

بررسی تجربی فرایند برگشت شعله در محیط متخلخل دولایه‌ای

محسن دوازده‌امامی*، حسین عطوف** و محمدرضا رضایی‌بخش***

دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

(دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۲۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۴/۵، پذیرش: ۹۱/۷/۹)

در این مقاله، فرایند برگشت شعله و استقرار آن در داخل محیط متخلخل سرامیکی دولایه‌ای از جنس SiC به صورت تجربی بررسی شده است. با توجه به اهمیت استقرار شعله بر روی سطح این مشعل‌ها برای ایجاد حداکثر بازده، عوامل موثر بر پدیده برگشت شعله به زیر سطح همچون نرخ آتش و میزان چگالی حفره و نیز نحوه برگشت شعله، از طریق اندازه‌گیری دما در طول محیط متخلخل، مورد مطالعه قرار گرفته است. مخلوط ورودی شامل گاز طبیعی و هوا به صورت ترکیبی با نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ بوده و به صورت کاملاً پیش‌مخلوط وارد مشعل می‌شود. برای بررسی چگونگی برگشت شعله، نحوه پیش‌گرمایش و بهبود سرعت شعله از طریق رصد بیشینه دما در داخل بستر متخلخل بررسی و توضیح داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ آتش در یک چگالی حفره ثابت، میزان پیش‌گرمایش لازم برای برگشت شعله افزایش و زمان برگشت شعله کاهش می‌یابد. با افزایش چگالی حفره، زمان برگشت شعله و پیش‌گرمایش لازم برای برگشت شعله کاهش می‌یابد.

کلیدواژه: محیط متخلخل، سیلیکون کربید، برگشت شعله، مطالعه آزمایشگاهی

مقدمه

کیفیت فرایند احتراق و بازده آن و کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق در سال‌های اخیر توجه محققان را به خود معطوف داشته است. در این رابطه تمرکز اصلی بر طراحی مشعل قرار داده شده است. از جمله انتخاب‌های مناسب برای بهبود کیفیت احتراق مشعل‌های متخلخل هستند. توجه ویژه به مشعل‌های متخلخل به دلیل مزیت‌هایی از قبیل بازده تابشی بالا، کم‌بودن آلودگی ناشی از NOx، سرعت شعله بالا، کاهش حجم مشعل، افزایش محدوده شعله‌وری، توزیع یکنواخت حرارت و کاهش سروصدا، تولید آلاینده کم، کارایی در نسبت هم‌ارزی‌های پایین و داشتن سرعت شعله‌ای بیش از شعله آرام است [۱-۷]. نکته کلیدی در استفاده از مزایای این نوع مشعل‌ها روش و چگونگی ایجاد پایداری شعله در داخل محیط متخلخل است. کوتانی و تاکانو [۸] از دسته‌ای از لوله‌های آلومینایی به عنوان محیط متخلخل استفاده کردند که یک مبدل حرارتی در اطراف محفظه احتراق آن به کار رفته است. آن‌ها احتراق پایدار را تا نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۲ نیز مشاهده کردند و سرعت شعله را ۲۰ برابر شعله آزاد به دست آوردند. ایتایا و همکاران [۹] احتراق سطحی را برای مخلوط هوا-متان در حالت پیش‌آمیخته در یک صفحه سرامیکی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند هرگاه سرعت مخلوط کمتر از سرعت شعله آرام باشد، به واسطه واکنش بین گاز و جامد نرخ آتش کاهش می‌یابد و شعله‌ای پایدار بر روی سطح ایجاد می‌شود. در این حالت سرعت شعله و سرعت گاز برابر می‌شود. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که در یک نسبت هم‌ارزی مشخص که در آن نسبت سرعت سوزش مخلوط گازی به سرعت گاز حداقل است، بیشترین دمای سطح به دست می‌آید. میتال و همکاران [۱۰] مطالعه‌ای تجربی در مورد احتراق مدفون

* استادیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: mohsen@cc.iut.ac.ir)

** دانشجوی دکترا (ایمیل: h.atooof@me.iut.ac.ir)

*** دانشجوی کارشناسی ارشد (ایمیل: m.rezaeibakhsh@me.iut.ac.ir)

داخل محیط متخلخل از جنس سیلیکون کرباید و کوردريت انجام دادند. آن‌ها در آزمایش‌های خود مشاهده کردند که پرش شعله بین نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۶ تا ۰/۷ اتفاق می‌افتد. همچنین، نتایج آن‌ها نشان داد که سرعت شعله در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ در نرخ آتش‌های متفاوت بسیار کمتر از سرعت شعله آدیباتیک در این نسبت هم‌ارزی است. برنر و همکاران [۱۱] یک بررسی عددی و آزمایشگاهی بر روی شعله پایدار در داخل محیط متخلخل دولایه‌ای به شکل مستطیل از جنس سیلیکون کربید (SiC) و آلومینا (Al₂O₃) انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با کاهش نسبت هم‌ارزی رقیق، هم دمای گاز و هم دمای جامد کاهش می‌یابد و شعله بین دو لایه و در فصل مشترک پایدار می‌شود. ماتیس و الزی [۱۲] پایداری شعله، بازه کارکرد و میزان آلاینده‌ها را در مشعل متخلخل دوقسمتی از دو جنس YZA و ZTM^۲ با سوخت هوا و گاز پیش‌آمیخته به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این مشعل، سرامیک بالادست دارای چگالی حفره ۲۴ ppc و سرامیک پایین دست دارای چگالی حفره ۴ ppc است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سطح مشترک بین دو سرامیک در نوع YZA در نگهداری شعله در این منطقه بسیار مؤثر است، ولی در نوع ZTM، شعله به سرامیک بالادست نفوذ می‌کند. وگل و الزی [۱۳] پایداری شعله را در حالت زیرآدیباتیک^۳ و فوق‌آدیباتیک^۴ (هنگامی که سرعت شعله کمتر و بیشتر از سرعت شعله آرام باشد) در یک مشعل متخلخل دوقسمتی فلزی از جنس آلیاژ کروم-آهن (FeCrALY) بررسی کردند. آن‌ها در نسبت هم‌ارزی ۰/۷ هر دو نوع احتراق را مشاهده کردند. در هر دو نوع، شعله در نزدیکی و یا بر روی فصل مشترک دو محیط تشکیل شده است. در نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر از ۰/۷ تنها عملکرد زیرآدیباتیک مشاهده می‌شود. هاشمی و عطوف [۱۴] مطالعه‌ای تجربی بر روی اثر ضخامت و تخلخل را بر روی متغیرهای تابشی مشعل متخلخل با محیط‌های متخلخل فلزی ترکیبی بررسی کردند. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که شعله در قسمت زیرین محیط متخلخل پایدار شده است. به همین جهت، با افزایش ضخامت محیط متخلخل، فاصله ناحیه شعله از سطح افزایش می‌یابد و موجب کاهش دمای سطح می‌شود. وی و همکاران در مطالعه‌ای دیگر [۱۵] رصد شعله گذرا را در داخل محیط متخلخل تک‌لایه‌ای از جنس کربید سیلیسیم انجام دادند. در مطالعه آن‌ها، بر اساس موقعیت شعله، چهار رژیم شعله سطحی، مدفون، زیرسطحی و برخاسته مشاهده شد. در این تحقیق آن‌ها توانستند توزیع‌های^۵ دمایی را در راستای محوری به دست آورند. همچنین دما و زمان برگشت شعله را در حالات مختلف بررسی کردند. آن‌ها روند تغییرات این دو مقدار با تغییرات نرخ آتش را نوسانی مشاهده کردند. حسین‌پور و معلمی [۱۶] نیز، در مطالعه خود، تاثیر ضریب انتقال حرارت هدایتی در ماده متخلخل را در یک مشعل دولایه‌ای بر روی انتشار آلاینده‌ها به صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش ضریب انتقال حرارت هدایت در سرامیک پایین دست شعله دمای گاز و نیز دمای ماتریس جامد کاهش یافته و انتشار آلاینده‌ها به تبع آن کاهش می‌یابد. اخیراً نیز روش جدیدی برای پایداری شعله در محیط متخلخل در دما و فشار بالا ارائه شده است [۱۷]. در این مطالعه تجربی از محیط متخلخل با سطح مقطع متغیر از جنس آلومینای لایه‌ای استفاده شده است. در این روش، در هر مقطع سرعت جریان تغییر می‌کند و در نتیجه برگشت شعله‌ای مشاهده نمی‌شود.

