

بررسی نورتابی شیمیایی شعله‌ی مشعل فیبر فلزی با هدف تعیین محدوده‌ی مناسب عملکرد مشعل

احسان روحانی^۱، محمد ضابطیان طرقي^{۲*}، رویا عزیزی^۳، هادی پاسدار شهری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ehsanrohani1997@gmail.com

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، zabetian@modares.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، roya.azizi@modares.ac.ir

۴- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، pasdar@modares.ac.ir

* نویسنده مخاطب

چکیده

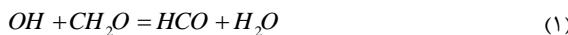
در این پژوهش، از روش آنالیز نورتابی شیمیایی جهت بررسی محدوده‌های عملکردی مشعل متخلخل فیبر فلزی استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری دمای سطح مشعل از روش پایرومتری دورنگ استفاده شده است. مقدار آلاینده‌های خروجی از محفظه احتراق مشعل نیز با استفاده از آنالیز گاز مورد بررسی قرار گرفته‌اند و گزارش شده‌اند. تغییرات تابش گونه‌ی اصلی OH^* نقش اساسی در تعیین نرخ حرارت آزاد شده از شعله را دارد، بنابراین در نسبت هم‌ارزی و ظرفیت‌های مختلف، مقدار تابش این گونه مطالعه شده است. نقطه بیشینه نورتابی شیمیایی گونه‌های OH^* و H_2O^* نشان می‌دهد، محدوده مناسب کارکرد این مشعل در محدوده نسبت هم‌ارزی ۰/۸۸ تا ۰/۹۲ است. که مربوط به حالت احتراق داخل محیط متخلخل فیبر فلزی است. نتایج اندازه‌گیری دمای سطح سرمشعل با استفاده از طیف تابش حرارتی آن و به روش پایرومتری دورنگ نیز نشان می‌دهد در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶، دمای سطح به بیشینه می‌رسد و در تمام بازه‌ی نسبت هم‌ارزی ۰/۸۸ تا ۰/۹۲، دمای سطح و تابش حرارتی فیبر فلزی بالا است که نشانه‌ی انتقال حرارت تشعشعی بالای سطح است. با مطالعه غلظت آلاینده‌های اندازه‌گیری شده نیز می‌توان مشاهده کرد که مقدار ماکزیمم آلاینده NO_x در این مشعل در حدود ۲۰ ppm و مربوط به محدوده نسبت هم‌ارزی با بیشترین آزادسازی حرارت است. در نسبت هم‌ارزی‌هایی که این مشعل عملکرد مناسب دارد مقدار آلاینده‌ی CO ۴ ppm گزارش شده است که نتیجه‌ی احتراق کامل و پایدار است.

کلمات کلیدی: مشعل متخلخل فیبر فلزی، نورتابی شیمیایی، پایرومتری دورنگ

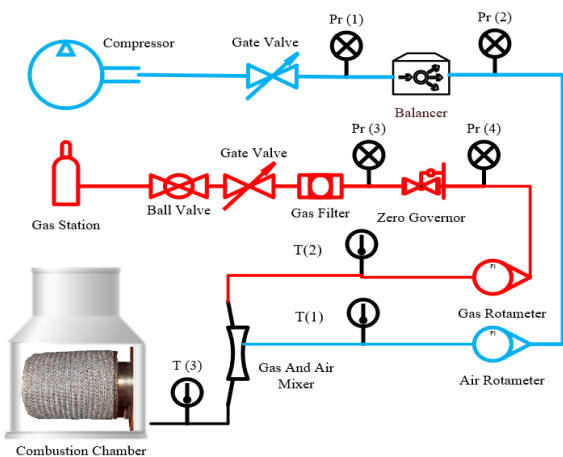
مقدمه

نورتابی شیمیایی شامل تابش طبیعی از رادیکال‌های برانگیخته است که طی یک واکنش شیمیایی از سطوح انرژی بالاتر به سطوح انرژی پایین می‌روند. نورتابی شیمیایی شعله‌ی هیدروکربن‌ها به طور عمده حاصل از تابش رادیکال‌های برانگیخته‌ی OH^* ، CH^* و C_2^* و طیف پیوسته‌ی CO_2^* است. مطالعه‌ی نورتابی شیمیایی رادیکال‌های OH^* ، CH^* می‌تواند لبه‌ی واکنشی شعله، ساختار و شکل شعله، توزیع نرخ آزادسازی حرارت و نسبت هم‌ارزی محلی را نشان دهد. مطالعه‌ی عددی و تجربی نورتابی شیمیایی رادیکال‌های OH^* و CH^* شعله‌ی متان در مشعل بانسن با جریان هوای جانبی نشان می‌دهد که رادیکال OH^* مشخصه‌ی کاربردی در تعیین نرخ آزادسازی حرارت است. در حالی که نورتابی شیمیایی رادیکال CH^* به خوبی نسبت به آزادسازی حرارت حساس نیست و سیگنال آن به راحتی مخدوش می‌شود [۱]. در سال ۲۰۰۲، لئوناردی و همکاران [۲] مطالعاتی بر روی رو مشعل‌های صفحه تخت یک لایه و دولایه را انجام دادند. آن‌ها ابتدا دمای ظاهری شعله را با استفاده از دماسنج تشعشعی اندازه‌گیری کردند و سپس دمای اندازه‌گیری شده را با طیف تابشی سطح مشعل مقایسه کردند تا اثرات تشعشع حذف شوند. آن‌ها نشان دادند که اثر جذب حرارت توسط گونه‌ها کمتر از ۵۰ کلوین خطا ایجاد میکند. نتایج بررسی تجربی آن‌ها نشان داد که دمای سطح مشعل و گازهای احتراقی در مشعل دولایه بالاتر از مشعل یک لایه است و مشعل دولایه بازده تشعشعی بالاتری دارد. دلیل این دما و بازدهی تشعشعی بالا این است که لایه دوم سطح سرمشعل مقاومت بیشتری در برابر مسیر مخلوط گاز ایجاد میکند و گاز مدت زمان بیشتری در دمای

