

بررسی آزمایشگاهی برگشت شعله در یک مشعل متخلخل دولایه‌ای ۵kW

محسن دوازده‌امامی^۱، محمدرضا رضایی بخش^۲، حسین عطوف^{۳*}
دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

چکیده

در این مقاله، فرآیند برگشت شعله (که منظور حرکت شعله به ناحیه بالادست سرامیک‌های متخلخل است) در داخل محیط متخلخل سرامیکی دولایه‌ای از جنس SiC به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. عوامل موثر بر پدیده برگشت شعله به زیر سطح همچون نرخ آتش و میزان تخلخل 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 پیش مخلوط وارد مشعل می‌شود. برای بررسی چرایی و چگونگی برگشت شعله، نحوه پیش گرمایش و بهبود سرعت شعله از طریق رصد بیشینه دما در داخل بستر متخلخل بررسی و توضیح داده شده است.

واژه‌های کلیدی: محیط متخلخل، سیلیکون کربید، برگشت شعله، مطالعه آزمایشگاهی

۱- مقدمه

امروزه توسعه‌ی مشعل‌های متخلخل بدلیل مزیت‌هایی از قبیل بازده تابشی بالا، کم بودن آلودگی ناشی از NOx، سرعت شعله بالا، میزان بازه‌پذیری بار^۴، کاهش حجم مشعل، افزایش محدوده شعله‌وری، توزیع یکنواختی حرارت و کاهش سر و صدا تولید آلاینده‌ی کم، کارایی در نسبت هم‌ارزی‌های پایین و داشتن سرعت شعله‌ای بیش از شعله‌ی آرام افزایش یافته است [1-5]. در این راستا برای استفاده از مزایای این نوع مشعل‌ها باید روش و چگونگی پایداری شعله در داخل محیط متخلخل بررسی گردد. کوتانی و تاکنو [6] از دسته‌ای از لوله‌های آلومینایی به عنوان محیط متخلخل استفاده کردند که یک مبدل حرارتی در اطراف محفظه‌ی احتراق آن بکار رفته است. آنها احتراق پایدار را حتی در نزدیکی نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۲ نیز مشاهده کردند و سرعت شعله را ۲۰ برابر شعله‌ی آزاد بدست آوردند. ایتایا و همکاران [7] احتراق سطحی را برای مخلوط هوا-متان در حالت پیش‌آمیخته در یک صفحه‌ی سرامیکی مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند هرگاه سرعت مخلوط کمتر از سرعت شعله‌ی آرام باشد، بواسطه‌ی 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

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

که در آن نسبت سرعت سوزش مخلوط گازی به سرعت گاز حداقل است، بیشترین دمای سطح بدست می‌آید. میتال [8] مطالعه‌ای تجربی در مورد احتراق مدفون داخل محیط متخلخل از جنس سیلیکون کرباید و کوردريت انجام دادند. آنها در آزمایش‌های خود مشاهده کردند بین نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۶ تا ۰/۷ پرش شعله اتفاق می‌افتد و نیز سرعت شعله در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ در نرخ آتش‌های متفاوت بسیار کمتر از سرعت شعله‌ی آدیاباتیک در این نسبت هم‌ارزی است. همچنین افزایش نرخ آتش باعث افزایش غیرخطی سرعت شعله می‌شود. برنر و همکاران [9] یک بررسی عددی و آزمایشگاهی بر روی شعله‌ی پایدار در داخل محیط متخلخل دو لایه‌ای به شکل مستطیل از جنس SiC و Al_2O_3 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 می‌گردد. ماتیس و الزی [10] پایداری شعله، بازه‌ی کارکرد و میزان آلاینده‌ها را در مشعل متخلخل دو قسمتی از دو جنس YZA و ZTM با سوخت هوا و گاز پیش‌آمیخته بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این مشعل، سرامیک بالادست دارای تخلخل ۳۳/۶ ppc و سرامیک پایین دست دارای تخلخل ۳/۹ ppc است. نتایج آنها نشان می‌دهد که سطح مشترک بین دو سرامیک در سرامیک YZA در نگهداری شعله در این منطقه بسیار مؤثر است. ولی در نوع ZTM، شعله به سرامیک بالادست نفوذ می‌کند. وگل و الزی [11] پایداری شعله را در حالت زیرآدیاباتیک و فوق‌آدیاباتیک (هنگامی که سرعت شعله کمتر و بیشتر از سرعت شعله‌ی آرام باشد) در یک مشعل متخلخل دو قسمتی فلزی از جنس 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 زیرآدیاباتیک مشاهده می‌شود. معتقدی‌فر و هاشمی [۱۲] مطالعه‌ای تجربی در زمینه‌ی مشعل‌های متخلخل فلزی انجام دادند. ایشان در آزمایش‌های خود از محیط متخلخل با تخلخل ۲/۵ ppc و ۶ ppc با ضخامت ۰/۵ و ۰/۷ استفاده کردند. آنها از محیط‌های ۳ تا ۷ لایه و نیز یک محیط ترکیبی استفاده کرده و نتیجه گرفتند که بیشینه‌ی دمای سطح در محیط ۳ لایه در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ ایجاد شده است. همچنین بیشینه‌ی راندمان تابشی در نرخ آتش 98 kW/m^2 برابر ۳۰٪ بدست آمد. هاشمی و همکاران [۱۲] مطالعه‌ای تجربی به منظور رصد شعله گذرا در داخل محیط متخلخل تک لایه‌ای از جنس کاربید 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 پروفیل‌های دمایی را در راستای محوری بدست 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.