ویژگی‌های احتراق گذرا برای احتراق پیش‌مخلوط سوخت‌های گازی و مایع در محیط متخلخل توسط وو و همکاران [18] به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. آن‌ها تاثیر نسبت هم‌ارزی و سرعت ورودی را بر روی این نوع احتراق بررسی کردند. آن‌ها همچنین سرعت حرکت موج احتراقی را در محیط متخلخل گوی‌های آلومینایی را در حدود ۰/۱ mm/s اندازه‌گیری کردند، اما در این مطالعه پدیده برگشت شعله به عنوان یک پدیده گذرا بررسی نشده است.

مدفون شدن شعله و یا استقرار شعله در زیر محیط متخلخل بازده مشعل را به شدت کاهش می‌دهد، زیرا سازوکار عمده در این مشعل‌ها تابش است و در صورتی می‌توان بهترین بهره را از تابش برد که شعله درست روی لبه بالایی محیط متخلخل

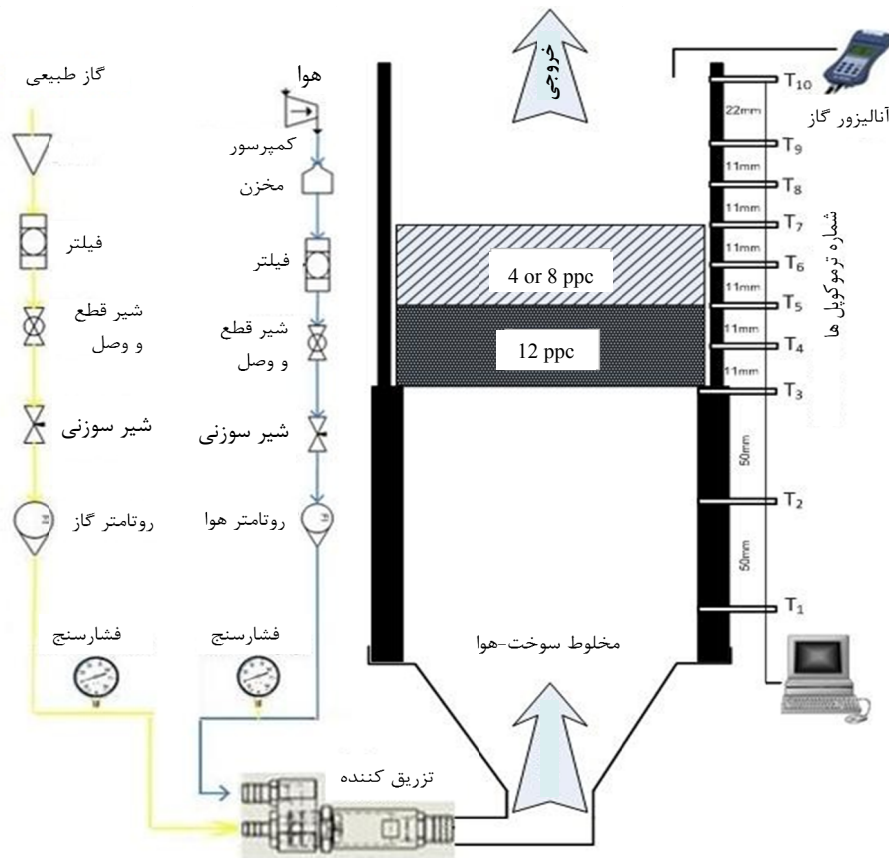
1. Ytria-stabilized Zirconia/Alumina composite
2. Zirconia-Toughened Mullite
3. Sub-adiabatic
4. Super-adiabatic
5. Profile

مستقر شود. بدین منظور، در این تحقیق، ویژگی برگشت شعله (بدون خاموشی) در یک مشعل دولایه‌ای ۵ kW بررسی می‌شود. محیط‌های متخلخل مورد استفاده در این آزمایش‌ها SiC است. تأثیر متغیرهایی نظیر چگالی حفره و نرخ آتش در مخلوط رقیق بر روی نحوه بازگردش حرارت در ناحیه پیش‌گرمایش و تأثیر آن بر سرعت شعله بررسی شده است.

معرفی دستگاه آزمایش

شکل ۱ نمای کلی از دستگاه آزمایش را با کلیه وسایل اندازه‌گیری و اجزای مشعل نشان می‌دهد. هوا از یک سو و گاز شهری از سوی دیگر بعد از عبور از وسایل اندازه‌گیری و کنترلرها وارد مخلوط‌کننده سوخت و هوا شده و پس از اختلاط، با نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ آماده ورود به مشعل می‌شود. مخلوط سوخت و هوا، با عبور از صفحه سوراخ‌دار زیرکونیایی^۱ ابتدای مشعل، وارد پخش‌کننده شده و سپس جهت ایجاد توزیع یکنواختی از سرعت، طول ناحیه مستقیم‌کننده^۲ را طی می‌کند. کنترلرهای دما و فشار نیز در مکان‌های مورد نیاز قرار داده شده‌اند.

آزمایش‌ها بر روی سرامیک‌هایی با ضخامت ۲۲ mm انجام می‌گیرد، که دارای چگالی حفره ۴، ۸ و ۱۲ حفره بر سانتی‌مترند. این سرامیک‌ها، که از جنس سیلیکون کرباید (SiC) هستند، در حال حاضر در صنعت ریخته‌گری استفاده می‌شوند.