بالا قرار می‌گیرد. در نتیجه این اتفاق بازدهی مشعل دولایه ۵ درصد بیشتر خواهد بود. بیونگون و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۳ بر روی سه مشعل متخلخل مختلف با درصد تخلخل‌های مختلف از جنس استیل مشبک، سرامیک و فیبرفلزی به ترتیب با درصد تخلخل‌های ۳۱/۱، ۴۹/۵ و ۸۹ آزمایش کردند. بدین ترتیب آن‌ها دریافتند که مشعل فیبرفلزی با بالاترین درصد تخلخل بیشترین بازدهی، کمترین میزان تولید آلاینده CO و بیشترین تولید آلاینده NO_x را دارد. سلطانیان و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۹، جهت استخراج محدوده عملکرد مناسب مشعل متخلخل از آنالیز نورتابی شیمیایی استفاده کردند. با بررسی نورتابی شیمیایی گونه‌های مهم احتراقی OH^* و CO_2^* در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف نشان دادند که محدوده عملکرد نسبت هم‌ارزی‌های ۰/۷۵ تا ۰/۸۵ بیشترین نرخ حرارت آزاد شده را دارد و همچنین در نسبت هم‌ارزی ۰/۸۲ سطح بیشترین دما را دارد و در همین محدوده، نورتابی شیمیایی گونه‌های OH^* و CO_2^* ماکزیمم است. یوهو و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۹، با مطالعه‌ی عددی و تجربی شعله‌ی آرام، پایا و پیش‌آمیخته‌ی متان و هوا، رابطه‌ی بین نورتابی شیمیایی و نرخ آزادسازی حرارت را مورد بررسی قرار دادند. با بررسی سهم واکنش‌های شیمیایی در نرخ تولید حرارت در نسبت هم‌ارزی یک نشان داده شد که ۲۶/۳۴ درصد از کل تولید حرارت مربوط به واکنش‌هایی است که گونه‌ی OH به طور مستقیم در آنها مشارکت دارد. همچنین نرخ واکنش ۱ و کسر مولی HCO با تولید حرارت رابطه‌ی نزدیکی دارد. با استفاده از تابع توزیع غلظت گونه‌ها و توزیع نرخ آزادسازی حرارت در شعله، یک تابع تخمین خطا حاصل شد که نشان می‌دهد خطای غلظت OH^* در تعیین بیشینه نرخ آزادسازی حرارت بیشتر از HCO و کمتر از CH^* است بنابراین OH^* در تعیین نرخ آزادسازی حرارت دقیق تر از CH^* است. محل تشکیل بیشینه تابش رادیکال‌ها نیز نشان می‌دهد رادیکال CH^* زودتر از نرخ آزادسازی حرارت و OH^* به بیشینه تابش می‌رسد و بعد از آن از بین می‌رود بنابراین نشانه‌ی اولین مرز ناحیه‌ی واکنشی در بالادست جریان است.



لیو و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۰، جهت بررسی بازدهی و آلاینده‌ی، دو مشعل استیلی و فیبرفلزی را مورد آزمایش قرار دادند. طبق بررسی‌ها نشان دادند که میزان تولید آلاینده CO در مشعل استیلی بیشتر از فیبرفلز است. آن‌ها نشان دادند که دلیل بیشتر بودن طول و دمای شعله در مشعل استیلی، در هوای اضافی کمتر از ۱/۲۵ بازده حرارتی مشعل فیبرفلز از استیلی کمتر است. در نسبت هوای اضافی بالاتر از ۱/۳۵، مشعل فیبرفلز وارد حالت احتراقی مدفون میشود و بازده حرارتی آن افزایش می‌یابد. فتحی و همکاران [۷] در سال ۱۳۹۸، یک نمونه مشعل فیبرفلز استوانه‌ای را مورد تحقیق قرار دادند. در این تحقیق از ترموکوپل نوع k برای اندازه‌گیری دمای سطح مشعل و شعله استفاده شده است. در این تحقیق نشان داده شده است که در نرخ سوختن ثابت، با افزایش نسبت هم‌ارزی، جبهه شعله از بالادست جریان به پایین‌دست منتقل میشود و این انتقال جبهه شعله سبب ایجاد احتراق داخلی و افزایش دمای سطح میشود. آن‌ها همچنین با استفاده از



شکل ۱: شماتیک سامانه‌ی راه‌اندازی مشعل

جدول ۱: مشخصات دستگاه‌های اندازه‌گیری

دستگاه اندازه‌گیری	محدوده اندازه‌گیری	دقت مقیاس کامل
فشارسنج ۲	0-40 mbar	1 mbar
فشارسنج ۴	0-100 mbar	2 mbar
دماسنج‌های ۱، ۲ و ۳	0-60 °C	1 °C
روتامتر گاز	0.3-3 m ³ /h	0.05 m ³ /h
روتامتر هوا	0.5-45 m ³ /h	1 m ³ /h

داخل محفظه‌ی احتراق، یک مشعل استوانه‌ای فیبر فلزی با قطر ۷۰ میلی‌متر، طول ۱۰۰ میلی‌متر و ظرفیت ۳۰ کیلووات، ساخت شرکت بکارتر، نصب شده است. استوانه‌ی این مشعل از یک صفحه سوراخ‌دار استیلی به عنوان توزیع کننده جریان و یک لایه فیبرفلزی با ضخامت ۱ میلی‌متر بافته شده از الیاف استیل ضد زنگ نسوز، تشکیل شده است. دسترسی نوری به محفظه احتراق از طریق دو پنجره‌ی کوارتز فراهم شده است. پنجره‌ی کوارتز با تحمل دما و فشار بالا، فضای داخل محفظه‌ی احتراق را از محیط آزمایشگاه مجزا می‌کند. به این ترتیب مانع انتقال حرارت جابه‌جایی از شعله به فیبر نوری و آسیب رسیدن به فیبر نوری می‌شود. همچنین بسته بودن محفظه‌ی احتراق مانع تاثیر باد بر پایداری شعله‌ی سطح سر مشعل است.