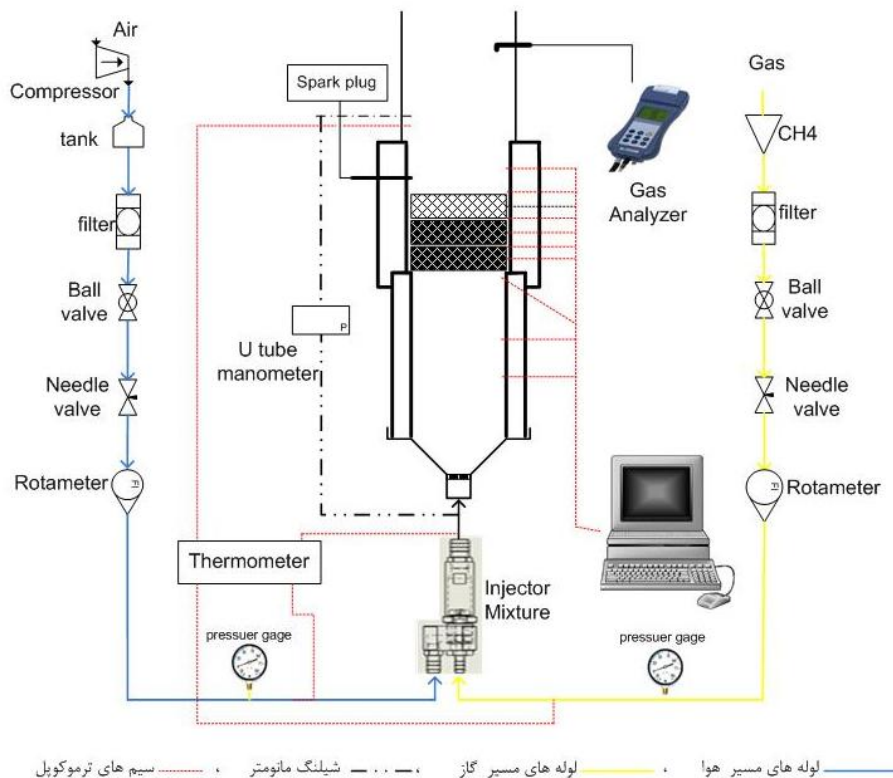
در این تحقیق ویژگی برگشت شعله (بدون خاموشی) در یک مشعل دو لایه‌ای ۵kW بررسی می‌شود. محیط‌های مورد استفاده در این آزمایشات SiC است. تأثیر پارامترهایی نظیر تخلخل، نرخ آتش در یک مخلوط رقیق بر روی نحوه چرخش حرارت در ناحیه پیش‌گرمایش و تأثیر آن بر سرعت شعله بررسی گردیده است.

۲- معرفی دستگاه آزمایش و روند انجام آزمایش‌ها

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 ابتدای مشعل، وارد پخش‌کننده و از آنجا جهت تولید مخلوط با پروفیل یکنواختی از سرعت در برخورد با ناحیه‌ی پیش‌گرمایش مشعل، طول ناحیه مستقیم‌کننده را طی می‌کند. کنترلرهای دما و فشار نیز در مکان‌های مورد نیاز قرار داده شده‌اند. اطراف دیواره مشعل با عایق‌های حرارتی مقاوم در برابر حرارت بالا پوشانده شده تا نتایج تا حد امکان از تأثیرات حرارتی دیواره مبرا باشد. در این دستگاه نه 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 بکار رفته است.