شکل ۱- نمای کلی از ساختمان دستگاه آزمایش

1. Zirconia
2. Straightener

اطراف دیواره مشعل با عایق‌های حرارتی مقاوم در برابر حرارت بالا پوشانده شده تا نتایج تا حد امکان از تأثیرات حرارتی دیواره میرا باشد. در این دستگاه ۹ عدد ترموکوپل نوع K در دیواره سرامیکی مشعل قرار گرفته است که ۵ عدد از آن‌ها با سرامیک‌ها تماس دارند. این تماس به نحوی است که نوک ترموکوپل با سطح خارجی محیط متخلخل تماس شده است. ۴ ترموکوپل دیگر برای رصد شعله در خارج از محیط‌ها به کار رفته است. دمای ترموکوپل‌ها توسط دستگاهی ضبط می‌شود که دقتی معادل ثبت ۱۰ دما در هر ثانیه برای هر ترموکوپل را دارد و زمان تاخیر ترموکوپل‌ها، مطابق آنچه در بخش صحت‌سنجی نتایج خواهد آمد، ۳/۲ ثانیه است.

برای اندازه‌گیری دبی گاز و هوا از روتامتر استفاده شده است. روتامتر گاز دارای بازه کارکردی جریان بین ۰ تا ۱۰ لیتر بر دقیقه و فشار تفاضلی عملکرد در شرایط دمایی عادی محیط، ۱۶ میلی‌لیتر آب معادل فشار شبکه گاز طبیعی بعد از رگلاتور است. روتامتر هوا بازه کارکردی دبی بین ۰/۵ تا ۷ مترمکعب بر ساعت دارد و فشار تفاضلی عملکرد آن در شرایط دمایی عادی محیط برابر یک بار است.

فرایند انجام آزمایش‌ها

روند انجام آزمایش‌ها به این صورت است که بعد از قراردادن محیط‌های متخلخل مناسب با هر حالت از تخلخل و تنظیم شرایط کارکرد مشعل و دمای اولیه بدنه، جرقه زده شده و ثبت‌کننده داده‌ها^۱ روشن می‌شود (آزمایش‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که دمای اولیه کلیه ترموکوپل‌های به کار رفته در دستگاه تقریباً به دمای ۳۵°C رسیده و در این دما ثابت شوند). پس از ایجاد چنین شرایطی، دبی هوا و گاز بر روی مقادیر مورد نظر تنظیم شده و برنامه رایانه‌ای ثبت دما اجرا می‌شود. سپس جرقه زده شده و فرایند احتراق آغاز می‌شود. موقعیت اولیه شعله پس از زدن جرقه، بستگی به سرعت موثر جریان (که برابر حاصل تقسیم سرعت مخلوط ورودی به مشعل بخش بر تخلخل است) دارد. در این مشعل سه شعله می‌تواند در سه ناحیه مستقر شود. این نواحی شامل محیط‌های متخلخل ۴ ppc و ۸ ppc و نیز ناحیه پس از محیط‌های متخلخل در پایین دست سرامیک‌ها (یعنی در بالای سرامیک‌ها) است. پس، با توجه به سرعت مخلوط ورودی و نسبت هم‌آزری، شعله در این سه موقعیت تشکیل خواهد شد.

پس از اینکه شعله به زیر محیط ۱۲ ppc برگشت کرد، با مخلوط سرد ورودی مواجه می‌شود. با ورود مخلوط سرد به ناحیه احتراق، سرعت شعله کاهش می‌یابد. به دلیل عدم وجود شرایط مساعد برای پایداری شعله (دمای بالا و تطابق سرعت شعله و سرعت جریان) در این ناحیه، شعله دوباره به زیر سرامیک بر می‌گردد و در همانجا مستقر می‌ماند. پس از برگشت شعله (استقرار موقت شعله) به زیر سطح سرامیک ثبت داده‌ها قطع شده و شیرهای گاز و هوا بسته می‌شود و بعد از آن، دستگاه وارد حالت خنک‌کاری می‌شود تا برای آزمایش بعد آماده شود. شایان ذکر است زمانی که این پدیده اتفاق می‌افتد، دمای ترموکوپلی که در قسمت لوله مستقیم‌کننده قرار می‌گیرد ناگهان افزایش می‌یابد.

مدت زمان طی شده از زمان ایجاد جرقه تا استقرار شعله در زیر سطح سرامیک زمان برگشت شعله به حالت زیر سطح نامیده می‌شود. دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپلی که در لبه پایینی سرامیک‌ها قرار دارد، قبل از وقوع این پدیده، دمای برگشت شعله به حالت زیر سطح نامیده می‌شود. این دو مقدار از این نظر دارای اهمیت‌اند که قابلیت سرامیک متخلخل از جنس SiC را در نگه‌داشتن شعله و پایدار کردن و جلوگیری از پدید آمدن پدیده برگشت شعله نشان می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که برگشت شعله در محیط متخلخل، برعکس شعله‌های آزاد، منجر به خاموشی نمی‌شود.

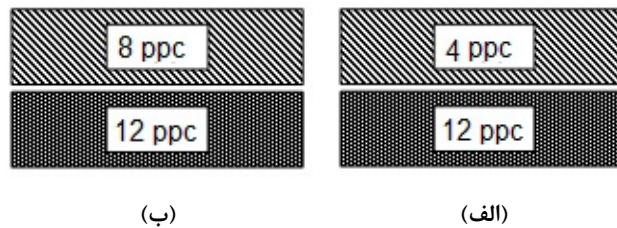
در این تحقیق، تأثیر چگالی حفره بر دما و زمان برگشت شعله بررسی شده است. شایان ذکر است که رفتار و خصوصیات شعله و محیط‌های متخلخل پس از برگشت شعله مورد توجه نبوده و صرفاً پدیده برگشت شعله بررسی شده است.

1. Data logger

تعداد و نوع متغیرهای آزمایش این قسمت در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۲ حالت‌های چیدمان محیط‌های متخلخل را درون مشعل برای دوچگالی حفره مورد آزمایش نشان می‌دهد. به دلیل برگشت سریع شعله در داخل سرامیک‌های تک‌لایه‌ای [۱۲] از یک سرامیک با چگالی حفره ۱۲ ppc استفاده شده است تا تاثیر پیش‌گرمایش بر مخلوط گازی بیشتر معلوم شود.