برای جبران تغییر ناشی از شرایط دما و فشار کالیبراسیون روتامترها، دبی خوانده شده در معادله ۲ تصحیح می‌شود. این معادله با فرض ایده‌آل بودن گازها نوشته شده است. P_{st} و T_{st} دما و فشار استاندارد مرجع روتامترها و P و T_{gas} دما و فشار کاری روتامترها است. دبی جریان خوانده شده از روتامتر Q_{st} و دبی تصحیح شده که از محاسبات حاصل می‌شود، Q است.

$$\frac{P_{st} Q_{st}}{T_{st}} = \frac{PQ}{T_{gas}} \quad (2)$$

برای دریافت طیف تابشی سطح مشعل و شعله از فیبر نوری و طیف سنج استفاده شده است. دیافراگم عددی^۱ فیبرنوری ۰/۲۲ و محل تنظیم آن در شکل ۲ قابل مشاهده است. زمان نوردهی طیف سنج، ۱ ثانیه و محدوده‌ی میانگین‌گیری طول موجی^۲ برابر ۳۰ تنظیم شده است. داده‌های آرالی از طیف‌سنج به شکل آنالین و هر یک ثانیه یک بار ذخیره می‌شود. مشخصات طیف‌سنج در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

قانون استفان-بولتزمن، شار تشعشی بیشینه را محاسبه و با تقسیم آن بر نرخ سوختن به راندمان تابشی مشعل رسیدند. با افزایش حدود ۵۰ درصد نرخ سوختن تنها ۱۲ درصد دمای سطح مشعل بالا می‌رود و در نتیجه بیشینه راندمان تابشی را ۲۳ درصد پایین می‌آورد. اسکندری و همکاران [۸] در سال ۱۳۹۸، شار تشعشی در مشعل شعله سطحی را با استفاده از طیف‌سنجی تابشی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش توان، شار تشعشی مشعل شعله سطحی کاهش می‌یابد. آن‌ها با بررسی شار تشعشی دریافتند که سهم سرمشعل در ایجاد انتقال حرارت تشعشی از شعله بیشتر است. جهت بررسی ارتباط دمای سطح سرمشعل با توان و نسبت هم‌ارزی از لایه‌ی شعله استفاده کردند و به کمک آن محیط مشترک شعله و سرمشعل اندازه‌گیری کردند است و در نتیجه دریافتند که، نقاطی با دمای سطح بیشینه دارای محیط مشترک شعله و سرمشعل بیشتری نیز هستند. پارامسوارام و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۴، دمای شعله را با استفاده از طیف-سنجی محاسبه و با داده‌های اندازه‌گیری شده با ترموکوپل مقایسه کردند و تطابق خوبی را مشاهده کردند. توانایی اندازه‌گیری دماهای بالا، بعنوان یکی از مزیت‌های روش اندازه‌گیری دما با استفاده از طیف‌سنجی مطرح شد. احمدی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۱، بر روی عملکرد مشعل پیش مخلوط شعله سطحی مطالعاتی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که مقدار ماکزیمم تابش گونه OH^* ، در محدوده نسبت هم‌ارزی‌های ۰/۷۷ تا ۰/۸۳ رخ می‌دهد. آن‌ها همچنین با استفاده از آنالیز تصویر پایداری شعله را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که شعله پایدار در محدوده نسبت هم‌ارزی حداکثر نورتابی شیمیایی گونه OH^* رخ می‌دهد.

مطالعه‌ی پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد، نورتابی شیمیایی به عنوان ابزاری برای ارزیابی کیفیت احتراق در مشعل‌های شعله سطحی کاربرد دارد. همچنین آزمایش‌ها روی مشعل‌های فیبر فلزی بر روی سنجش غلظت آلاینده‌ها، اندازه‌گیری بازده حرارتی مجموعه‌ی مشعل و بویلر و دماسنجی شعله، متمرکز شده‌اند. در این پژوهش، نورتابی شیمیایی گونه‌های OH^* ، H_2O^* ، C_2^* و CH^* برای مشعل متخلخل فیبرفلزی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از روش پارومتری دورنگ، دمای سطح سرمشعل محاسبه شده است. در نهایت نیز مقدار آلاینده‌های مشعل اندازه‌گیری شده است و با در کنار هم قرار دادن پارامترهای عملکردی، محدوده عملکرد مناسب این مشعل استخراج شده است.

تعریف سیستم اندازه‌گیری و روش انجام آزمایش

در شکل ۱، شماتیک سامانه‌ی آزمایش ترسیم شده است. یک کمپر سور مرکزی، هوا را با فشار به داخل خط لوله هوا می‌دمد. در خط هوا، دو فشارسنج شماره ۱ و ۲ به ترتیب قبل و بعد از تنظیم کننده فشار قرار گرفته‌اند. دمای هوا، گاز و مخلوط آنها با دماسنج‌های دو فلزی شماره ۱، ۲ و ۳ اندازه‌گیری می‌شود. در خط لوله گاز، فشارسنج‌های شماره ۳ و ۴، فشار گاز شهری را اندازه‌گیری می‌کنند. دو روتامتر گاز و هوا، دبی گاز شهری و هوا را اندازه‌گیری می‌کنند. یک مخلوط کننده از نوع ونتوری قبل از محفظه احتراق قرار دارد که سوخت و هوا را مخلوط می‌کند. محدوده‌ی اندازه‌گیری و دقت این دستگاه‌ها در جدول ۱ ثبت شده است.