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



شکل ۱- نمای کلی از ساختمان دستگاه آزمایش

۳- فرآیند انجام آزمایش‌ها

روند انجام آزمایشات به این صورت است که بعد از قرار دادن محیط‌های متخلخل مناسب با هر حالت از تخلخل و تنظیم شرایط کارکرد مشعل و دمای اولیه‌ی بدنه جرقه زده شده و دیتالاگر روشن می‌شود (آزمایش‌ها بگونه‌ای طراحی شده‌اند که دمای اولیه کلیه ترموکوپل‌های بکار رفته در دستگاه تقریباً به دمای 35°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 برنامه‌ی کامپیوتری ثبت دما اجرا می‌گردد. سپس جرقه زده شده و فرآیند احتراق آغاز می‌شود. موقعیت اولیه شعله پس از زدن جرقه، بستگی به سرعت موثر جریان $(V_{\text{eff}}=V_{\text{mixture}}/\phi)$ دارد. در این مشعل ۳ نوع محیط وجود دارد که شعله در آن می‌تواند مستقر شود. این محیط‌ها شامل محیط‌های متخلخل ۱۰ ppi و ۲۰ ppi و نیز ناحیه پس از محیط‌های متخلخل در پایین دست سرامیک‌ها است. پس با توجه به سرعت مخلوط ورودی و نسبت هم‌ارزی، شعله در این سه موقعیت تشکیل خواهد شد.

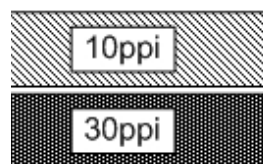
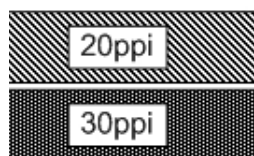
پس از اینکه شعله به زیر محیط ۳۰ ppi برگشت کرد، مواجه با مخلوط سرد ورودی می‌شود. با ورود مخلوط سرد به ناحیه احتراق، سرعت شعله کاهش می‌یابد. همچنین شعله به پایین دست نیز نمی‌تواند نفوذ کند. چون انرژی حرارت موجود در سرامیک‌ها، باعث افزایش سرعت شعله شده و شعله دوباره به زیر سرامیک بر می‌گردد. پس شعله در همانجا مستقر می‌ماند. پس از برگشت شعله به زیر سطح سرامیک ثبت داده‌ها قطع شده و شیرهای گاز و هوا بسته می‌شود و بعد از آن، دستگاه وارد حالت خنک‌کاری می‌گردد تا برای آزمایش بعد آماده شود. لازم به ذکر است زمانی که این پدیده اتفاق می‌افتد، دمای ترموکوپلی که در قسمت لوله مستقیم کننده قرار می‌گیرد، ناگهان افزایش می‌یابد.

مدت زمانی که از زمان ایجاد جرقه طول می‌کشد تا شعله به زیر سطح سرامیک برسد، زمان برگشت شعله به حالت زیر سطح، و دمای 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 اهمیت هستند که قابلیت سرامیک متخلخل از جنس SiC را در نگه داشتن شعله و پایدار کردن و جلوگیری از بوجود آمدن پدیده‌ی برگشت شعله، نشان می‌دهد.

در این تحقیق تاثیر فاکتور تخلخل (با ۲ میزان تخلخل) بر دما و زمان برگشت شعله مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق واحد تخلخل بر حسب ppi یعنی مقدار حفره در هر اینچ است. تعداد و نوع پارامترهای آزمایش این قسمت در جدول (۱) آورده شده است. شکل (۲) حالت‌های چیدمان محیط‌های متخلخل را درون مشعل برای دو تخلخل مورد آزمایش نشان می‌دهد. لازم بذکر است که ضخامت هر لایه ۲۲mm است. بدلیل برگشت سریع شعله در داخل سرامیک‌های تک لایه‌ای [۱۲] از یک سرامیک با تخلخل ۳۰ ppi استفاده شده است تا تاثیر پیش گرمایش بر مخلوط گازی بیشتر معلوم گردد.

