/cm ³)
9112/730		

8213/28	(kcal/cm ³)	ارزش حرارتی خالص
0/6216		چگالی نسبی

* مشخصات گاز طبیعی استفاده شده از امور هماهنگی و نظارت بر انتقال گاز شهر تبریز دریافت شده است.

ادامه جدول 2. مشخصات و ترکیب درصد اجزای گاز طبیعی استفاده شده در آزمایشها

برای اندازه گیری غلظت آلاینده های حاصل از احتراق در مشعل آزمایشگاهی از دستگاه قابل حمل سنجش آلاینده ها با نام Gasmet FTIR Gas Analyzer مدل Dx4000 ساخت کشور فنلاند استفاده شد. در جدول 3 مشخصات دستگاه به کار رفته نشان داده شده است.

جدول 3. مشخصات دستگاه به کار رفته برای اندازه گیری غلظت گازها

محدوده ی اندازه گیری غلظت آلاینده ها (ppm)	
0-10000	دی اکسید کربن
0-1000	اکسیدهای نیتروژن
0-2000	هیدروکربن های نسوخته

مقدار خطای احتمالی یا عدم قطعیت داده ها از فرمول 1 محاسبه شد [8]:

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

در این فرمول، σ_m انحراف معیار مقدار میانگین¹ و σ انحراف معیار مجموعه ی اندازه گیری ها و n تعداد اندازه گیری ها در هر نقطه است. درصد عدم قطعیت داده های آزمایشگاهی (X)، نیز از رابطه ی 2 محاسبه شد:

$$X\% = \frac{\sigma_m}{X} \quad (2)$$

\bar{x} در این رابطه، مقدار میانگین حسابی داده های آزمایشگاهی است.

نتایج و بحث

مقادیر میانگین غلظت ترکیبات حاصل از احتراق در جدول 4 آورده شده است. مقادیر میانگین عدم قطعیت داده های آزمایشگاهی برای مقادیر اندازه گیری دی اکسید کربن، 3/5% ±، اکسیدهای نیتروژن، 12% ± و هیدروکربن های نسوخته، 4/3% ± تعیین شد که مقادیر نسبتاً پایینی هستند و نشان دهنده پراکندگی قابل قبول داده ها و دقت انجام آزمایشها هستند. همان طور که انتظار می رفت عمده محصول تولیدی از مشعل گاز دی اکسید کربن است که در کنار آن مقدار قبل ملاحظه ای ترکیبات هیدروکربنی نسوخته هم

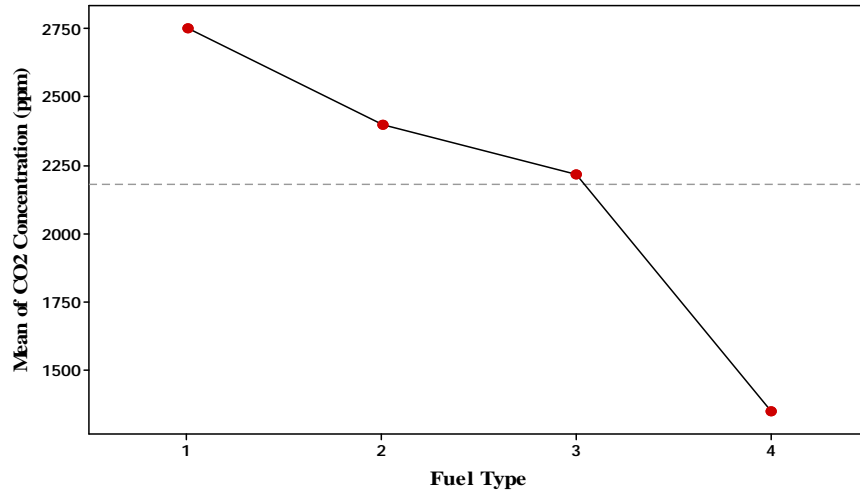
¹ SDOM: Standard Deviation Of Mean

تولید می‌گردد. در کل میزان اکسیدهای نیتروژن از مشعل گازی در مقایسه با دو ترکیب دیگر پایین است. مکانیسم‌های عمده تولید اکسیدهای نیتروژن در فرایند احتراق، مکانیسم حرارتی و تجزیه ترکیبات نیتروژن دار است. لذا میزان پایین ترکیبات نیتروژن دار سوخت به دلیل خلوص بالا و پایین بودن دما می‌تواند دلیل این امر باشد [9].