² Box car

¹ Numerical aperture

جدول ۳: اطلاعات نورتابی شیمیایی گونه‌های حاصل از احتراق [۱۱]

واکنش شیمیایی	طول موج nm	گونه شیمیایی
$CH + O_2 \rightleftharpoons OH^* + CO$	314	OH^*
$H + O + M \rightleftharpoons OH^* + M$		
$OH + OH + H \rightleftharpoons OH^* + H_2O$		
$C_2H + O \rightleftharpoons CO + CH^*$	388	CH^*
$C_2H + O_2 \rightleftharpoons CO_2 + CH^*$	431	
$C_2H + H \rightleftharpoons C_2^* + H_2$	469	C_2^*
	516	
	558	
$CO + O + M \rightleftharpoons CO_2^* + M$	350-600	CO_2^*
	722	H_2O^*
	809	
	891	
	933	
	966	

برای محاسبه‌ی دمای سطح سرمشعل از روش پایرومتری دورنگ استفاده شده است. در محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی که احتراق در داخل محیط متخلخل فیبر فلزی شکل می‌گیرد یا شعله روی سطح می‌چسبد، دمای فیبر فلزی آنقدر بالا می‌رود که کاملاً سرخ و برافروخته می‌شود. برای اندازه‌گیری این دما، در هر نقطه‌ی اندازه‌گیری، مشعل را خاموش کرده و اولین طیف تابشی ثبت شده پس از خاموشی مشعل، به عنوان طیف تابشی حرارتی سطح در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی زمانی از لحظه‌ی خاموشی تا ثبت طیف، ۱ ثانیه است پس با تقریب خوبی می‌توان در نظر گرفت که سطح سرمشعل هنوز خنک نشده است.

اساس روش پایرومتری، قانون پلانک است. بر این اساس، شدت تابش حرارتی I در هر طول موج از معادله‌ی ۴ حاصل می‌شود به طوری که T, ϵ و λ به ترتیب ضریب صدور سطح سرمشعل، دمای سطح و طول موج و C_1 و C_2 ثابت‌های قانون پلانک هستند. با این فرض که ضریب صدور سطح جامد تابع ضعیفی از طول موج است، در دو طول موج نزدیک به هم λ و $\lambda + \Delta\lambda$ ، ضریب صدور ثابت فرض می‌شود و با تقسیم شدت تابش در این دو طول موج، دما از معادله‌ی ۵ حاصل می‌شود [۱۲].

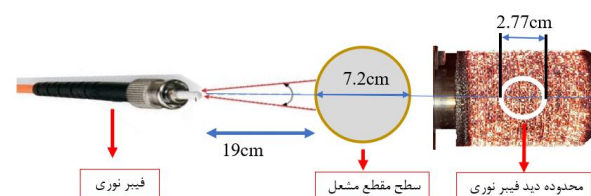
$$I(\lambda, T) = \epsilon(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)} \quad (4)$$

$$T = -C_2 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda + \Delta\lambda} \right) / \ln \left[\frac{I(\lambda, T) \lambda^5}{I(\lambda + \Delta\lambda, T) (\lambda + \Delta\lambda)^5} \right] \quad (5)$$

برای جایگذاری شدت تابش‌های ثبت شده توسط طیف سنج در معادله‌ی ۵، لازم است تا کالیبراسیون حساسیت طیفی انجام شود. برای محاسبه‌ی ضرایب تصحیح طیفی شدت تابش طیف سنج، طیف تابشی لامپ هالوژن-دوتریوم با دستگاه طیف‌سنج مرجع آزمایشگاه نانوآپتوالکترونیک و طیف سنج مورد استفاده در این پژوهش، مطابق شکل ۴ ثبت شده است. تنظیمات دو طیف سنج در حالتی قرار دارد که با توجه به میزان حساسیت دو دستگاه، کل تابش دریافتی آنها برابر باشد. به این ترتیب با تقسیم شدت تابش طیف دریافتی دستگاه مرجع به طیف‌سنج کالیبره نشده، ضرایب تصحیح حاصل می‌شود. برای محاسبات حرارتی از داده‌ها در محدوده‌ی طول موج ۶۷۵-۸۲۰ نانومتر استفاده شده است.

جدول ۲: مشخصات فنی طیف‌سنج

محدوده‌ی طول موج	200-1100 nm
حد تفکیک	1.8 nm
تعداد پیکسل	3648
اندازه‌ی پیکسل	8μm × 200μm
نسبت سیگنال به نویز	800:1
محدوده‌ی زمانی نوردی	10μs – 60s
بیشترین دمای مجاز کاری	45°C

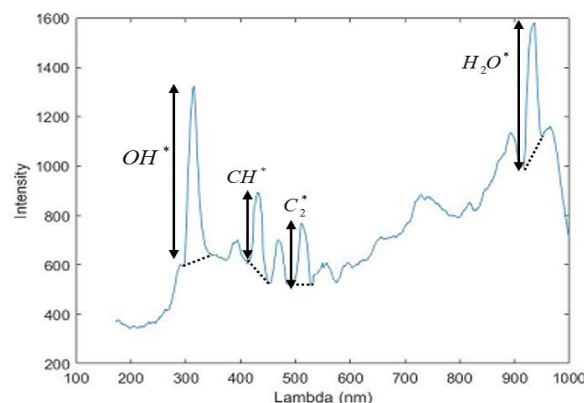


شکل ۲: مختصات فضایی ناحیه‌ی دریافت طیف شعله

قبل از ثبت طیف شعله، به مدت ۵۰ ثانیه، ۵۰ طیف متوالی از زمینه شامل نورهای محیطی، ذخیره و میانگین این ۵۰ طیف ثبت شده در هر مرحله از طیف شعله کم شده است تا طیف خالص شعله حاصل شود. طیف شعله در هر نقطه‌ی اندازه‌گیری نیز حاصل میانگین‌گیری از ۵ طیف متوالی ثبت شده است. این میانگین‌گیری‌ها با ثبت نوسانات سیگنال زمینه و طیف شعله، عدم قطعیت شدت تابش طیفی را کاهش می‌دهد. عدم قطعیت شدت تابش طیفی σ برای هر طول موج از معادله‌ی ۳ حاصل می‌شود به طوری که x شدت تابش ثبت شده، μ میانگین شدت تابش‌ها و N تعداد ثبت داده است.