جدول ۱- برنامه انجام آزمایشات

شماره آزمایش	ضخامت محیط متخلخل	نسبت سبب ه م ارزی	تخلخل	نرخ آتش () kW/m^2
۱	۴۴mm	۶	۱۰ ppi	۲۱۶
۲				۳۲۸
۳				۴۳۱
۴				۵۳۹
۵				۶۴۷
۶				۷۵۴
۷		۰/۵	۲۰ ppi	۲۱۶
۸				۳۲۸
۹				۴۳۱
۱۰				۵۳۹
۱۱				۶۴۷
۱۲				۷۵۴



(ب)

(الف)

شکل ۲- دو حالت از چیدمان محیط های متخلخل SiC

۴- نتایج

پارامترهایی که در این مجموعه آزمون ها تغییر می کنند دبی گاز طبیعی (تغییر نرخ آتش^۱)، دبی هوای ورودی (تغییر نسبت هم‌ارزی^۲) و تخلخل^۳ بستر متخلخل سرامیکی هستند که برای پایداری شعله مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج مربوط به این آزمایش‌ها بر حسب نرخ آتش، نسبت هم‌ارزی و تخلخل ارائه می‌شوند که بستگی به نحوه آزمایش دارند. نسبت هم‌ارزی در احتراق سوخت، عبارت است از نسبت سوخت به هوا بر پایه جرمی (مولی) در حالت واقعی به نسبت سوخت به هوای استوکیومتری 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) بدست می‌آید.

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

که در آن LHV ارزش حرارتی گاز طبیعی بر حسب 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 ۰/۰۰۶۴ می‌باشد. بر اساس اطلاعات دریافتی از نیروگاه اصفهان، چگالی گاز طبیعی ۰/۸۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب و ارزش حرارتی خالص آن ۹۸۰۳ کیلوکالری بر متر مکعب بوده و ۸۹ درصد آن را متان تشکیل می‌دهد.

اثر تخلخل

به طور کلی، در یک نسبت هم‌ارزی و یک نرخ آتش یکسان، سرعت جریان و نیز مقدار حرارت آزاد شده برای هر دو نوع سرامیک یکسان است. ولی در سرامیک با تعداد حفره‌ی بیشتر، بدلیل تراکم بیشتر ماده‌ی سرامیکی، مقدار انتقال حرارت هدایت به سمت پایین در شبکه‌ی جامد افزایش می‌یابد. به علاوه، در این نوع سرامیک مقدار تابش صادره از سطح داغ به محیط اطراف (نسبت به تابش نفوذی به لایه‌های زیرین) بیشتر است. زیرا هر چه از میزان حجم خالی یک محیط متخلخل کاسته می‌شود، میزان تراکم محیط بیشتر می‌شود. با افزایش تراکم محیط، حرارت تابش کمتر می‌تواند به لایه‌های پایینی نفوذ کند و عملاً از میزان نفوذ حرارت تابشی به لایه‌های نزدیک سطح کاسته می‌شود. عبور مخلوط هوا و گاز سرد نیز در برخورد با شبکه‌ی جامد متراکم‌تر، سبب می‌شود تا لایه‌های زیرین ماده‌ی متخلخل خنک شوند. همچنین در سرامیک با تخلخل کمتر، به دلیل تماس بیشتر سطح جانبی محیط متخلخل با دیواره‌ی (نگهدارنده‌ی) سرامیکی، حرارت اتلافی به دیواره‌های جانبی، بیشتر می‌شود. مجموعه این عوامل باعث می‌شوند که میزان پیش گرمایش در ناحیه بالادست سرامیک با تخلخل کمتر به تأخیر افتاده و زمان برگشت شعله به ناحیه‌ی بالادست طولانی‌تر شود.

