

بررسی تجربی پایداری شعله در محیط متخلخل ترکیبی فلزی - کرید سیلیسیم

سید عبدالمهدی هاشمی^{۱*}، رضا عبدالحی طاهری^۲

دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

(Hashemi@kashanu.ac.ir^{*})

چکیده

در مقاله حاضر عملکرد یک مشعل متخلخل تابشی از نوع سرامیک-فلز مورد تحلیل تجربی قرار گرفته است. محیط سرامیکی از جنس کرید سیلیسیم و محیط فلزی از جنس فولاد است. هدف از این مقاله بررسی کارکرد مشعل در مخلوط رقیق سوخت و هوا می باشد. نتایج حاصل از آزمایش ها نشان می دهد که محدوده مقادیری از نرخ آتش که در آن پایداری شعله رخ می دهد، با افزایش نسبت هم آری کاهش می یابد، به گونه ای که در نسبت هم آری ۰/۶۵ به ازای تمامی مقادیر نرخ آتش شعله پایدار است ولی در نسبت های هم آری ۰/۸۰ و ۰/۸۵ شعله خاموش می شود. پیش گرم کردن محیط متخلخل زمان پایداری را کاهش می دهد. با افزایش مقادیر نسبت هم آری، محل استقرار شعله به پایین محیط متخلخل منتقل می شود و در هیچ یک از این مقادیر شعله در محیط سرامیک تشکیل نمی شود. بیشترین تشعشع از محیط متخلخل در نسبت هم آری ۰/۶۵ مشاهده می شود. دمای محیط با افزایش نرخ آتش افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: محیط متخلخل - احتراق - پایداری شعله - موقعیت شعله

۱- مقدمه

تکنولوژی مشعل های متخلخل با داشتن ویژگی های برجسته ای چون افزایش محدوده دینامیکی توان، کاهش تولید آلودگی، کاهش حجم دستگاه و کاهش تولید سر و صدا و ... توانسته است که در بسیاری از شاخه های صنعتی همچون صنایع غذایی، نیروگاه ها و سامانه های گرمایش مکان های مسکونی و تجاری مورد استفاده و بهره برداری قرار گیرد [1]. مکانیزم انتقال حرارت در مشعل های معمولی از طریق هدایت و جابجایی می باشد که توسط محصولات احتراق صورت می گیرد. در حالیکه در مشعل های متخلخل، علاوه بر هدایت و جابجایی، مکانیزم تابشی نیز نقش بسیار عمده ای را در انتقال حرارت مشعل ایفا می کند. اجسام متخلخل دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به گازها هستند. بنابراین بواسطه آنها انتقال حرارت در خلاف جهت جریان مخلوط گاز از محصولات احتراق به مواد نسوخته میسر شده و منجر می شود تا دمای گاز بالادست (مخلوط نسوخته) به دمای اشتعال برسد. در نتیجه طول منطقه احتراق افزایش می یابد و این امر سرعت شعله را افزایش داده و در نتیجه محدوده شعله وری افزایش می یابد. عمده مواد و ترکیبات تشکیل دهنده محیط متخلخل در این مشعلها، سرامیک های پایدار شده و یا الیاف فلزی هستند. مواد پایه سرامیک ها عمدتاً شامل سلیکون کرباید (SiC)، آلومینا (Al_2O_3) و زیرکونیا (ZrO_2) می باشد. جنس الیاف فلزی نیز از آلیاژی مانند آهن-کروم-آلومنیوم و یا آلیاژهای نیکل است که مقاومت زیادی در برابر اکسید شدن در دماهای بالا را دارند [1] و [2].

احتراق در محیط های متخلخل به طور جدی از دهه ۶۰ میلادی به بعد مورد توجه قرار گرفته است. ایجاد اغتشاش در جریان احتراقی، اختلاط بهتر سوخت و هوا و بهبود مکانیزم احتراق در شعله های پیش مخلوط از اهداف اولیه بکارگیری محیط متخلخل در احتراق است. البته بعدها مزایای فراوان آنها باعث شد تا تحقیقات وسیعتر و بیشتری در این زمینه انجام شود.

۱- استادیار، دانشگاه کاشان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان

براساس آزمایشاتی که توسط بابکین [3] انجام گرفت، استقرار شعله در داخل جسم متخلخل تنها زمانی می‌تواند صورت گیرد که عدد پکلت تصحیح شده بزرگتر از ۶۵ باشد. عدد پکلت به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$pe = \frac{s_l d_m c_p \rho_f}{\lambda_f} \quad (1)$$

که در آن s_l سرعت شعله آرام، d_m قطر معادل حفره‌ها، c_p ظرفیت گرمایی ویژه گاز، ρ_f چگالی گاز و λ_f ضریب هدایت حرارتی گاز می‌باشد. البته قابل ذکر است که ۶۵ برای گاز شهری یا همان متان محاسبه شده است.