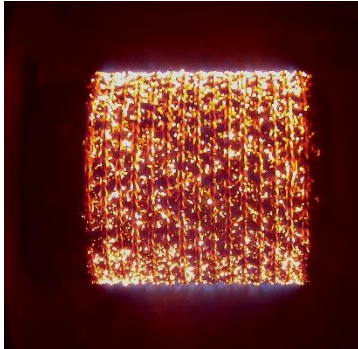
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \mu)^2}{N}} \quad (3)$$

در شکل ۳ نمونه‌ای از طیف دریافتی از شعله مشاهده می‌شود. طیف ثبت شده شامل تابش حرارتی گازهای حاصل از احتراق، سطح سرمشعل و نورتابی شیمیایی رادیکال‌های آزاد است. بیشینه‌های تابش رادیکال‌های آزاد که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، در این شکل مشخص شده است. خطوط نقطه‌چین، محل جدا سازی بیشینه‌ی تابش را از طیف پیوسته‌ی زمینه نشان می‌دهد. در جدول ۳ واکنش‌هایی که منجر به تولید رادیکال‌های آزاد برانگیخته می‌شوند و طول موج بیشینه نورتابی شیمیایی این رادیکال‌های آزاد برانگیخته فهرست شده است.

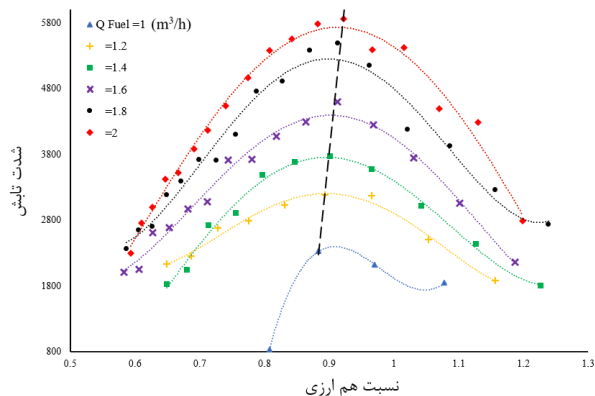


شکل ۳: نمونه‌ای از طیف دریافت شده از شعله

نشانه‌ی افزایش دمای احتراق است. با افزایش دبی سوخت، بیشینه‌ی شدت تابش به نسبت هم‌ارزی مخلوط استوکیومتری نزدیک‌تر می‌شود. دلیل آن می‌تواند بالاتر بودن نرخ احتراق در مخلوط‌های نزدیک به استوکیومتری باشد. زیرا افزایش دبی سوخت برابر با افزایش سرعت مخلوط سوخته است. در این صورت اگر نرخ احتراق به اندازه‌ای بالا نباشد که احتراق در داخل محیط متخلخل کامل شود، بخشی از ناحیه‌ی واکنشی از محیط متخلخل خارج می‌شود و نرخ آزادسازی حرارت کاهش می‌یابد.



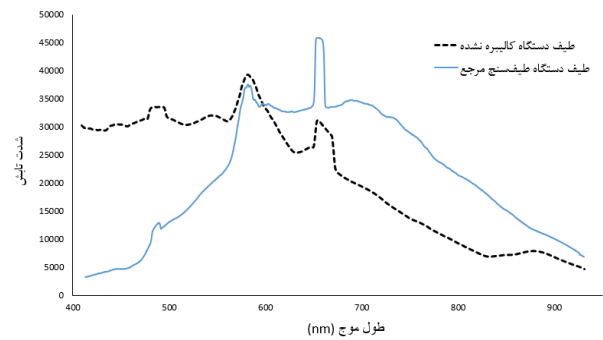
شکل ۵: حالت احتراق داخلی مشعل متخلخل فیبرفلی



شکل ۶: تغییرات نورتایی شیمیایی رادیکال OH^* با نسبت هم‌ارزی برای دبی‌های سوخت مختلف

نورتایی شیمیایی گونه‌ی H_2O^* نشانه‌ی احتراق کامل و دمای بالای شعله است [۱۴]. برای ثبت شدت تابش آن، تابش حرارتی زمینه از شدت تابش بیشینه در طول موج 933 nm کم شده است. مطابق شکل ۷، تغییرات نورتایی شیمیایی H_2O^* رفتاری شبیه به تابش OH^* دارد. بیشترین تابش H_2O^* در نسبت هم‌ارزی $0.92-0.88$ مشاهده می‌شود که نشانه‌ی احتراق کامل، پایا و دمای بالای احتراق در این محدوده نسبت هم ارزی است. با دو برابر کردن دبی سوخت، تابش این رادیکال 158% افزایش می‌یابد و بیشینه‌ی تابش به نسبت هم‌ارزی یک نزدیک می‌شود.

در شکل ۸، تغییرات نورتایی شیمیایی رادیکال CH^* با نسبت هم‌ارزی در دبی‌های مختلف سوخت مشاهده می‌شود. این نمودار نشان‌دهنده‌ی محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی بیشینه نرخ آزاد سازی حرارت نیست. بیشینه تابش رادیکال CH^* در حالت احتراقی غنی‌سوز با شعله‌های سلولی فیروزه‌ای سطحی مشاهده می‌شود [۱۵]. در این حالت، مخلوط نزدیک به نسبت هم‌ارزی استوکیومتری است و اولین مرز ناحیه‌ی واکنشی در بالادست جریان احتراقی با بیشترین تابش رادیکال CH^* روی سطح فیبر



شکل ۴: مقایسه‌ی طیف ثبت شده توسط دستگاه طیف سنج مرجع و طیف سنج کالیبره نشده

از آنالیزر گاز تستو ۳۵۰ برای اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌های CO و NO_x استفاده شده است. این آنالیزر قبلاً با یک آنالیزر مرجع کالیبره شده است. فاصله‌ی کاوشگر آنالیزر و محفظه‌ی احتراق 100 cm تنظیم شده است تا دمای کاوشگر بالاتر از 400°C نرود. سر کاوشگر به اندازه‌ی یک سوم قطر دودکش وارد آن می‌شود.