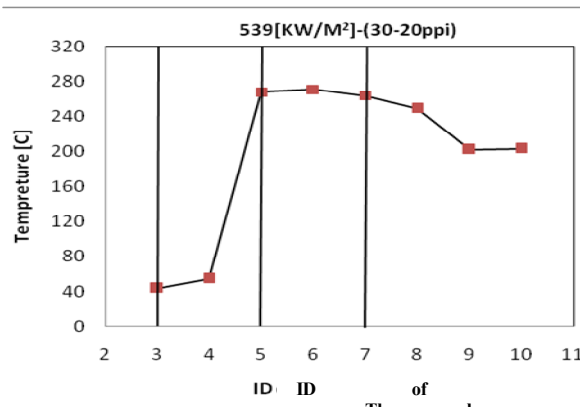
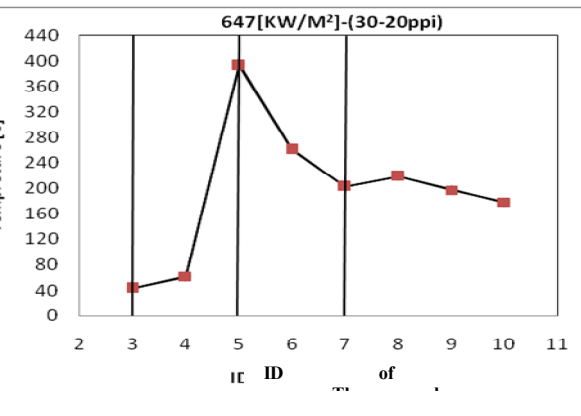
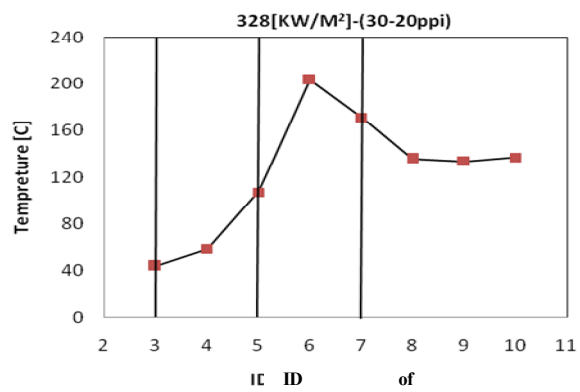
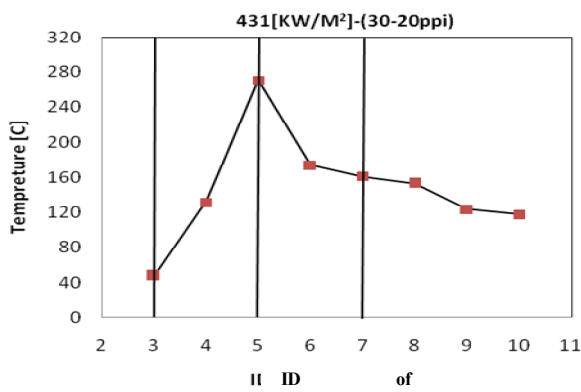
الف) اثر نرخ آتش در تخلخل ۲۰ppi

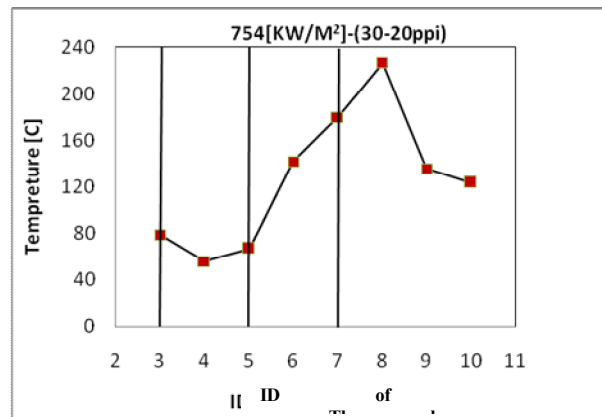
^۱ Firing Rate

^۲ Equivalence Ratio

^۳ Porosity

با توجه به شکل ۳، شعله در نرخ آتش 328 kW/m^2 قبل از برگشت در محیط 20 ppi قرار داشته است. بنابراین حرارت کمتری به محیط 30 ppi نفوذ می کند و در نتیجه متوسط دما در این ناحیه کمتر از نواحی دیگر است. بنابراین برگشت شعله به تاخیر می افتد. در نرخ آتش 431 kW/m^2 شعله به فصل مشترک دو محیط متخلخل چسبیده است. بنابراین حرارت بیشتری را متوجه نواحی بالادست می کند و انتظار می رود که بر میزان دمای متوسط ناحیه پیش گرمایش افزوده شود. در اینصورت زمان برگشت شعله سریعتر از نرخ آتش قبلی است. بدلیل افزایش سرعت جریان در نرخ آتش 539 kW/m^2 ، شعله قبل از رسیدن به محیط 30 ppi (ناحیه پیش گرمایش) برگشت می کند. این امر موجب کاهش انتقال حرارت به ناحیه پیش گرمایش شده و دمای متوسط آنرا کاهش می دهد. میزان حرارت آزاد شده در نرخ آتش 539 kW/m^2 بیش از دو مقدار قبلی است. بنابراین نفوذ حرارت به اطراف ناحیه واکنش سریعتر بوده و برگشت شعله سریعتر اتفاق می افتد. هنگامی که نرخ آتش به 647 kW/m^2 می رسد، میزان حرارت آزاد شده به حدی است که شعله می تواند خود را به پایین ترین قسمت محیط 20 ppi می رساند و در این صورت نسبت به حالت قبلی بر دمای ناحیه پیش گرمایش بیافزاید. هنگامی دستگاه در نرخ آتش 754 kW/m^2 تنظیم و جرقه زده می شود، مشاهده شد که شعله در پایین دست جریان و بیرون از محیطهای متخلخل تشکیل می شود و بسیار ناپایدار است. این ناپایداری سبب برگشت شعله شده و محیطهای متخلخل نقش چندانی در پیش گرمایش مخلوط ورودی ندارند. به همین علت سرعت شعله بهبود نیافته و زمان برگشت شعله به تاخیر می افتد.