برنر و همکاران [4] بررسی عددی و آزمایشگاهی بر شعله‌ی پایدار در داخل محیط متخلخل انجام دادند. در مدل عددی آنها انتقال حرارت و الگوی جریان نسبتاً همگن برای محیط متخلخل ایجاد شده است. دستگاه آزمایشگاهی آنها مشعلی ۱۰kW با مقطع مستطیلی است که مبدل حرارتی در دیواره‌ی آن بکار رفته است و توسط آن شعله را در محلی خاص پایدار می‌کنند. جنس محیط متخلخل پایین دست از ساختار لایه‌ای Al_2O_3 و SiC می‌باشد. آنها پروفیل دما و میزان آلاینده‌ها را در مبدل بدست آوردند و با نتایج عددی مقایسه نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با کاهش نسبت هم‌ارزی رقیق، هم دمای گاز و هم دمای جامد کاهش می‌یابد.

ساث و همکاران [5] مطالعه‌ی آزمایشگاهی و تئوری در زمینه‌ی کارکرد مشعل‌های تابشی انجام دادند. در این مطالعه پایداری و خواص حرارتی مخلوط رقیق متان- هوا بررسی گردید. محیط متخلخل از جنس سرامیک فومی لیتیم آلومینا سیلیکات (LAS) است. در این مطالعه ناحیه متخلخل دارای ضخامت ۵/۱cm و قطر محیط متخلخل سرامیکی بیش از ۱۲/۲cm و میزان تخلخل برحسب ppc^3 برابر ۳/۹۴ است. احتراق به دو صورت پایدار می‌شود. در یک نوع شعله در نیمه‌ی بالادست محیط متخلخل و در دیگری در لبه‌ی پایین دست محیط قرار می‌گیرد. مدل‌سازی عددی نیز همین نتیجه را پیش‌بینی می‌کند. نرخ سوختن در این آزمایش از سوختن شعله‌ی آرام بیشتر شده است. در دو حالت ذکر شده سرعت شعله بیش از حالتی است که شعله در وسط محیط قرار دارد. همچنین در نسبت هم‌ارزی ۰/۵ شعله در پایین دست جریان با سرعت شعله‌ی ۱۵/۲ تا ۱۷/۳cm/s پایدار می‌شود.

دیامانتیس و همکاران [6] شعله‌ی پیش مخلوط را در داخل محیط متخلخل مدل‌سازی کردند. مدل آنها ساختار شعله را در محیط تک لایه و دولایه بررسی می‌کرد. آنها مدل تابشی داخل محیط را بدون هیچ ساده‌سازی حل کردند. نتایج نشان داد که در شعله‌ی پایدار شده‌ی سطحی سرعت کمتر از سرعت شعله‌ی آرام است. در مقابل در شعله‌های مدفون، سرعت شعله بیش از سرعت شعله‌ی آرام خواهد بود. بنابراین در شعله‌ی مدفون در یک نسبت هم‌ارزی ضریب انتقال حرارت حجمی کمتر از شعله‌ی آزاد می‌باشد.

مین و همکاران [7] مطالعه‌ی تئوری و تجربی در زمینه‌ی احتراق در محیط‌های متخلخل انجام دادند. آنها در این تحلیل از سرامیک‌های لانه زنبوری استفاده کردند. این محیط‌ها بصورت استوانه‌ای و دارای قطر ۷/۶cm و طول ۱/۹cm و دارای تخلخل ۷۵٪ است. جنس محیط‌ها از منیزیم آلومینا سیلیکات می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بازه‌ی شعله‌پذیری و پایداری شعله در مقایسه با شعله‌ی آزاد بیشتر شده است. همچنین تحلیل عددی نشان می‌دهد شعله در پایین دست جریان پایدار می‌شود اما به دلیل وجود تلفات حرارتی، آزمایشات این رفتار را نشان نمی‌دهد. همچنین در نسبت هم‌ارزی ۰/۴۹ و ۰/۶۶ سرعت شعله‌ی پایدار از سرعت شعله‌ی آرام بیشتر است.

در زمینه مشعل‌های متخلخل با محیط فلزی نسبت به مشعل‌های با محیط سرامیکی تحقیقات کمتری صورت گرفته است. مزیت مهم این‌گونه مشعل‌ها راندمان بالای تشعشعی و عیب آنها پایین بودن حداکثر دمای قابل تحمل محیط متخلخل نسبت به محیط‌های سرامیکی می‌باشد.