بحث بر روی نتایج

در شکل ۶، تغییرات شدت تابش رادیکالی OH^* با نسبت هم‌ارزی در دبی‌های مختلف سوخت ثبت شده است. رادیکال OH^* به واکنش‌های گرمازا مانند معادله ۶ شتاب می‌دهد بنابراین نماد آزادسازی انرژی است [۱۳]. بیشترین میزان آزادسازی انرژی در محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی 0.88 تا 0.92 م مشاهده می‌شود. در این نسبت‌های هم‌ارزی، مشعل فیبر فلی در حالت احتراق داخلی^۱ (شکل ۵) قرار دارد و مخلوط سوخت و هوا داخل محیط متخلخل فیبر فلی می‌سوزد. در این حالت، به دلیل رسانایی حرارتی بالای لایه‌ی فیبر فلی و صفحه‌ی توزیع‌کننده‌ی جریان، بخشی از گرمای احتراق به بالادست جریان منتقل می‌شود و مخلوط سوخت و هوا به خوبی پیش‌گرم می‌شود. این پیش‌گرمایش، دلیل عملکرد مناسب مشعل در نسبت‌های هم‌ارزی رقیق‌سوز است. به این ترتیب هوای اضافی که باعث احتراق کامل سوخت است، گرمای احتراق را از دسترس خارج نمی‌کند. مشعل فیبر فلی در حالت احتراق داخلی دارای بیشترین سهم انتقال حرارت تشعشعی است. احتراق در محیط متخلخل، طول شعله را کمتر می‌کند بنابراین حجم دیگ چگالشی کاهش می‌یابد و نگرانی برخورد شعله با لوله‌های آب، خاموشی شعله^۲ و افزایش غلظت آلاینده CO وجود ندارد.



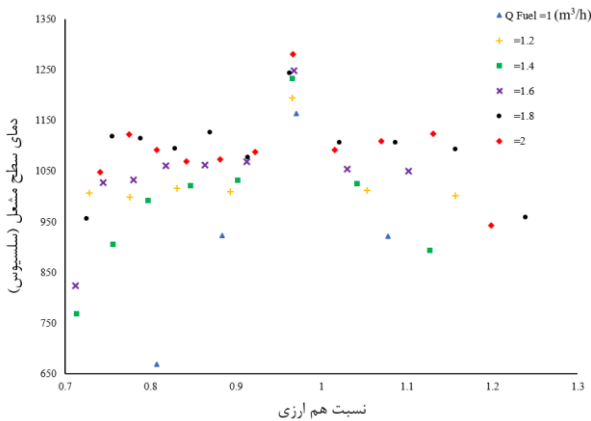
در نسبت‌های هم‌ارزی پایین، کاهش غلظت سوخت در مخلوط، احتمال برخورد مناسب مولکول‌های سوخت و هوا را کاهش می‌دهد. همچنین هوای اضافی دمای شعله را پایین می‌آورد. در نتیجه‌ی کاهش نرخ احتراق، طول شعله افزایش و غلظت رادیکال‌های آزاد و نرخ آزاد سازی حرارت کاهش می‌یابد. در نهایت، افزایش طول شعله باعث برخورد شعله با دیواره‌ها، خاموشی شعله، برخاستگی شعله و احتراق ناپایدار است. در نسبت‌های هم‌ارزی بالا، کمبود اکسیژن باعث احتراق ناقص و پایین بودن نرخ آزادسازی حرارت است.

نورتایی شیمیایی رادیکال OH^* و در نتیجه نرخ آزاد سازی حرارت با افزایش دبی سوخت، افزایش می‌یابد به طوری که با دو برابر کردن دبی سوخت، شدت تابش این رادیکال 152% افزایش داشته است. این افزایش

² flame quenching

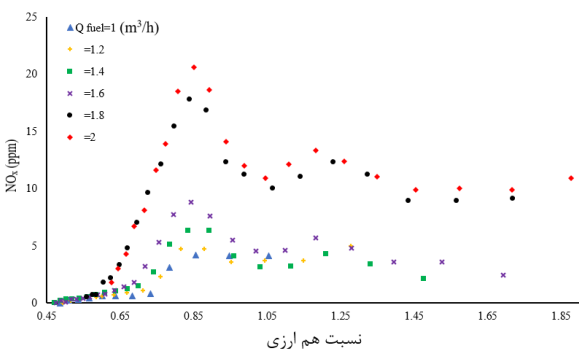
¹ Submerged combustion

محدوده‌ای از نسبت هم‌ارزی که لبه‌ی واکنشی شعله در داخل محیط متخلخل یا چسبیده به سطح آن است، علت بالا بودن بازده تشعشعی مشعل فیبر فلزی است. ضریب صدور جامد همواره از گاز بالاتر است بنابراین انتقال حرارت حاصل از احتراق به جامد متخلخل، راندمان تشعشعی را بالا می‌برد.