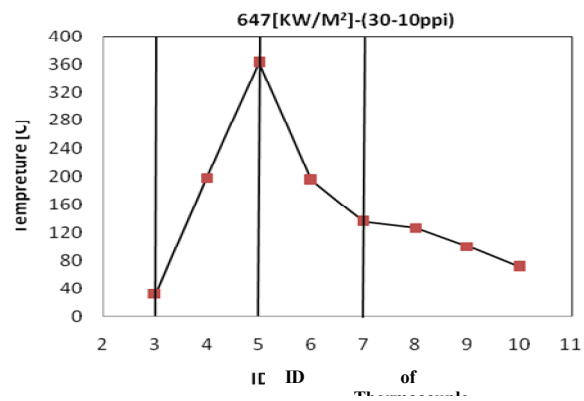
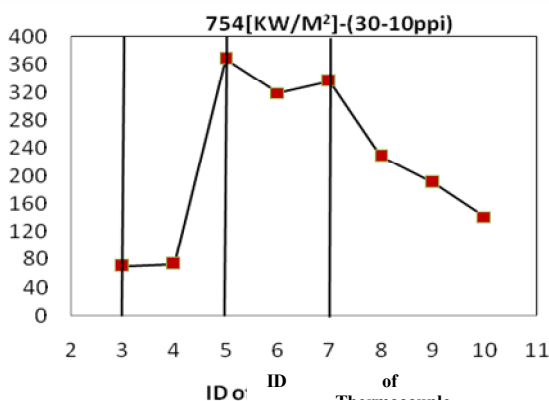




شکل ۳- پروفیل دما در طول مشعل در ترکیب ۳۰ و ۲۰ppi در نرخ آتش‌های مختلف در لحظه برگشت شعله

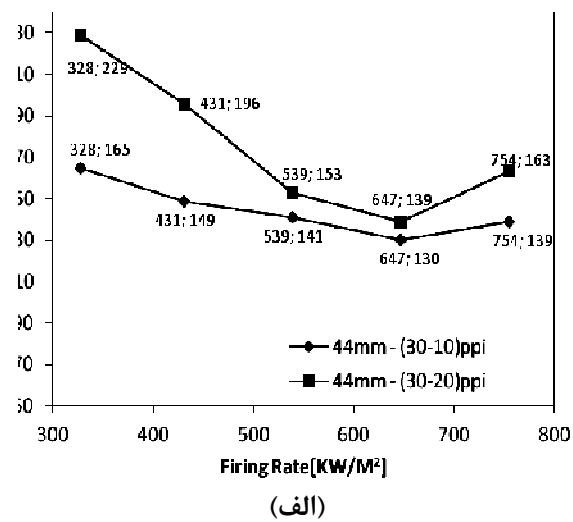
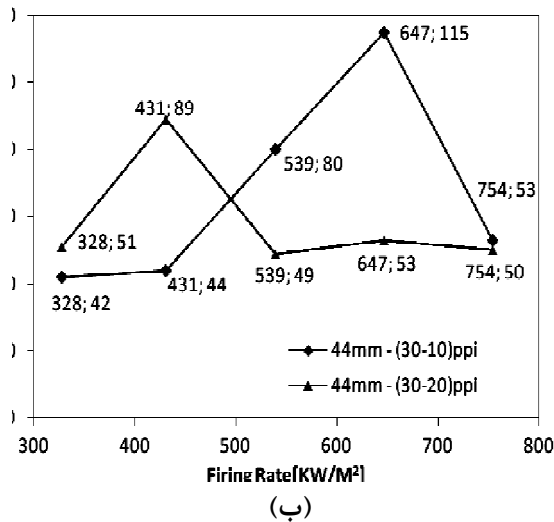
(ب) اثر نرخ آتش در تخلخل ۱۰ppi