جدول ۱- برنامه انجام آزمایش‌ها

شماره آزمایش	نرخ آتش (kW/m ²)	ضخامت محیط متخلخل	نسبت هم‌ارزی	چگالی حفره
۱	۲۱۶	۴۴ mm	۰/۶۵	۴ ppc
۲	۳۲۸			
۳	۴۳۱			
۴	۵۳۹			
۵	۶۴۷			
۶	۷۵۴			
۷	۲۱۶	۴۴ mm	۰/۶۵	۸ ppc
۸	۳۲۸			
۹	۴۳۱			
۱۰	۵۳۹			
۱۱	۶۴۷			
۱۲	۷۵۴			



شکل ۲- دو چیدمان استفاده‌شده محیط‌های متخلخل SiC در آزمایش‌ها

نتایج

متغیرهایی که در این مجموعه آزمون‌ها تغییر می‌کنند دبی گاز طبیعی (تغییر نرخ آتش)، دبی هوای ورودی (به منظور ثابت نگه‌داشتن نسبت هم‌ارزی) و چگالی حفره بستر متخلخل سرامیکی‌اند که برای پایداری شعله مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج مربوط به این آزمایش‌ها بر حسب نرخ آتش و تخلخل ارائه می‌شوند.

نسبت هم‌ارزی در احتراق سوخت عبارت است از نسبت سوخت به هوا بر پایه جرمی (مولی) در حالت واقعی به نسبت سوخت به هوای استوکیومتریک که به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

$$\varphi = \frac{FAR}{FAR_{STO}} \quad (1)$$

در این مطالعه اثر یک مخلوط رقیق با نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ بر روی پدیده برگشت شعله مورد بررسی قرار گرفته است.

نرخ آتش بیانگر میزان انرژی شیمیایی سوخت بر واحد سطح بوده و از رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

$$FR = \frac{LHV \times \dot{V}_f}{A} \quad (2)$$

که در آن LHV ارزش حرارتی گاز طبیعی برحسب kJ/m^3 ، دبی حجمی گاز (\dot{V}_f) بر حسب m^3/sec و A سطح مقطع مشعل بر حسب m^2 بوده و برابر $0/064$ است. بر اساس اطلاعات دریافتی از نیروگاه اصفهان، چگالی گاز طبیعی $0/822$ کیلوگرم بر مترمکعب و ارزش حرارتی خالص آن 9803 کیلوکالری بر مترمکعب بوده و 89 درصد آن را متان تشکیل می‌دهد. برای بحث روی نتایج، به این نکته توجه شود که اگر از ادبیات متعارف برای اشاره به چگالی حفره استفاده شود (ppc)، محیط متخلخل با شماره شناسه بزرگ‌تر تعداد حفره در واحد سطح بیشتر دارد، ولی تخلخل آن کمتر است؛ لذا محیط متخلخل با شناسه بزرگ‌تر، تخلخل (نسبت خالی) کمتری خواهد داشت.

در هر دو چیدمان جدول ۱، محیط 12 ppc به عنوان محیطی برای پیش‌گرمایش به‌کار رفته است و محیط‌های 8 و 4 حفره در سانتی‌متر به عنوان محیط تشکیل شعله استفاده شده‌اند. البته در فرایند برگشت شعله، ممکن است شعله در مکان‌های مختلف از جمله در سطح مشترک محیط 12 ppc با هر کدام از محیط‌های 8 ppc و 4 ppc قرار گیرد.

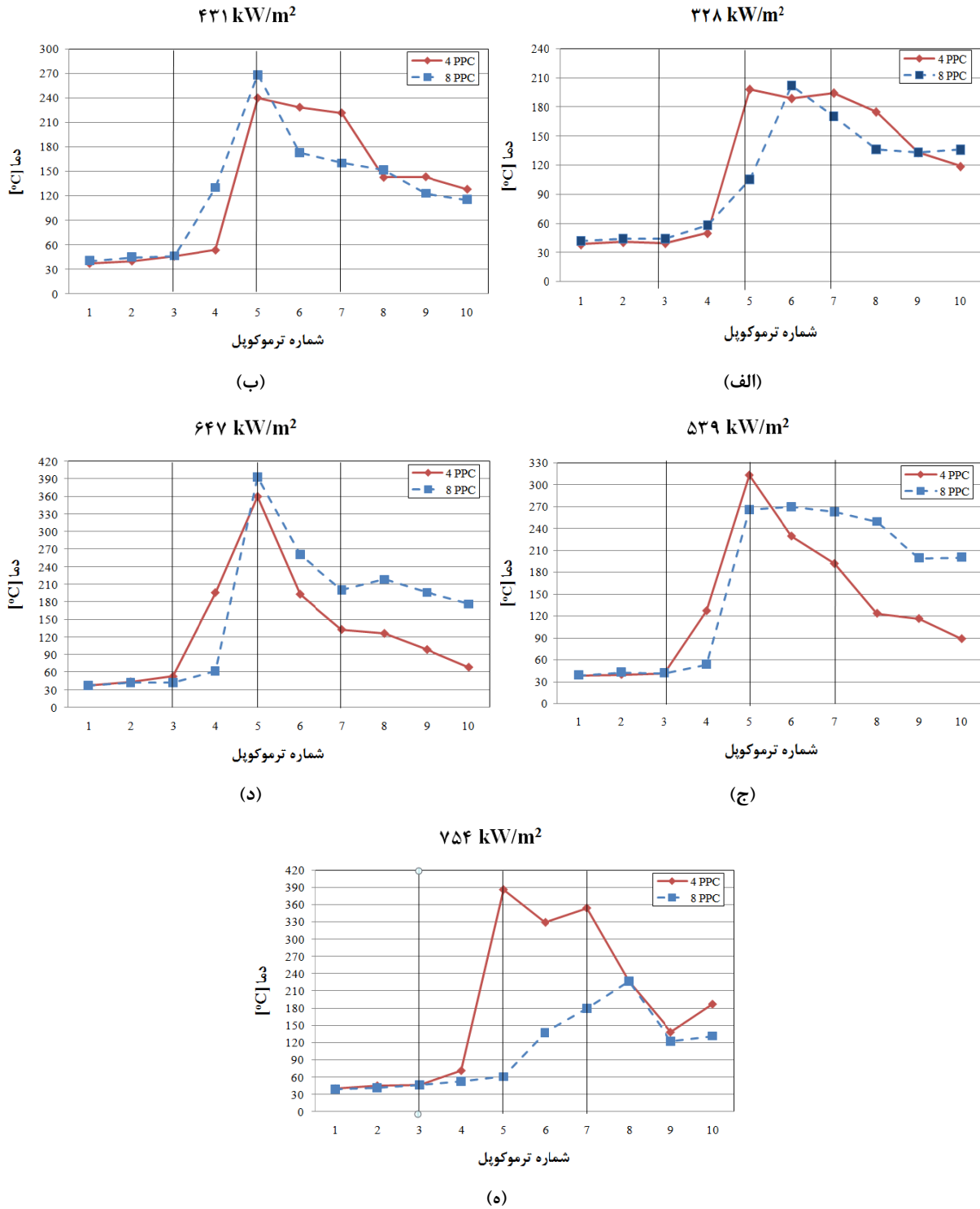
شکل ۳ نتایج توزیع دما برای دو چیدمان جدول ۱ در چندین نرخ آتش را نشان می‌دهد. در این شکل، توزیع دما در امتداد جریان بلافاصله پس از برگشت شعله رسم شده است. برای سهولت در تشخیص محل محیط‌های متخلخل، خطوط عمودی در محدوده ترموکوپل‌های ۳ تا ۷ روی شکل‌ها رسم شده است که محیط‌های متخلخل را مشخص می‌کنند. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، در قریب به‌اتفاق موارد، شعله پس از برگشت در سطح مشترک ناحیه پیش‌گرمایش و ناحیه اصلی احتراق، پایدار می‌شود. البته، برای نرخ آتش 754 kW/m^2 و محیط متخلخل 8 ppc، شعله از خارج مشعل برگشت کرده است که روند تفسیر نتایج در این مورد با سایر موارد متفاوت خواهد بود. شکل ۴ نیز متوسط دما در ناحیه پیش‌گرم را بر حسب نرخ آتش برای چیدمان‌های مذکور نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری زمان برگشت شعله بر حسب نرخ آتش نیز در شکل ۵ آمده است.