شکل ۱۰: تغییرات دمای سطح سرمشعل با نسبت هم‌ارزی در دبی‌های سوخت مختلف

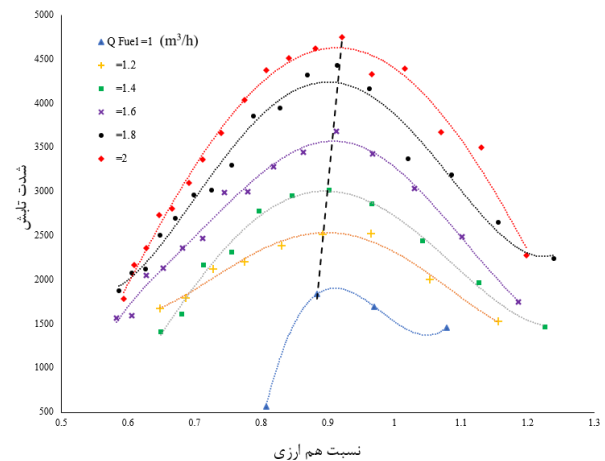
در شکل ۱۱، نتایج اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ی NO_x در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف و دبی‌های مختلف سوخت ثبت شده است. برای تشکیل مولکول‌های این آلاینده، لازم است تا دمای احتراق به اندازه‌ای بالا باشد تا مولکول‌های N_2 تجزیه شود و مقدار کافی اکسیژن برای پیوند با اتم نیتروژن موجود باشد. بنابراین در نسبت‌های هم‌ارزی پایین، دمای پایین احتراق و در نسبت‌های هم‌ارزی بالا، کمبود اکسیژن، غلظت آلاینده‌ی NO_x را کاهش می‌دهد. بیشترین میزان غلظت این آلاینده در محدوده نسبت‌هم‌ارزی ۰/۸۱ تا ۰/۸۵ با مقدار کمتر از ۲۰/۶ ppm ثبت شده است که مربوط به حالت احتراق داخلی مشعل با دمای بالای احتراق است.



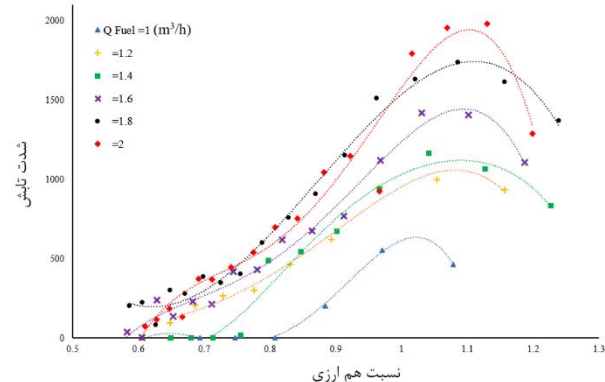
شکل ۱۱: تغییرات غلظت آلاینده NO_x با نسبت هم‌ارزی در دبی‌های مختلف سوخت

در شکل ۱۲، تغییرات غلظت آلاینده‌ی CO با نسبت هم‌ارزی برای دبی‌های مختلف سوخت ثبت شده است. با افزایش نسبت هم‌ارزی، به دلیل کمبود اکسیژن و احتراق ناقص، غلظت این آلاینده افزایش می‌یابد. در نسبت‌های هم‌ارزی پایین، برخاستگی شعله باعث فرار اتم‌های کربن، احتراق ناقص و افزایش غلظت CO می‌شود. در نتیجه در هر دبی سوخت، کمترین غلظت آلاینده‌ی CO نشانه‌ی احتراق کامل است. در محفظه‌ی احتراق استفاده شده در این پژوهش، فضای کافی برای شعله وجود دارد بنابراین غلظت آلاینده CO برای هر دو حالت احتراق داخل محیط متخلخل و شعله‌ی

فلزی قرار دارد. در حالت احتراق داخلی مشعل، این مرز داخل فیبر فلزی قرار دارد.

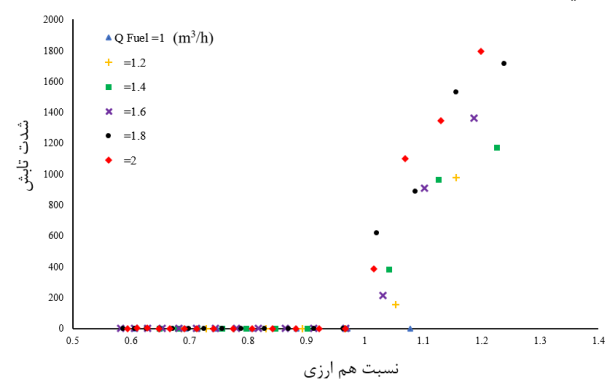


شکل ۷: تغییرات نورتایی شیمیایی H_2O^* با نسبت هم‌ارزی در دبی‌های سوخت مختلف



شکل ۸: تغییرات نورتایی شیمیایی CH^* با نسبت هم‌ارزی در دبی‌های سوخت مختلف

در شکل ۹، نورتایی شیمیایی رادیکال C_2^* ثبت شده است. بیشینه تابش این رادیکال تنها در محدوده‌ی غنی سوز مشاهده می‌شود. تابش رادیکال C_2^* پیش‌زمینه‌ی تولید دوده و نشانه‌ی احتراق ناقص به دلیل کمبود اکسیدکننده است.



شکل ۹: تغییرات نورتایی شیمیایی C_2^* با نسبت هم‌ارزی در دبی‌های سوخت مختلف

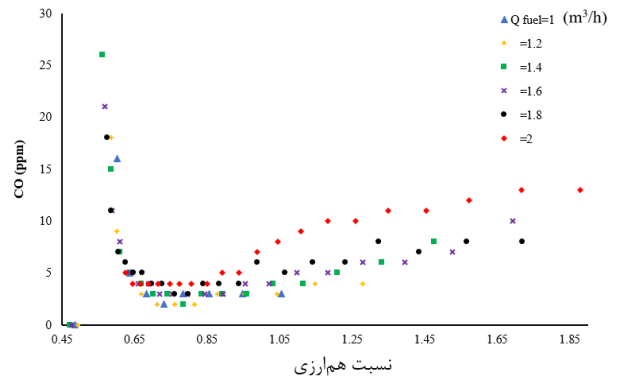
در شکل ۱۰، دمای سطح فیبر فلزی که به روش پایرومتری دورنگ محاسبه شده است، گزارش می‌شود. بیشترین دمای فیبر فلزی در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۶ مشاهده می‌شود. بالا بودن دمای سطح سرمشعل در

T_{gas}	دمای کاری روتامتر، K
T_{st}	دمای استاندارد مرجع روتامتر، K
x	شدت تابش
	فهرست علائم یونانی
ε	ضریب صدور تابشی
λ	طول موج، μm
μ	میانگین شدت تابش