کریستو و کریشنامورتی [8] تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بر روی یک نمونه مشعل با محیط ساخته شده از توری‌های فلزی انجام دادند. دو نوع مشعل با اشکال مسطح و استوانه‌ای ساخته شدند که هر دو از توری‌های فلزی از جنس اینکونل ۶۰۱ (Inconel 601) که آلیاژی است از نیکل-کرم و آهن استفاده می‌کردند. این آلیاژ دارای خواص مکانیکی فوق‌العاده بوده و در برابر اکسید شدن تا دمای 1100°C مقاوم است. مشعل استوانه‌ای دارای قطر ۴۰ میلی‌متر و طول ۱۳۵ میلی‌متر است و تنها از ۸۲ سانتی‌متر مربع از سطح استوانه استفاده می‌شود. مشعل مسطح دارای ابعاد ۱۶۰ در ۱۶۰ میلی‌متر بوده و دارای مساحت ۲۷۰ سانتی‌متر مربع می‌باشد. سه لایه از توری به‌گونه‌ای به یکدیگر بافته شده‌اند تا ضخامت مؤثر ۳ میلی‌متر بدست آید. این عمل موجب بهبود پایداری شعله در محیط و افزایش خواص مکانیکی و همچنین کاهش سروصدا در اثر شوک‌های حرارتی می‌شود. در این آزمایش از سوخت گاز مایع (LPG) مخلوط شده با هوای فشرده استفاده شد. نتایج نشان داد که مقادیر ماکزیمم دمای سطح برای هر دو نوع مشعل مسطح و استوانه‌ای وابسته به نرخ‌آتش است و با افزایش میزان نرخ‌آتش، دمای سطح بیشتری بدست می‌آید. همچنین مقدار نسبت هم‌ارزی که بیشترین دمای سطح حاصل می‌شود کوچکتر از یک بوده و مخلوط مربوط به دمای سطح بیشینه، مقداری رقیق‌تر از مخلوط استوکیومتری است و راندمان تشعشعی تابع مقدار نسبت هم‌ارزی و نرخ‌آتش بوده و برای یک نرخ‌آتش ثابت راندمان تشعشعی ماکزیمم در نسبت هم‌ارزی کمتر از یک رخ می‌دهد. همچنین با افزایش نرخ‌آتش مقدار راندمان تشعشعی کاهش می‌یابد.

لئوناردی و همکارانش [9] آزمایش‌هایی بر روی مشعل مربعی شکل با ابعاد ۳۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متر با محیط متخلخل با استفاده از فیبر فلزی از جنس فکراالوی (Fecralloy) انجام دادند. این فلز آلیاژی از آهن، کروم و آلومینیوم است که مقاومت خوبی در برابر اکسید شدن تا دمای 1000°C از خود نشان می‌دهد. در این تحقیق، آزمایش‌ها با یک لایه و دو لایه توری انجام شده و دمای سطح مشعل و دمای گاز و همچنین تشعشع اندازه‌گیری شدند. آزمایش‌ها در هفت نرخ‌آتش در رنج بین 170 kW/m^2 تا 340 kW/m^2 و سه نسبت هم‌ارزی انجام شدند. نتایج نشان داد که دمای سطح مشعل با افزایش نرخ‌آتش افزایش می‌یابد و این مقدار برای سطح با پوشش یک لایه نسبت به دو لایه پایین‌تر خواهد بود و دمای گازهای داغ حاصل از احتراق با افزایش نرخ‌آتش بالاتر خواهد رفت. همچنین دمای گازها برای مشعل با پوشش دو لایه نسبت به یک لایه افزایش می‌یابد و راندمان تشعشعی و کلی برای مشعل دو لایه نسبت به مشعل با پوشش یک لایه اندکی افزایش خواهد داشت.

هدف از این تحقیق، بررسی کارکرد مشعل متخلخل با محیط ترکیبی کاربید سیلیسیوم و فلز در مخلوط رقیق سوخت و هوا می‌باشد. همچنین پایداری شعله و موقعیت استقرار آن بررسی شده است. پیش گرمایش مخلوط سوخت و هوا در این آزمایش توسط محیط فلزی انجام می‌شود. در دسترس بودن و سهولت در ساخت از جمله مزایای محیط فلزی در مقایسه با محیط سرامیکی می‌باشد. با توجه به نکات فوق و همچنین برای بررسی عملکرد مشعل با محیط مرکب از فلز و سرامیک، این تحقیق انجام شده است. محیط متخلخل شامل ترکیبی از توری فلزی از جنس فولاد ضد زنگ با مش بندی ۲/۵ حفره در سانتی‌متر و ضخامت ۱۰ mm و سنگ سرامیکی از جنس کاربید سیلیسیوم با تخلخل ۲۰ ppc و ضخامت ۲۲ mm است. این ترکیب در نشیمن‌گاه مخصوصی که بدین منظور طراحی و ساخته شده است، به گونه‌ای قرار می‌گیرند که محیط فلزی در زیر محیط سرامیکی می‌باشد. تمامی آزمایش‌ها با سوخت گاز طبیعی انجام شده است و نرخ‌آتش (firing rate) در محدوده $182/9\text{ kW/m}^2$ تا 329 kW/m^2 می‌باشد.