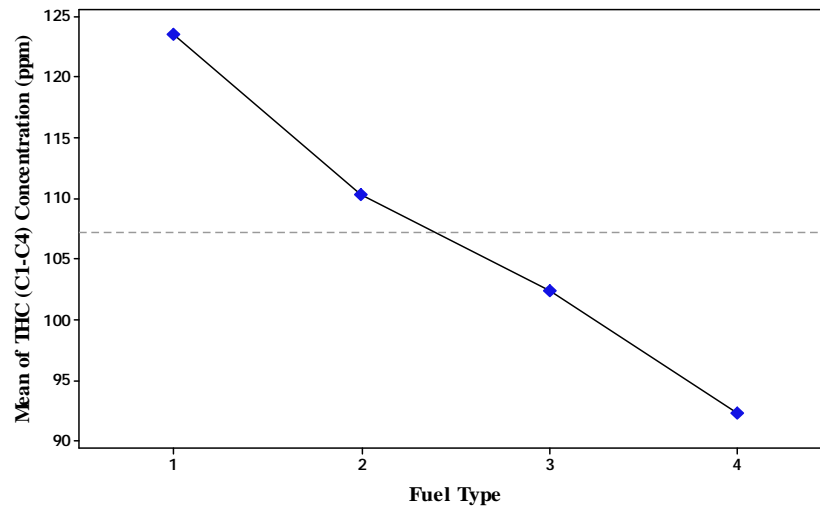
جدول 4. مقادیر متوسط حاصل از تعیین ترکیبات حاصل از احتراق

شماره سوخت				آلاینده‌ی گازی (ppm)	سرعت باد (m/s)
4	3	2	1		
2248	4972	5292	5657	دی‌اکسیدکربن	0/0
17/5	25/0	50/5	57/5	اکسیدهای نیتروژن	0/0
88/90	105/70	111/45	108/85	هیدروکربن‌های نسوخته	0/0
1208	1669	1917	2114	دی‌اکسیدکربن	0/4
12/5	21/0	43/0	49/0	اکسیدهای نیتروژن	0/4
88/35	101/05	105/15	101/80	هیدروکربن‌های نسوخته	0/4
1053	1392	1498	1861	دی‌اکسیدکربن	0/8
9/0	16/5	35/5	43/5	اکسیدهای نیتروژن	0/8
66/90	91/96	92/50	97/35	هیدروکربن‌های نسوخته	0/8
1026	1252	1495	1789	دی‌اکسیدکربن	1/2
6/5	27/5	39/5	48/0	اکسیدهای نیتروژن	1/2
60/80	83/15	68/70	77/80	هیدروکربن‌های نسوخته	1/2

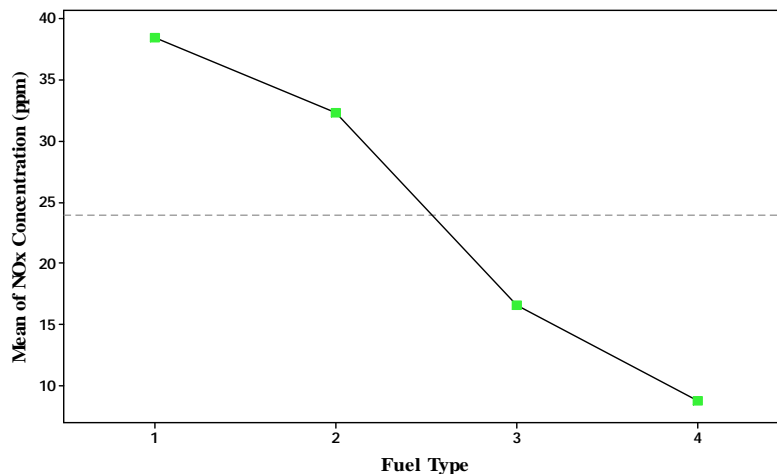
تأثیر سبک‌تر شدن سوخت بر تولید آلاینده‌ی دی‌اکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته به ترتیب در شکل و 4 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش وزن مخلوط گازی، میزان هر دو ترکیب کاهش پیدا می‌کند؛ مهم‌ترین دلایل این امر می‌تواند اولاً در ارتباط با کاهش تعداد مولکول‌های هیدروکربن ورودی به مشعل و در نتیجه کاهش تعداد مول‌های تولیدی کربن و ثانیاً احتراق بهتر سوخت به دلیل کوتاه شدن زنجیر هیدروکربنی ارزیابی شود [10]. هرچند همین روند در مورد ترکیب اکسیدهای نیتروژن نیز قابل مشاهده است (شکل 5)، ولی به دلیل حد پایین تولید این ترکیب قاطعی در این مورد قابل ذکر نیست. افت بازده احتراق یا ارزش حرارتی می‌تواند دلایل کاهش تولید این آلاینده ارزیابی شوند.