الف) بررسی اثر نرخ آتش

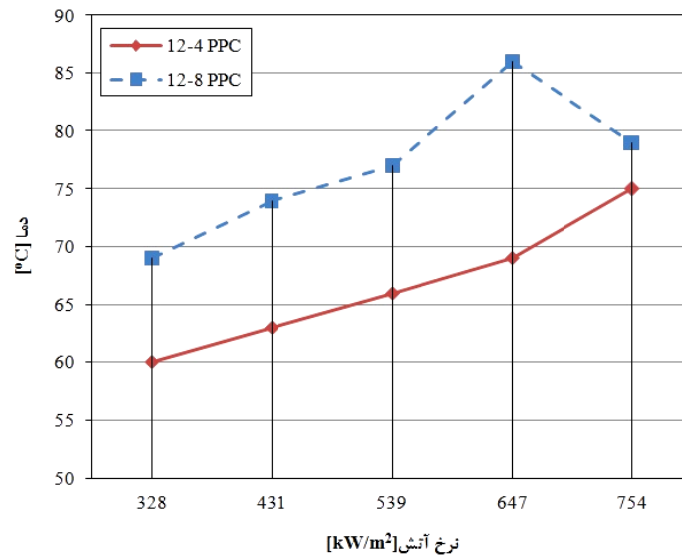
با توجه به منحنی‌های (الف) تا (ه) شکل ۳، مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ آتش، دمای نقطه محل قرارگیری شعله برگشتی افزایش پیدا کرده است. البته در منحنی (ه) برای محیط 8 ppc، به دلیل تشکیل شعله در خارج محیط متخلخل، این وضعیت مشاهده نمی‌شود. با توجه به اینکه در یک نسبت ثابت سوخت به هوا دمای شعله آدیاباتیک ثابت است، لذا بایستی توجیه مناسبی برای این افزایش وجود داشته باشد. برای توجیه مطلب به این نکته توجه شود که با افزایش نرخ آتش، میزان آزادسازی حرارت در واحد حجم افزایش یافته، ولی میزان انتقال حرارت از سازوکارهای رسانش، همرفت و تابش لزوماً با همان نرخ افزایش نخواهد یافت. از طرف دیگر، مطابق شکل ۴، با افزایش نرخ آتش، میزان پیش‌گرمایش افزایش نشان می‌دهد که خود دلالت بر افزایش دمای شعله خواهد داشت. بنابراین، در مجموع افزایش دما، در اثر افزایش نرخ آزادسازی حرارت و افزایش دمای شعله، بر تلفات حرارتی ناشی از سازوکارهای انتقال حرارت غلبه کرده و روند مشاهده‌شده در منحنی‌های (الف) تا (ه) شکل ۳ برقرار خواهد بود.

در حالت خاص محیط متخلخل 8 ppc در نرخ آتش 754 kW/m^2 ، مشاهده شد که شعله در پایین‌دست جریان و بیرون از محیط‌های متخلخل تشکیل می‌شود و بسیار ناپایدار است. این ناپایداری سبب برگشت شعله شده و با توجه به تخلخل کم این محیط و عدم نفوذ تابش حرارتی به درون محیط متخلخل و عدم هدایت طولی موثر در خارج محیط متخلخل، محیط‌های متخلخل نقش چندانی در پیش‌گرمایش مخلوط ورودی ندارند. به همین علت سرعت شعله بهبود نیافته و زمان برگشت شعله به تاخیر می‌افتد که در شکل ۵ مشخص است.

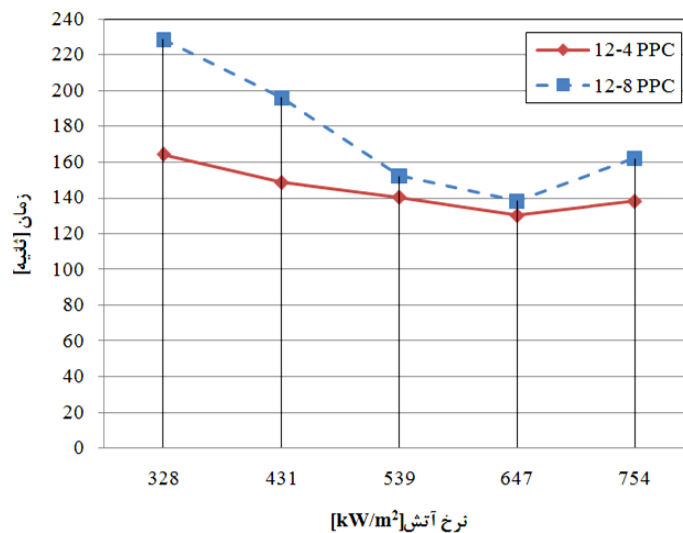
برای مقایسه بهتر، در شکل ۴ نمودار زمان و دمای متوسط ناحیه پیش گرمایش (میانگین دمای ترموکوپل‌های T3 تا T5) بر حسب نرخ آتش در نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ و در محیط‌های ۴ ppc و ۸ ppc ارائه شده است.



شکل ۳- توزیع دما در طول مشعل در دو چیدمان ترکیبی ۴ و ۱۲ ppc، ۸ و ۱۲ ppc در نرخ آتش‌های مختلف در لحظه برگشت شعله



شکل ۴- دمای متوسط ناحیه پیش‌گرمایش بر حسب نرخ آتش در دو چگالی حفره ۴ ppc و ۸ ppc در لحظه برگشت شعله



شکل ۵- زمان برگشت شعله بر حسب نرخ آتش برای دو چگالی حفره ۴ ppc و ۸ ppc

ب) بررسی اثر چگالی حفره

در بررسی اثر سرامیک بر خصوصیات برگشت شعله ذکر چند نکته لازم است.