۲- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایشی که برای این منظور ساخته شده است شامل قسمت‌های مختلفی است. در این دستگاه از یک پیش مخلوط‌کن هوا و سوخت استفاده می‌شود. این قطعه به گونه‌ای طراحی شده است که ابتدا هوای مصرفی از درون مجرا وارد

شده و سپس گاز به آن اضافه می‌شود. همچنین یک پیچ تنظیم، مقدار دبی ورودی مخلوط سوخت و هوا به داخل محفظه احتراق را کنترل می‌کند. شکل ۱ دستگاه ساخته شده را به همراه پیش مخلوط کن نمایش می‌دهد.



شکل ۱- دستگاه مشعل متخلخل

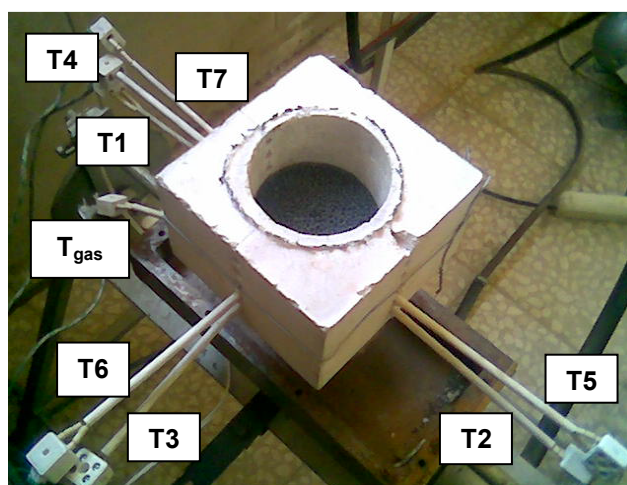
با توجه به دامنهی دبی‌های مورد استفاده از دو عدد روتامتر مناسب برای اندازه‌گیری دبی هوا و گاز استفاده شده است. هوای مورد نیاز توسط کمپرسور تأمین می‌شود و گاز مصرفی، گاز طبیعی شهری است. به منظور تأمین هوا با فشار ۱ bar از یک رگولاتور تنظیم فشار (در اصطلاح فنی مانومتر) استفاده می‌شود. همچنین یک فیلتر هوا بر سر راه هوای ورودی از کمپرسور به رتامتر نصب شده است تا حتی الامکان از راه یافتن قطرات آب ناشی از فشرده‌سازی هوا در کمپرسور، به داخل رتامتر جلوگیری شود. ورود این قطرات آب به داخل رتامتر، باعث می‌شود که دقت اندازه‌گیری دبی هوا کاهش یابد. نحوه اتصال رتامترها و کمپرسور و همچنین قرار گرفتن فیلتر هوا در شکل ۲ به طور کامل نشان داده شده است.



شکل ۲- نحوه اتصال فیلتر هوا و روتامترها به کمپرسور

اندازه‌گیری دمای جانبی محیط متخلخل با استفاده از ترموکوپل‌های نوع k انجام می‌شود. سر فلزی ترموکوپل دقیقاً با سنگ سرامیکی در تماس است. ترموکوپل‌ها به وسیله دو مائول تیپ k و g، مبدل پورت و منبع تغذیه به دستگاه رایانه متصل می‌شود. دمای ترموکوپل‌ها در هر ثانیه با استفاده از نرم افزار lab viwe قابل اندازه‌گیری است. دمایی که به عنوان دمای محیط متخلخل اندازه‌گیری می‌شوند باید در حالت پایدار شعله خوانده شوند. در این آزمایش متناسب با شکل محیط‌های متخلخل و برای هم محور قرار گرفتن آنها نگهدارنده‌ای با مقاومت حرارتی بالا ساخته شده است و در سه طرف آن سوراخ‌هایی

برای نصب ترموکوپل تعبیه شده است. برای تعیین موقعیت شعله و تغییرات آن، دما در هفت نقطه از محیط و دمای مخلوط سوخت ورودی اندازه گیری می شود. ترموکوپل ها به فاصله ۵ mm از یکدیگر و در دور تا دور محیط قرار دارند و اولین ترموکوپل ۳ mm زیر نشیمن گاه محیط می باشد. ترموکوپل های شماره یک تا شماره سه در محیط فلزی و ترموکوپل های شماره چهار تا شماره هفت در محیط سرامیکی قرار دارند. موقعیت ترموکوپل ها در شکل ۳ نشان داده شده است. قابل ذکر است که دمای اندازه گیری شده دمای سطح جانبی محیط متخلخل است که با دمای مرکز آن متفاوت است (چنانچه پیرامون مشعل عایق باشد و اتلاف حرارت جانبی وجود نداشته باشد دما در پیرامون و مرکز محیط یکی است). با توجه به این موضوع توزیع دمای پیرامون بیانگر توزیع دما در مرکز محیط نیز خواهد بود.