در آزمایشات انجام شده با محیط ۱۰ppi، در تمامی نرخ آتش‌ها (برای نمونه همانند شکل ۴)، با افزایش نرخ آتش تا مقدار 754 kW/m^2 شعله در نزدیکی فصل مشترک دو محیط متخلخل باقی می‌ماند. با افزایش نرخ آتش بر میزان حرارت آزاد شده افزوده می‌شود. بنابراین دمای متوسط در ناحیه پیش گرمایش افزوده شده و زمان برگشت شعله کاهش می‌یابد. اما با افزایش سرعت جریان در نرخ آتش 754 kW/m^2 ، شعله قبل از برگشت، در محیط ۱۰ppi قرار می‌گیرد. بنابراین همانطور که انتظار می‌رود دمای ناحیه پیش گرمایش کاهش و زمان برگشت شعله افزایش می‌یابد.



شکل ۴- پروفیل دما در طول مشعل در ترکیب ۳۰ و ۱۰ppi در نرخ آتش‌های 754 kW/m^2 و 647 kW/m^2 در لحظه برگشت شعله

برای مقایسه بهتر، در شکل ۵ نمودار زمان و دمای برگشت شعله بر حسب نرخ آتش در نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ و در محیط‌های ۱۰ و ۲۰ppi ارائه شده است.



شکل ۳- نمودار مقایسه‌ای بر حسب نرخ آتش در دو تخلخل ۱۰ و ۲۰ ppi برای الف) زمان برگشت شعله و ب) دمای برگشت شعله

نتیجه

مقایسه بین دو تخلخل ۱۰ و ۲۰ در نرخ آتش‌های مختلف نشان می‌دهد که در نرخ آتش‌های بیش از ۴۳۱ دمای ناحیه پیش‌گرمایش در تخلخل ۱۰ بیشتر از ۲۰ است. در نرخ آتش ۷۵۴، بدلیل افزایش سرعت موثر در محیط ۲۰ نسبت به محیط ۱۰، شعله نمی‌تواند به داخل محیط نفوذ کند و از خارج محیط‌های متخلخل، شعله برمی‌گردد. با مشاهده نتایج می‌توان نتیجه گرفت که در زمانهایی که شعله قبل از رسیدن به محیط ۳۰ ppi برگشت می‌کند، دمای ناحیه پیش‌گرمایش کمتر از حالت‌هایی است که شعله به محیط ۳۰ ppi چسبیده است. ولی وقتی که شعله به محیط ۳۰ ppi بچسبد، انتقال حرارت هدایت به شدت افزایش یافته و سبب پیش‌گرمایش مخلوط ورودی می‌گردد. به نظر می‌رسد وجود مقاومت حرارتی ناشی از فاصله نازک بین دو محیط متخلخل سبب کاهش میزان انتقال حرارت هدایت به بالادست ناحیه پیش‌گرمایش می‌گردد.

وقتی شعله در پایین دست محیط متخلخل تشکیل می‌شود، باعث داغ شدن سطح بالایی و در نتیجه سبب تابش به محیط بیرون و نیز به ناحیه‌ی محدودی از زیر شعله می‌شود. هنگامی که تخلخل یک محیط نسبت به محیط دیگر بیشتر باشد (یعنی فضای خالی بیشتری داشته باشد)، تابش به ناحیه‌ی زیر شعله می‌تواند تا عمق بیشتری از محیط نفوذ کند. در مقابل، در محیط ۲۰ ppi، تابش تنها در لایه‌های نزدیک به سطح نفوذ می‌کند و از آنجا به بعد، حرارت توسط مکانیزم هدایت به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند. از طرف دیگر، هدایت حرارتی در محیط ۲۰ ppi، بهتر پیشرفت می‌کند. زیرا در محیط ۲۰ ppi، حجم اشغالی توسط حفره‌ها کمتر بوده و مقدار ماده‌ی سرامیکی نسبت به مقدار گاز اطراف آن، بیشتر است. این امر سبب می‌شود عملاً میزان مقاومت حرارتی در سرامیک ۱۰ ppi از ۲۰ ppi بیشتر شود. بنابراین با در نظر گرفتن سه عامل ۱- نفوذ حرارت تابشی در عمق بیشتری از سرامیک ۱۰ ppi، ۲- کاهش نرخ انتقال حرارت هدایت به قسمت‌های زیرین سرامیک ۱۰ ppi و ۳- زمان برگشت شعله‌ی کمتر در سرامیک ۱۰ ppi نسبت به ۲۰ ppi، نتیجه‌ی مهمی بدست می‌آید. این سه عامل نشان می‌دهد که در یک نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی ثابت، باید دمای برگشت شعله به حالت زیرسطح در سرامیک ۱۰ ppi نسبت به ۲۰ ppi کمتر باشد.