شکل 3. تغییرات متوسط غلظت دی اکسید کربن با کاهش جرم مولکولی سوخت



شکل 4. تغییرات متوسط غلظت هیدروکربن های نسوخته با کاهش جرم مولکولی سوخت



شکل 5. تغییرات متوسط غلظت اکسیدهای نیتروژن با کاهش جرم مولکولی سوخت

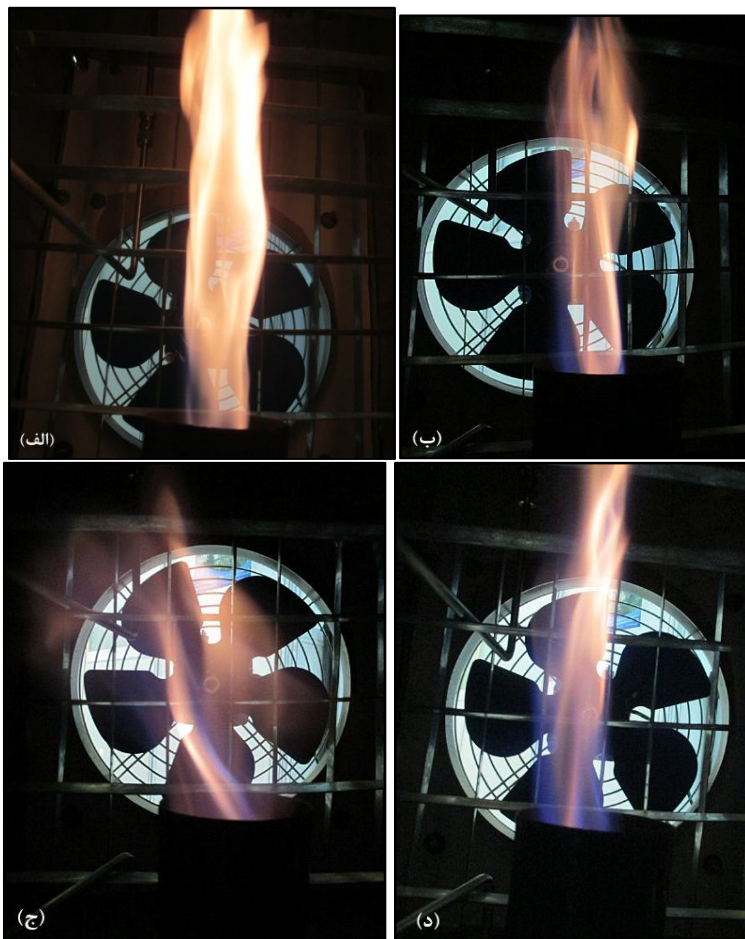
همین تأثیرات به‌طور مشابهی در مورد وزش هوا نیز بر تولید ترکیبات قابل مشاهده است. به‌طوری‌که در مورد هر سوخت، با وزش باد بر شعله میزان تولید ترکیبات به‌طور مشخص کاهش یافته‌اند. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد دلیل این امر می‌تواند کاهش بازده احتراق به‌دلیل کاهش زمان ماند سوخت در ناحیه احتراق و کاهش دمای شعله باشد. البته شاید رقیق‌تر شدن و پخش ترکیبات گازی به‌دلیل وزش باد نیز در این مورد بی‌تأثیر نباشد. نتایج جدول آنالیز واریانس و مقادیر F و P برای محصولات در جدول 5 قابل مشاهده است. براساس نتایج این تحلیل نوع سوخت‌ها و وزش باد بر میزان تولید آلاینده‌ها تأثیرگذار است.

جدول 5. نتایج آنالیز جدول واریانس برای محصولات حاصل از احتراق

R^2 (%)	P مقدار	F مقدار	میانگین مربعیات	مجموع مربعیات	درجه‌ی آزادی		
99/37	0/000	320/52	8501320	25503961	3	نوع سوخت	دی‌اکسیدکربن
	0/000	1947/11	51644768	782179	3	سرعت باد	
91/19	0/000	49/30	81/4741	12544/4	3	نوع سوخت	هیدروکربن‌های نسوخته
	0/000	83/52	3267/64	9802/9	3	سرعت باد	
93/71	0/000	155/95	45/0313	135/094	3	نوع سوخت	اکسیدهای نیتروژن
	0/000	16/64	4/8046	14/414	3	سرعت باد	

در این مورد متغیر وزش باد بیش‌ترین تأثیر را بر تغییرات تولید دی‌اکسیدکربن داشته است. همین تحلیل در مورد هیدروکربن‌های نسوخته نیز مشابه است. اما در مورد آلاینده‌های نیتروژن، متغیر نوع سوخت در مقایسه با تأثیر وزش باد اهمیت بیش‌تری نشان می‌دهد. این نتیجه شاید دلیل محکمی باشد که عمده