شکل ۳- نحوه قرار گرفتن ترموکوپل ها

۳- نتایج آزمایش

دبی گاز طبیعی و دبی هوای ورودی پارامترهایی هستند که در این آزمایش ها تغییر می کنند. ضخامت و تخلخل محیط سرامیکی و فلزی در طول آزمایش، ثابت است.

نتایج مربوط به چنین آزمایش هایی در منابع مختلف یا بر حسب نرخ آتش [10] یا بر حسب نسبت هم آری (Equivalence Ratio) [11] ارائه می شوند که بستگی به نحوه آزمایش دارند. در این تحقیق با توجه به اینکه آزمایشات بر حسب تغییر دبی جرمی سوخت و تنظیم دبی هوا است، لذا نتایج بر حسب نرخ آتش بیان می شوند. نرخ آتش بیانگر میزان انرژی شیمیایی سوخت بر واحد سطح بوده و از رابطه (۲) بدست می آید.

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

در رابطه ی (۲)، LHV ارزش حرارتی پایین سوخت، $\dot{m}_f$ دبی جرمی سوخت و A سطح مقطع مشعل می باشد. سطح مقطع مشعل دستگاه مورد آزمایش $63/62 \text{ cm}^2$ می باشد.

پارامتر دیگری که در این جا مورد استفاده قرار می گیرد، نسبت هم آری است و به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\phi = \frac{FA_a}{FA_s} \quad (3)$$

در رابطه (۳) منظور از FA_a نسبت سوخت به هوای واقعی که در واکنش حضور دارد می باشد و منظور از FA_s نسبت سوخت به هوای استوکیومتری است.

آزمایش‌ها برای نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ تا ۰/۸۵ انجام شده است که در هر نسبت هم‌ارزی، نرخ‌آتش بین مقادیر $182/9 \text{ kW/m}^2$ تا $329/2 \text{ kW/m}^2$ متغیر است. بدین منظور دبی هوا و سوخت به گونه‌ای تنظیم می‌شود که نسبت هم‌ارزی ثابت باشد.

۳-۱- پایدار سازی شعله در محیط

پایدار شدن شعله در محیط متخلخل وابسته به زمان می‌باشد و مدت زمان پایداری به عواملی همچون جنس محیط و پیش گرم بودن آن بستگی دارد. آزمایشات نشان داد که در نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ شعله بین مقادیر نرخ‌آتش $182/9 \text{ kW/m}^2$ تا $329/2 \text{ kW/m}^2$ تشکیل و پایدار می‌شود. تشکیل شعله و پایداری آن در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۰ بین مقادیر نرخ‌آتش $256/0 \text{ kW/m}^2$ تا $329/2 \text{ kW/m}^2$ است و در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ بین مقادیر $292/6 \text{ kW/m}^2$ تا $329/2 \text{ kW/m}^2$ می‌باشد. در نسبت های هم‌ارزی ۰/۸۰ و ۰/۸۵ شعله پایدار تشکیل نمی‌شود و خاموش می‌شود. پایداری شعله زمانی بدست می‌آید که دماهای اندازه گیری شده تقریباً مستقل از زمان شوند.

شکل (۴-الف) نحوه تغییرات دما در هفت نقطه از محیط و سوخت و هوای ورودی را بر حسب زمان در نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ و نرخ‌آتش $329/2 \text{ kW/m}^2$ نشان می‌دهد. در این حالت زمان پایداری شعله در حدود یک ساعت می‌باشد. بیشترین مقدار دما متعلق به ترموکوپل شماره یک است که در پایین محیط فلزی قرار دارد و کمترین مقدار دما مربوط به ترموکوپل شماره هفت است که روی سطح محیط سرامیک می‌باشد. نقطه عطفی که در منحنی تمامی دماها و پس از حدود پنج دقیقه مشاهده می‌شود ناشی از برگشت شعله (Flash back) در این لحظه است. کاهش ناگهانی دما در تمامی نقاط به غیر از دما در پایین محیط فلزی و دمای مخلوط سوخت و هوای ورودی به دلیل عقب‌نشینی شعله به سمت پایین محیط فلزی است. هر مقدار که به سطح محیط سرامیکی نزدیک می‌شویم، شدت تغییرات دمایی در این لحظه کاهش می‌یابد. پس از گذشت مدت زمانی در حدود پنج دقیقه دماها دارای روند افزایشی تا زمان پایدار شدن شعله می‌باشند که این امر بیانگر استقرار شعله پس از عمل برگشت و تبادل حرارتی با محیط متخلخل سرامیکی و محیط فلزی می‌باشد.