- ۱- در یک نسبت هم‌ارزی و یک نرخ آتش یکسان، اگرچه سرعت جریان آزاد قبل از سرامیک‌ها و در ناحیه مستقیم‌کننده برای هر دو نوع سرامیک یکسان است، لیکن سرعت (مؤثر) جریان در محیط با چگالی حفره بیشتر (شناسه ppc بزرگ‌تر) زیادتر است.
- ۲- در محیط با چگالی حفره بیشتر، به دلیل تراکم بیشتر ماده سرامیکی، مقدار انتقال حرارت هدایت به سمت بالادست جریان در شبکه جامد افزایش می‌یابد.
- ۳- در سرامیک با چگالی حفره بیشتر، به دلیل تراکم بیشتر ماده جامد، مقدار تابش صادره از سطح داغ به محیط بیرون (نسبت به تابش نفوذی به لایه‌های زیرین) بیشتر است.
- ۴- عبور مخلوط هوا و گاز سرد نیز، در برخورد با شبکه جامد متراکم‌تر، سبب می‌شود تا لایه‌های زیرین ماده متخلخل خنک شوند.

۵- در سرامیک با چگالی حفره کمتر، به دلیل تماس بیشتر سطح جانبی محیط متخلخل با دیواره (نگهدارنده) سرامیکی، حرارت اتلافی به دیواره‌های جانبی بیشتر می‌شود (اگرچه عایق‌بندی اطراف این تلفات حرارتی را تا حد زیادی کاهش داده است).

برآیند مجموعه عوامل بالا باعث می‌شود که پیش‌گرمایش لازم برای برگشت شعله در ناحیه بالادست جریان، در سرامیک با چگالی حفره بیشتر، افزایش یابد که شکل ۴ نیز مؤید این نکته است. به همین دلیل، زمان برگشت شعله نیز افزایش می‌یابد که این نکته در شکل ۵ به وضوح دیده می‌شود. نکته مهم دیگری که می‌تواند موضوع تحقیق قرار گیرد نحوه توزیع دمای شعله برگشتی در چگالی حفره‌های متفاوت (به ازای یک نرخ آتش) است. همان‌گونه که اشاره شد، محیط با شناسه بزرگ‌تر از نظر رسانش گرما بهتر عمل کرده ولی از نظر محدوده تابش گرما ضعیف‌تر است. برآیند این دو سازوکار انتقال حرارت در کنار سازوکار همرفت گرما می‌تواند تلفات حرارتی از ناحیه احتراق را مشخص کند. با توجه به منحنی‌های (الف) تا (ه) شکل ۳، مشاهده می‌شود رفتار هر کدام از محیط‌های متخلخل در نرخ آتش‌های مختلف وابستگی زیادی به برتری سازوکارهای رسانش و تابش بر سازوکار همرفت دارد و روند یکنواختی را نمی‌توان پیش‌بینی کرد.

با توجه به تمام موارد مطرح شده، مقایسه بین دو چگالی حفره ۴ و ۸ در نرخ آتش‌های مختلف نشان می‌دهد که در نرخ آتش‌های بیش از ۴۳۱ کیلووات بر مترمربع، دمای ناحیه پیش‌گرمایش در چگالی حفره ۴ بیشتر از ۸ است. در نرخ آتش ۷۵۴ کیلووات بر مترمربع، به دلیل افزایش سرعت موثر در محیط ۸ نسبت به محیط ۴، شعله نمی‌تواند به داخل محیط نفوذ کند و برگشت شعله از خارج محیط‌های متخلخل اتفاق می‌افتد.

با مشاهده داده‌های آزمایشگاهی، می‌توان نتیجه گرفت که در زمان‌هایی که شعله قبل از رسیدن به محیط ۱۲ ppc برگشت می‌کند، دمای ناحیه پیش‌گرمایش کمتر از حالت‌هایی است که شعله به محیط ۱۲ ppc چسبیده است. ولی وقتی که شعله به محیط ۱۲ ppc بچسبد، انتقال حرارت هدایتی به شدت افزایش یافته و سبب پیش‌گرمایش مخلوط ورودی می‌شود. به نظر می‌رسد وجود مقاومت حرارتی ناشی از فاصله نازک بین دو محیط متخلخل سبب کاهش میزان انتقال حرارت هدایتی به بالادست ناحیه پیش‌گرمایش می‌شود.

وقتی شعله در پایین‌دست جریان در محیط متخلخل تشکیل می‌شود، باعث داغ‌شدن سطح بالایی و در نتیجه سبب تابش به محیط بیرون و نیز به ناحیه محدودی در زیر شعله می‌شود. هنگامی که چگالی حفره یک محیط نسبت به محیط دیگر کمتر باشد (یعنی فضای خالی بیشتر داشته باشد)، تابش به ناحیه زیر شعله می‌تواند تا عمق بیشتری از محیط نفوذ کند. در محیط ۸ ppc، تابش تنها در لایه‌های نزدیک به سطح نفوذ می‌کند و از آنجا به بعد، حرارت توسط سازوکار هدایت به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند. از طرف دیگر، هدایت حرارتی در محیط ۸ ppc بیشتر است، زیرا در محیط ۸ ppc حجم اشغالی توسط حفره‌ها کمتر بوده و مقدار ماده سرامیکی نسبت به مقدار گاز اطراف آن بیشتر است. این امر سبب می‌شود عملاً میزان مقاومت حرارتی در سرامیک ۴ ppc از ۸ ppc بیشتر شود. بنابراین، با در نظر گرفتن سه عامل ۱- نفوذ حرارت تابشی در عمق بیشتری از سرامیک ۴ ppc، ۲- کاهش نرخ انتقال حرارت هدایتی به قسمت‌های زیرین سرامیک ۴ ppc و ۳- زمان برگشت شعله کمتر در سرامیک ۴ ppc نسبت به ۸ ppc، نتیجه مهمی به دست می‌آید. این سه عامل نشان می‌دهد که در یک نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی ثابت، باید دمای متوسط ناحیه پیش‌گرمایش در لحظه برگشت شعله در سرامیک ۴ ppc نسبت به ۸ ppc کمتر باشد (شکل ۴).

صحت‌سنجی نتایج

برای صحت‌سنجی نتایج ارائه‌شده از دو روش تحلیل خطا و روش تکرار استفاده شده است. برای تحلیل خطا یک روش این است که کلیه خطاها جمع شود تا عدم قطعیت نتیجه نهایی به دست آید؛ ولی احتمال اینکه تمام متغیرها در یک زمان ماکزیمم خطای خود را داشته باشند و در ضمن علامت خطاها به شکلی باشد که همه مقادیر خطا با یکدیگر جمع شوند، بسیار

کم است. یک روش دقیق‌تر برای تخمین نتایج تجربی توسط هولمن [۱۹] ارائه شده است که در این تحقیق از این روش بهره گرفته شده است.