مکانیسم تولید آلاینده اکسیدهای نیتروژن در مشعل‌های گازی ترکیبات نیتروژن دار سوخت بوده و به دلیل دمای پایین مشعل گازی، تولید این آلاینده از طریق مکانیسم حرارتی چندان قابل توجه نیست [11]. در نهایت برای بررسی کیفی تأثیر کیفیت سوخت بر رنگ ظاهری شعله مشعل، این شعله در چهار نوع ترکیب گازی متفاوت با شرایط مشابه (سرعت باد 0/0 متر بر ثانیه) بررسی شد (شکل 6). شعله، در حالت استفاده از سوخت مایع زردرنگ بوده و هر چه تعداد کربن سوخت کم‌تر شد از میزان رنگ زرد در نزدیکی مشعل کاسته شد. در واقع همان‌طور که مشاهده می‌شود سبک‌تر کردن جرم مولکولی سوخت باعث گردیده است رنگ زرد شعله‌ی غیرپیش‌آمیخته‌ی مشعل، آبی گردد.



شکل 6. مقایسه‌ی رنگ ظاهری شعله (الف) سوخت 1 (ب) سوخت 2 (ج) سوخت 3 (د) سوخت 4

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از یک مشعل گازی آزمایشگاهی تأثیر نوع سوخت و وزش باد بر میزان تولید محصولات گازی مشعل و کیفیت ظاهری شعله بررسی گردید. نتایج نشان داد با سبک‌تر کردن جرم مولکولی سوخت ورودی به مشعل، تولید هر سه ترکیب دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و

هیدروکربن‌های نسوخته کاهش می‌یابد؛ در مورد رنگ ظاهری شعله هم با کاهش جرم مولکولی سوخت از رنگ زرد شعله کاسته می‌شود، در واقع دوده‌ی تولیدشده در شعله‌ی گاز سبک‌تر کم‌تر از شعله‌ی گاز سنگین‌تر است. نتایج طراحی آزمایش و آنالیز واریانس نشان داد که پارامتر سرعت باد بیش‌ترین تأثیر را بر میزان غلظت آلاینده‌های دی‌اکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته دارا می‌باشد. همچنین پارامتر نوع سوخت نسبت به دو پارامتر دیگر سهم بیش‌تری در میزان غلظت آلاینده‌ی اکسیدهای نیتروژن نشان داد.

منابع

1. D. Kahforoushan, J. Bezaatpour, E. Fatehifar, Effect of Various Parameters on Emission Factors of Gas Flares, *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 11(3), 2014, pp. 59-66.
2. D. Kahforoushan, E. Fatehifar, J. soltan, The Estimation of CO₂ emission factors for combustion sources in oil and gas processing plants, *Energy Sources, Part A Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(3), 2011, pp. 202 — 210.
3. A Talebi, E. Fatehifar, R. Alizadeh , D. Kahforoushan, Evaluation and estimation of practical gaseous pollutants emission factors for gas flares, *International Conference on Environment 2010 (ICENV 2010)*, Penang, Malaysia, 2010.
4. A. Talebi, E. Fatehifar, R. Alizadeh and D. Kahforoushan, Estimation and evaluation of new CO, CO₂ and NO_x emission factors for gas flares using pilot scale flare, *Energy Sources, Part A Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 36, 2014, pp. 719 -726.
5. Leahey, D.M., Preston, K. and Strosher, M, Theoretical and Observational Assessments of Flare Efficiencies, *Journal of Air and Waste Management Association*, 51(12), 2001, pp.1610-1616.
6. EPA, *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, vol. 1: Stationary Point and Area Sources , 5th Ed., (AP-42), Section 13.5: Industrial Flares, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, USA, 1993.
7. Z. R. Lazic, *Design of Experiments in Chemical Engineering: A Practical Guide*, New York ,WILEY-VCH Verlag GmbH and Co., 2004.
8. D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 4th. Ed., New York, Wiley, 1997.
9. S. C. Hill and L. D. Smoot, Modeling of Nitrogen Oxides Formation and Destruction in Combustion System, *Progress in Energy Combustion Science*, 26, 2000, pp. 417-458.
10. J. A. Sonibare and A. R. Coderre, A Theoretical Prediction of Non-methane Gaseous Emissions from Natural Gas Combustion, *Energy Policy*, 32, 2004, pp. 1653-1665.
11. D. Kahforoushan, E. Fatehifar, A. Zoveydavi, N. Jafarzadeh Hagighi and S.M. Hedayatzadeh, Evaluation of CO, SO₂ and NO_x Emission Factors for Gas Flares in Oil and Gas Processing Plants, *Petroleum Research*, 21(67), 2011, pp.39-49. (in persian)