شکل (۴-ب) نحوه تغییرات دما بر حسب زمان را برای نسبت هم‌ارزی ۰/۸۵ و نرخ‌آتش $329/2 \text{ kW/m}^2$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل، دماها پس از حدود ۱۵ دقیقه به طور ناگهانی کاهش می‌یابند. این کاهش ناگهانی دما همراه با از بین رفتن روشنایی محیط (خاموشی شعله) و استشمام بوی مخلوط سوخت و هوای نسوخته می‌باشد. با مشاهده این حالت و به دلیل مسائل ایمنی آزمایش قطع می‌شود. با توجه به این نکته که اتلاف حرارتی عامل تأثیرگذار در خاموشی شعله است، این پدیده زمانی رخ می‌دهد که حرارت اتلافی از طریق هدایت بیشتر از انرژی ناشی از احتراق باشد.

۳-۲- بررسی موقعیت استقرار شعله

موقعیت استقرار شعله عامل تعیین کننده‌ای در عملکرد آن است. بررسی موقعیت شعله با داشتن توزیع دما در محیط متخلخل امکان پذیر می‌باشد. موقعیت بیشترین مقدار دما، محل تشکیل شعله را نشان می‌دهد.

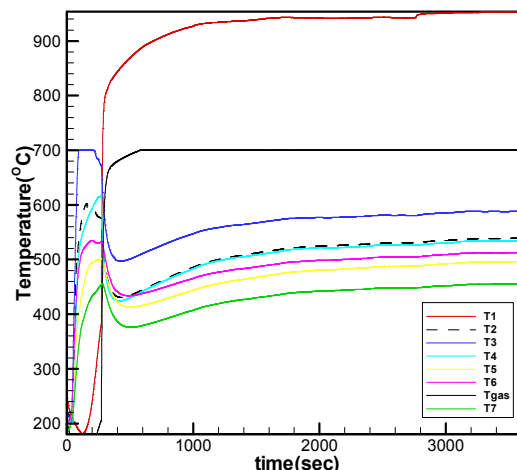
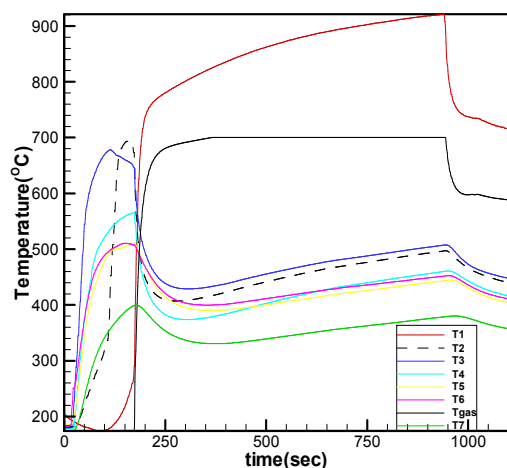
در شکل (۵-الف) نحوه تغییرات دما بر حسب مکان، از محل ورود مخلوط سوخت و هوا تا محل آخرین ترموکوپل، در نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ و برای نرخ‌آتش‌های متفاوت نشان داده شده است. موقعیت مکانی 40 mm - محل ورود مخلوط سوخت و هوا و 30 mm به ترتیب پایین‌ترین و بالاترین نقطه در محیط متخلخل است. همان گونه که در شکل مشخص است در نرخ‌آتش $329/2 \text{ kW/m}^2$ محل شعله در بیرون محیط و در نرخ‌آتش $292/6 \text{ kW/m}^2$ در 5 mm میلیمتری از کف محیط فلزی و در بقیه مقادیر نرخ‌آتش در 10 mm میلیمتری از آن قرار دارد. در هیچ یک از مقادیر نرخ‌آتش شعله در محیط سرامیکی وجود ندارد. همانطور که در شکل دیده می‌شود با افزایش نرخ‌آتش دما در محیط سرامیک و فلز افزایش می‌یابد. افزایش دما در

محیط فلز موجی می‌شود که مخلوط نسوخته زودتر به دمای اشتعال برسد و شعله شروع به حرکت به سمت بالا دست جریان نماید. این روند منجر به عقب نشینی شعله می‌شود. به علت وجود شعله در داخل محیط فلزی و یا در مجاورت آن، دما در محیط سرامیکی کمتر از محیط فلزی می‌باشد.