خطاهایی که در یک فرایند آزمایشگاهی می‌تواند ظاهر شود از چند چیز ناشی می‌شود که عبارت‌اند از: خطای موجود در وسایل اندازه‌گیری، خطای اندازه‌گیری که معمولاً ناشی از عدم دقت پژوهش‌گر است و خطای موجود در محاسبات. با توجه به ساده‌بودن معادلات به کار رفته و کم‌بودن حجم محاسبات میزان خطای ناشی از گردکردن و عملیات محاسباتی بسیار اندک و قابل صرف‌نظر است. همچنین، در اینجا از خطای ناشی از خواندن روتامترها توسط پژوهش‌گر چشم‌پوشی شده است. خطاهای موجود در ابزارهای اندازه‌گیری با توجه به مشخصات ارائه‌شده از سوی سازندگان عبارت است از:

خطای ترموکوپل (کالیبراسیون): ± 3 درجه سانتی‌گراد

خطای اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل: ± 0.1 درجه سانتی‌گراد

خطای ثبت دما در واحد زمان توسط سیستم ثبت داده‌ها: ± 1 درجه سانتی‌گراد

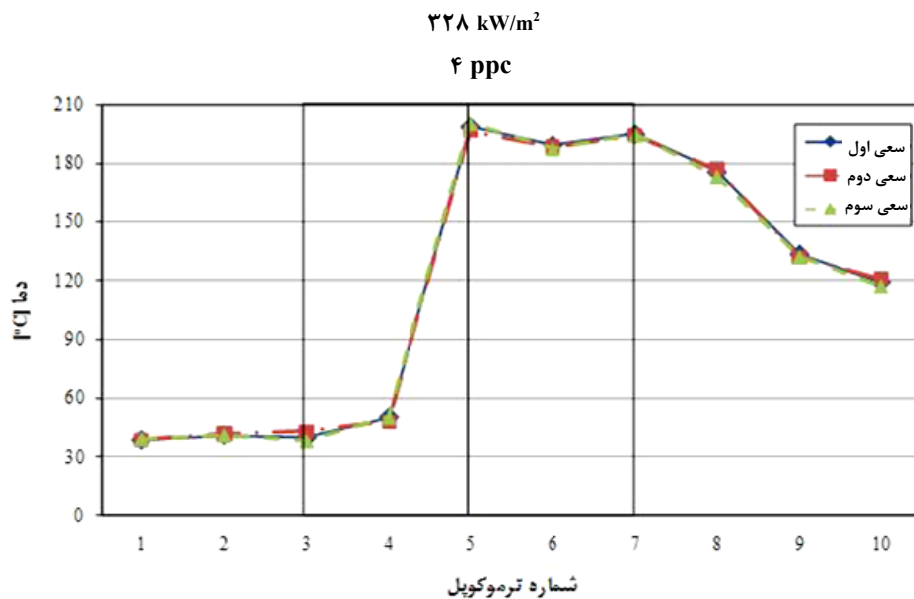
خطای روتامتر گاز: 0.18 لیتر بر دقیقه

خطای روتامتر هوا: 0.15 متر مکعب بر ساعت

شایان ذکر است که خطاهای موجود در یک وسیله در بدترین حالت با هم جمع می‌شوند. ضمناً فرض شده است که عدم قطعیت مربوط به ارزش حرارتی گاز و ابعاد ناچیز باشد. همچنین، خطای موجود در ثبت زمانی دمای ترموکوپل‌ها در تمام اندازه‌گیری‌ها وجود دارد که در آنالیز خطای انجام‌شده لحاظ نشده است.

با توجه به نتایج اصلی موجود در این تحقیق، متغیرهای متأثر از خطا شامل نسبت هم‌ارزی، نرخ آتش و دما می‌شود. عدم قطعیت دما برابر مجموع سه خطای مربوط به ترموکوپل بوده و برابر $4/1$ درجه سانتی‌گراد است که در بدترین حالت $9/2$ درصد خطا محاسبه شده است. عدم قطعیت نرخ آتش برابر مقدار ثابت $19/41 \text{ kW/m}^2$ خواهد شد که برای این متغیر خطای حداکثری 6 درصد به‌دست آمده است.

به منظور تایید نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام‌شده، اقدام به تکرارپذیری برخی آزمایش‌ها شد و نتیجه آن در شکل ۶ آورده شده است. این شکل دمای محوری مشعل را در چیدمان 4 تا 12 ppc در نرخ آتش 328 kW/m^2 نشان می‌دهد.



شکل ۶- توزیع دما در طول مشعل در چیدمان 4 تا 12 ppc در سه تکرار مختلف

با توجه به خطاهای ذکر شده مربوط به دما (۹/۲ درصد) و نرخ آتش (۶ درصد) و نیز با توجه به شکل ۶ (که نشان می‌دهد توزیع دما در تکرارهای مختلف اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند)، می‌توان نتیجه گرفت که آزمایش‌ها از صحت و دقت مناسبی برخوردارند.

پاسخ زمانی ترموکوپل، یا به بیان دیگر ثابت زمانی ترموکوپل، زمان لازم برای رسیدن دمای حس شده توسط ترموکوپل به ۶۳/۲ درصد مقدار دمای محیط مجاور آن است [۲۰]. این زمان به متغیرهای مختلفی از جمله جنس سیم‌های به کار رفته در ترموکوپل، طول سیم، نوع ترموکوپل، نوع اتصال سیم‌ها و ارتباط آن‌ها با محیطی که دمای آن اندازه‌گیری می‌شود وابسته است. یافتن تاثیر هر یک از این متغیرها بر روی پاسخ زمانی کار دشواری است. به همین دلیل، می‌توان با استفاده از آزمایش‌های ساده برآورد مناسبی از این مقدار داشت. یکی از این آزمایش‌ها استفاده از کوره‌های دماثابت و یا مخلوط‌های با دمای ثابت (مثل آب جوش و یا مخلوط آب و یخ) است.

برای یافتن پاسخ زمانی ترموکوپل‌های به کار رفته در این تحقیق، از آب جوش استفاده شد. بدین منظور پس از اینکه آب به دمای جوش می‌رسد، ترموکوپلی که در ابتدا در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد در محل اندازه‌گیری) قرار دارد، وارد آب جوش شده و زمان رسیدن به دمای آب جوش که تقریباً برابر ۹۵ درجه سانتی‌گراد در محل اندازه‌گیری آن است) اندازه‌گیری می‌شود. در آزمایشی که انجام شد، متوسط زمان پاسخ‌دهی ترموکوپل برابر ۲/۵ ثانیه به دست آمد. حال با استفاده از تخمین نمایی در رابطه زیر [۲۰] زمان رسیدن به دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد قابل محاسبه است:

$$\frac{T_e - T}{T_e - T_1} = e^{-t/\tau} \quad (3)$$

که T_e دمای مورد اندازه‌گیری، T_1 دمای اولیه و T دمای ترموکوپل است. با استفاده از مقادیر بالا و جایگذاری در رابطه، مقدار τ برابر ۰/۷ به دست می‌آید. بنابراین، اگر دمای نهایی T_e برابر ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد (حداکثر دمای برگشت شعله در منحنی‌های بالا) باشد، مقدار t برابر ۳/۲ ثانیه به دست می‌آید. بنابراین، حداکثر تاخیر زمانی تمام ترموکوپل‌ها به طور متوسط کمتر از ۳/۲ ثانیه خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، بررسی تجربی متغیرهای نرخ آتش و میزان چگالی حفره بر برگشت شعله به زیر سطح ناحیه پیش‌گرمایش در محیط متخلخل دولایه‌ای از جنس SiC انجام گرفته است. سرامیک‌ها با سطح مقطع 64 cm^2 و میزان چگالی حفره آن‌ها ۴، ۸ و ۱۲ حفره بر سانتی‌متر است. واکنش‌دهنده‌ها شامل هوا و گاز طبیعی با نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ هستند. زمان برگشت شعله (زمان بین جرقه‌زدن و لحظه برگشت) و دمای برگشت شعله (دمای متوسط ناحیه پیش‌گرمایش سرامیک‌ها) در سرامیک‌های ترکیبی با چگالی حفره ۴ و ۱۲، و ۸ و ۱۲ حفره در سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد در یک نرخ آتش یکسان، با افزایش چگالی حفره، زمان برگشت شعله کاهش می‌یابد. آزمایش‌ها برای محیط‌های متخلخل بالا، نشان داد که با افزایش نرخ آتش و در یک چگالی حفره ثابت، اگر شعله در داخل محیط متخلخل قرار گیرد، دمای متوسط ناحیه پیش‌گرمایش افزایش و زمان برگشت شعله کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از امور پژوهش و توسعه شرکت ملی گاز ایران به دلیل تقبل بخشی از هزینه‌های ساخت دستگاه تشکر می‌کنند.

منابع

1. C. E. Bakaul, *Industrial Burners handbook*, USA, CRC Press, 2003, Sections 11-13.
2. S. Mößbauer, O. Pickenäcker, K. Pickenäcker and D. Trimis, "Application of the Porous Burner Technology in Energy and Heat-Engineering", *Clean Air*, 3, No. 2, 2002, pp. 185-195.

3. J. R. Howell, M. J. Hall and J. L. Ellzey, "Combustion of Hydrocarbon Fuels within Porous Inert Media", *Progresses in Energy and Combustion Science*, 22, 1996, pp.121-145.
4. S. Wood and A. T. Harris, "Porous Burners for Lean Burn Applications", *Progresses in Energy and Combustion Science*, 34, 2008, pp. 667-684.
5. M. Abdul Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. Abu Bakar, A. A. Mohamad, R. M. N. Muhad and M. K. Abdullah, "Combustion in Porous Media and its Applications -A Comprehensive Survey", *Journal of Environmental Management*, 90, 2009, pp.2278-2312.
6. M. Abdul Mujeebu, M. Z. Abdullah and A. A. Mohamad, "Development of energy efficient porous medium burners on surface and submerged combustion modes", *Energy*, 36, 2011, pp. 5132-5139.
7. M. Abdul Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. Abu Bakar, A. A. Mohamad and M. K. Abdullah, "Applications of Porous Media Combustion Technology- A Review", *Applied Energy*, 86, 2009, pp.1365-1375.
8. Y. Kotani and T. Takeno, "An Experimental Study on Stability and Combustion Characteristics of an Excess Enthalpy Flame", *Proceeding Combustion Institute*, 19, 1982, pp.1503-1509.
9. Y. Itaya, K. Miyoshi, S. Maeda and M. Hasatani, "Surface Combustion of a Premixed Methane-air Gas on a Porous Ceramic", *International Chemical Engineering*, 32, No. 1, 1992, pp.123-131.
10. R. Mital, J. P. Gore and R. Viskanta, "A Study of the Structure of Submerged Reaction Zone in Porous Ceramic Radiant Burners", *Combustion and Flame*, 111, 1997, pp. 175-184.
11. G. Brenner, K. Pickenäcker, O. Pickenäcker, D. Trimis, K. Wawrzinek and T. Weber, "Numerical and Experimental Investigation of Matrix-Stabilized Methane/Air Combustion in Porous Inert Media", *Combustion and Flame*, 123, 2000, pp. 201-213.
12. W. Jr. Mathis and J. L. Ellzey, "Flame Stabilization, Operating Range, and Emissions for a Methane/Air Porous Burner", *Combustion Science and Technology*, 175, 2003, pp. 825-839.
13. B. J. Vogel and J. L. Ellzey, "Subadiabatic and Superadiabatic Performance of a Two-Section Porous Burner", *Combustion Science and Technology*, 177, 2005, pp.1323-1338.
14. S. A. Hashemi and H. Atoof, "An Experimental Study of the Effect of Thickness and Porosity on the Performance of a Porous Metal Radiation Burner", *Journal of Fuel and Combustion*, 2, No. 2, 2009, pp. 11-23, (in Farsi).
15. S. A. Hashemi, J. Amani, and H. Atoof, "Experimental study of flame stability in SiC porous media", *Amirkabir Journal of Science & Technology*, 42, No. 2, 2010, (in Farsi).
16. S. Hossainpour and N. Moallemi Khiavi, "Two-Dimensional Numerical Simulation of Combustion in Porous Burners using for Multi-Steps Kinetics Mechanisms", *Journal of Fuel and Combustion*, 3, No. 1, 2010, pp. 63-74, (in Farsi).
17. A. Bakry, A. Al-Salaymeh, A. H. Al-Muhtaseb, A. Abu-Jrai and D. Trimis, "Adiabatic Premixed Combustion in a Gaseous Fuel Porous Inert Media under High Pressure and Temperature: Novel Flame Stabilization Technique", *Fuel*, 90, No. 2, 2011, pp. 647-658.
18. D. Wu, H. Liu, M. Xie, H. Liu and W. Sun, "Experimental Investigation on Low Velocity Filtration Combustion in Porous Packed Bed using Gaseous and Liquid Fuels", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36, 2012, pp. 169-177.
19. J. P. Holman, "Experimental Methods for Engineers", USA, McGraw-Hill, 2001.
20. Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, ASTM Manual Series: MNL 12, ASTM Committee E20 on Temperature Measurement, 4th Ed., 1981.

English Abstract

An Experimental Study of Flashback Phenomenon in a Two-Layer Porous Media

M. D. Emami, H. Atoof and M. R. Rezaeibakhsh

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology

(Received: 2012.1.9, Received in revised form: 2012.6.25, Accepted: 2012.9.30)

The present paper concerns an experimental investigation of the flashback phenomenon of flame in a porous media burner made of two SiC-porous media. Regarding the importance of flame stabilization on the surface of these types of burners to achieve the highest efficiency, some influential parameters that affect the flame flashback, such as the firing rate and the pore density, were studied. The reactive mixture comprised natural gas and air with an equivalence ratio of 0.65. The temperature profile along the burner was measured by thermocouples installed at different locations of the burner, including the porous media. Results show that by increasing the firing rate at a constant porosity, the flashback temperature is increased and the flashback time is reduced. An increase in the porosity results in reduction of flashback temperature and its associated time.

Keywords: Porous media, SiC, Flashback, Experiment