مراجع

- 1- L. C. Haber, U. Vandsburger, W. R. Saunders, and V. K. Khanna, "An examination of the relationship between chemiluminescent light emissions and heat release rate under non-adiabatic conditions," Proc. ASME Turbo Expo, vol. 2, pp. 1-8, 2000.
- 2- S. A. Leonardi, R. Viskanta, and J. P. Gore, "Radiation and thermal performance measurements of a metal fiber burner," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., vol. 73, no. 2-5, pp. 491-501, 2002.
- 3- B. Yu, S. M. Kum, C. E. Lee, and S. Lee, "Combustion characteristics and thermal efficiency for premixed porous-media types of burners," Energy, vol. 53, pp. 343-350, 2013.
- 4- H. Soltanian, M. Z. Targhi, and H. Pasharshahri, "Chemiluminescence usage in finding optimum operating range of multi-hole burners," Energy, vol. 180, pp. 398-404, 2019.
- 5- Y. Hu, J. Tan, L. Lv, and X. Li, "Investigations on quantitative measurement of heat release rate using chemiluminescence in premixed methane-air flames," Acta Astronaut., vol. 164, no. August, pp. 277-286, 2019.
- 6- F. Liu, L. Zheng, and R. Zhang, "Emissions and thermal efficiency for premixed burners in a condensing gas boiler," Energy, vol. 202, no. x, p. 117449, 2020.
- 7- م. فتحي دهکردی، م. دوازده امامی، "بررسی تجربی و شبیه سازی عددی احتراق مشعل متخلخل و عملکرد مشعل متخلخل با مشخصه های محیط متخلخل مختلف." صنعتی اصفهان، ۱۳۹۸.
- 8- ف. اسکندری، م. ضابطیان طرقي، ه. پاسدار شهري، "بررسی آزمایشگاهی پارامتر شار تشعشعی در مشعل شعله سطحی با استفاده از طیفسنجی تابشی." مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۱۴ و ۱۵ اسفند ۱۳۹۸، ایران، تبریز، دانشگاه تبریز.
- 9- T. Parameswaran, R. Hughes, P. Gogolek, and P. Hughes, "Gasification temperature measurement with flame emission spectroscopy," Fuel, vol. 134, no. June, pp. 579-587, 2014.
- 10- Z. Ahmadi and M. Zabetian Targhi, "Thermal performance investigation of a premixed surface flame burner used in the domestic heating boilers," Energy, vol. 236, no. x, p. 121481, 2021.
- 11- R. F. BARROW, The spectroscopy of flames., vol. 6, no. 22. 1947.
- 12- W. Yan, H. Zhou, Z. Jiang, C. Lou, X. Zhang, and D. Chen, "Experiments on measurement of temperature and emissivity of municipal solid waste (MSW) combustion by spectral analysis and image processing in visible spectrum," Energy and Fuels, vol. 27, no. 11, pp. 6754-6762, 2013.
- 13- T. Moriyama, W. Kimura, H. Asai, and K. Yamamoto, "OH chemiluminescence of methane-hydrogen premixed flames," J. Therm. Sci. Technol., vol. 16, no. 3, pp. 1-15, 2021.
- 14- Z. Gut, "Correlation of measurements OH *, CH *, C2 * and H2O with changing signal of Electrical Capacitance Tomography system in the reaction zone of methane / air premixed flames," vol. 100, no. 3, pp. 179-187, 2020.

آبی رنگ سطحی، پایین است و تنها با شروع برخاستگی شعله، افزایش آن مشاهده می شود اما انتظار می رود با قرارگیری لوله های آب در اطراف مشعل و برخورد شعله ی سطحی با آنها، خاموشی شعله غلظت آلاینده CO را بالا ببرد بنابراین از نظر پایین بودن غلظت آلاینده CO، حالت احتراق داخلی مشعل با کمترین احتمال خاموشی شعله و بیشترین احتمال احتراق کامل پیشنهاد می شود.



شکل ۱۲: تغییرات غلظت CO با نسبت هم ارزی در دی های مختلف سوخت

نتیجه گیری

در این پژوهش، نورتابی شیمیایی رادیکال های آزاد برانگیخته به عنوان ابزاری برای تشخیص کیفیت احتراق از نظر بالا بودن نرخ آزاد سازی حرارت و پایداری شعله در مشعل فیبر فلزی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- با انجام طیفسنجی تابشی شعله و استخراج نورتابی شیمیایی گونه های OH^* و H_2O^* ، محدوده نسبت هم ارزی مناسب عملکرد مشعل از نظر آزادسازی حرارت استخراج شده است که این محدوده، بازه ی ۰/۸۸ تا ۰/۹۲ را شامل می شود.
- در محدوده ی مناسب نسبت هم ارزی، مشعل در حالت احتراق داخلی قرار دارد. در این حالت احتراقی دمای سطح سرمشعل بالاست که این نشان دهنده بازه بالای تشعشعی مشعل است.
- دمای سطح سرمشعل به روش پایرومتری دورنگ و با استفاده از طیف تابش حرارتی سطح، محاسبه شده است. دمای سطح در نسبت هم ارزی ۰/۹۶ به مقدار بیشینه می رسد.
- در محدوده نسبت هم ارزی مناسب کارکرد، مقدار آلاینده NO_x بیشینه مقدار خود که در حدود ۲۰ ppm است را دارد و آلاینده CO نیز در این محدوده به کمترین میزان خود که در حدود ۴ ppm است میرسد.

فهرست علائم

$C_1 = 3.742 \times 10^8$	ثابت قانون پلانک، $\frac{W \cdot \mu m^4}{m^2}$
$C_2 = 1.439 \times 10^4$	ثابت قانون پلانک، $\mu m \cdot K$
I	شدت تابش طیفی، $\frac{W}{(\mu m) m^2}$
P	فشار کاری روتامتر، Pa
P_{st}	فشار استاندارد مرجع روتامتر، Pa
Q	دبی تصحیح شده، m^3/h
Q_{st}	دبی جریان خوانده شده از روتامتر، m^3/h
T	دمای سطح سرمشعل، K