۹- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر بررسی تجربی پارامترهای نرخ آتش و میزا تخلخل بر برگشت شعله به زیر سطح ناحیه پیش‌گرمایش در محیط متخلخل دو لایه‌ای از جنس SiC انجام گرفته است. سرامیک‌ها با سطح مقطع 64cm^2 و میزان تخلخل آنها ۱۰، ۲۰ و

۳۰ حفره بر اینچ است. واکنش دهنده‌ها شامل هوا و گاز طبیعی با نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ می‌باشند. زمان برگشت شعله (زمان بین جرقه زدن و لحظه برگشت) و دمای برگشت شعله (دمای متوسط ناحیه پیش‌گرمایش سرامیک‌ها) در سرامیک‌های ترکیبی با تخلخل ۱۰، ۲۰ به همراه ۳۰ حفره در اینچ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد در یک نرخ آتش یکسان، با افزایش میزان تخلخل زمان برگشت شعله افزایش می‌یابد. اما بدلیل تغییر در موقعیت شعله در ناحیه احتراق، میزان حرارت دریافتی در ناحیه پیش‌گرمایش متغیر است. یعنی با تغییر نرخ آتش و در یک تخلخل ثابت دمای ناحیه پیش‌گرمایش روند معینی را ارائه نمی‌کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت ملی گاز ایران به دلیل تقبل بخشی از هزینه‌های ساخت دستگاه تشکر می‌نمایند.

مراجع

۱. Bakaul, C. E., 2003, "*Industrial Burners handbook*", CRC Press, sections 11-13.
۲. Mößbauer, S., Pickenäcker, O., Pickenäcker, K., and Trimis, D., "Application of the Porous Burner Technology in Energy- and Heat-Engineering". *Clean Air 3* (2), 2002.
۳. Howell, J.R., Hall, M.J., and Ellzey, J.L., 1996, "Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media". *Progresses in Energy and Combustion Science*, 22, pp.121-145.
۴. Wood, S., and Harris, A.T., "Porous burners for lean burn applications", 2008, *Progresses in Energy and Combustion Science*, 34, pp. 667-684.
۵. Abdul Mujeebu, M., Abdullah, M.Z., Abu Bakar, M.Z., Mohamad, A.A., Muhad, R.M.N., and Abdullah, M.K., 2009. "Combustion in porous media and its applications –A comprehensive survey". *Journal of Environmental Management*, 90, pp.2278-2312.
۶. Kotani, Y., and Takeno, T., 1982. "An Experimental Study on Stability and Combustion Characteristics of an Excess Enthalpy Flame". *Proceeding Combustion Institute*, 19, pp.1503-1509.
۷. Itaya, Y., Miyoshi, K., Maeda, S. and Hasatani, M., 1992. "Surface Combustion of a Premixed Methane-air Gas on a Porous Ceramic". *International Chemical Engineering*, 32(1), pp.123-131.
۸. Mital, R., Gore, J.P., and Viskanta, R., 1997. "A Study of the Structure of Submerged Reaction Zone in Porous Ceramic Radiant Burners". *Combustion and Flame*, 111, pp. 175-184.
۹. Brenner, G., Pickenäcker, K., Pickenäcker, O., Trimis, D., Wawrzinek, K., and Weber, T., 2000. "Numerical and Experimental Investigation of Matrix-Stabilized Methane/Air Combustion in Porous Inert Media". *Combustion and Flame*, 123, pp. 201-213.
۱۰. Mathis W. Jr., and Ellzey, J.L., 2003. "Flame stabilization, operating range, and emissions for a methane/air porous burner", *Combustion Science and Technology*, 175, pp. 825-839.
۱۱. J., and Ellzey, J.L., 2005. "Subadiabatic and Superadiabatic Performance of a Two-Section Porous .Vogel B Burner", *Combustion Science and Technology*, 177, pp.1323-1338.
۱۲. هاشمی، س.ع. م.، امانی، ج. عطوف، ح.، "بررسی تجربی پایداری شعله در محیط متخلخل کاربرد سیلیسیم"، مجله علمی-پژوهشی امیرکبیر، شماره ۲، سال ۱۳۸۹، ۴۲.