شکل های (۵-ب) و (۵-ج) تغییرات دما بر حسب مکان را به ترتیب برای نسبت های هم‌ارزی ۰/۷۰ و ۰/۷۵ نشان می‌دهد. این دو شکل نشان می‌دهد که محل استقرار شعله در بیرون محیط می‌باشد. در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۰ روند تغییرات دمایی در محیط متخلخل برای هر سه مقدار نرخ‌آتش یکسان است و دما با افزایش نرخ‌آتش بیشتر می‌شود. مورد مشترکی که در سه قسمت شکل ۵ دیده می‌شود، این است که در هر سه نسبت هم‌ارزی وقتی که شعله در پایین محیط فلزی تشکیل می‌شود دمای مخلوط سوخت و هوای ورودی یکسان و برابر ۷۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. تغییرات دما در نزدیک شعله و ابتدای ناحیه فلزی شدید بوده و پس از آن تغییرات به کندی صورت می‌گیرد. دما در ابتدا کاهش یافته است، سپس در نزدیکی سطح محیط افزایش و دوباره کاهش می‌یابد. علت افزایش دما در فصل مشترک می‌تواند اختلاف ضریب هدایت حرارتی دو محیط باشد.

سطح تابشی مشعل در نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ و نرخ‌آتش $256/0 \text{ kW/m}^2$ در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. در این شکل شعله به سطح محیط نزدیک می‌باشد. هر چه شعله به سطح محیط نزدیکتر باشد، مشعل برای مقاصد تابشی تناسب بیشتری خواهد داشت.

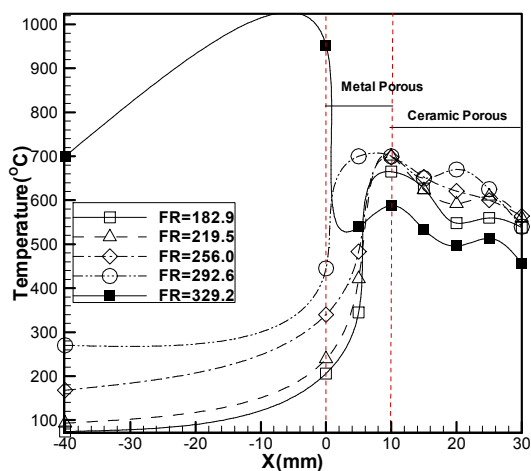
شکل (۶-ب) نیز سطح تابشی مشعل را در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ و در نرخ‌آتش $329/2 \text{ kW/m}^2$ نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل نشان داده شده است. شعله در پایین محیط فلزی است و محیط متخلخل روشنایی کمتری دارد. تغییرات دمایی تمامی ترموکوپل‌ها برحسب نرخ‌آتش در نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل نشان داده شده است با افزایش نرخ‌آتش دمای سوخت و هوای ورودی و دمای ترموکوپل شماره یک (T_1) افزایش می‌یابد ولی بقیه دماها در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند. این روند بیانگر این است که با افزایش نرخ‌آتش، شعله به سمت کف محیط متخلخل حرکت می‌کند و با افزایش تبادل حرارتی با مخلوط سوخت و هوا دمای آن را افزایش می‌دهد.



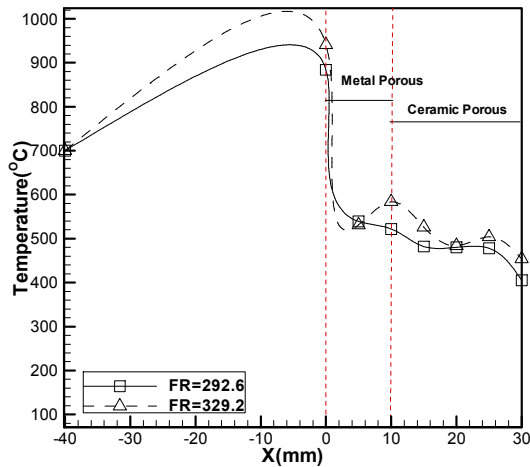
ب- نرخ‌آتش $329/2 \text{ kW/m}^2$ و نسبت هم‌ارزی ۰/۸۵

الف- نرخ‌آتش $256/0 \text{ kW/m}^2$ و نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵

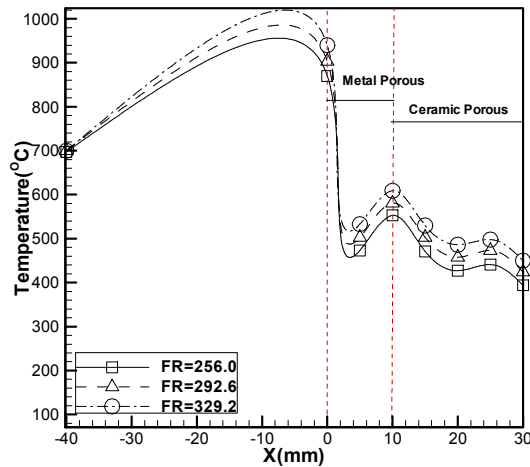
شکل ۴- تغییرات دما بر حسب زمان



الف - نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵



ج - نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵

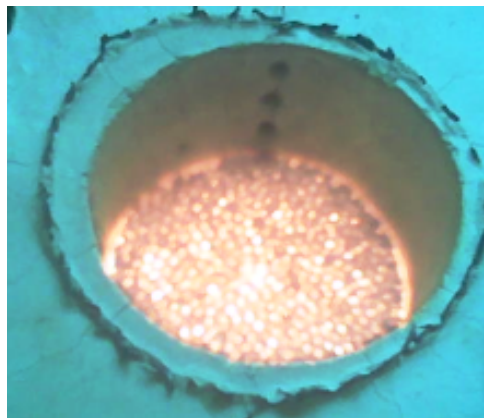


ب - نسبت هم‌ارزی ۰/۷۰

شکل ۵- تغییرات دما بر حسب موقعیت برای نرخ‌آتش‌های متفاوت

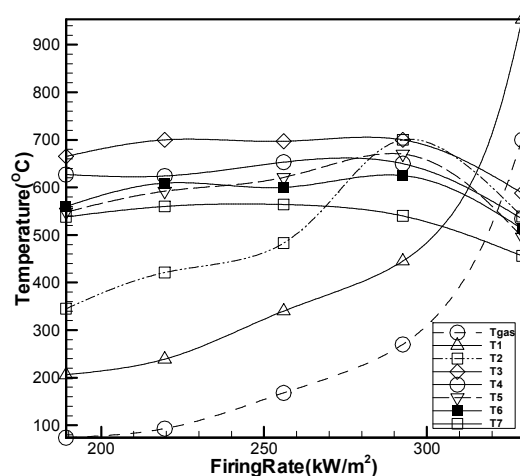


ب- نرخ آتش $239/2 \text{ kW/m}^2$ و نسبت هم‌ارزی $0/75$



الف- نرخ آتش $256/0 \text{ kW/m}^2$ و نسبت هم‌ارزی $0/65$

شکل ۶- تصویر سطح تابشی از مشعل



شکل ۷- تغییرات دما بر حسب نرخ آتش در نسبت هم‌ارزی $0/65$

۴- نتیجه گیری

در این مقاله کارکرد مشعل متخلخل با محیط ترکیبی کاربید سیلیسیوم و فلز در مخلوط رقیق سوخت و هوا به طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفت است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که محدوده مقادیری از نرخ آتش که در آن پایداری شعله رخ می‌دهد، با افزایش نسبت هم‌ارزی کاهش می‌یابد، به گونه ای که در نسبت هم‌ارزی $0/65$ به ازای تمامی مقادیر نرخ آتش شعله پایدار است ولی در نسبت‌های هم‌ارزی $0/80$ و $0/85$ شعله خاموش می‌شود. پیش گرم کردن محیط متخلخل زمان پایداری را کاهش می‌دهد. با افزایش مقادیر نسبت هم‌ارزی، محل استقرار شعله به پایین محیط متخلخل منتقل می‌شود و در هیچ یک از این مقادیر شعله در محیط سرامیک تشکیل نمی‌شود. بیشترین تشعشع از محیط متخلخل در نسبت



هم‌ارزی ۰/۶۵ مشاهده می‌شود. دمای محیط با افزایش نرخ‌آتش افزایش می‌یابد.

مراجع

- 1- Mobbauer, S., Pickenacker, O., Pickenacker, K., and Trimis, D., "*Application of the Porous Burner Technology in Energy-and Heat-Engineering*", Proceeding of 5th Int. Conf. on Technologies and Combustion for a Clean Enviro. : Clean Air. Lisbon, Vol. 3, pp. 185-198, 2002.
- 2- Christo, F.C., "*A Parametric Analysis of a Coupled Chemistry-Radiation Model in Poious Media*", DSTO—Research Report RR-0188, 2000.
- 3- Babkin, V.S., Korzhavin, A.A., and Bunev, V.A., "*Propagation of Premixed Gaseous Explosion flame in porous media*", Combustion and Flame, Vol. 87, pp. 182-190, 1991.
- 4- Brenner, G., Pickenäcker, K., Pickenäcker, O., Trimis, D., Wawrzinek, K., and Weber, T., "*Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methan/air combustion in porous inert media*", Combustion and Flame, Vol. 123, pp. 201-213, 2000.
- 5- Sathe, S.B., Kulkarni, M.R., Peck, R.E., and Tong, T.W., "*An expprimental and theoretical study of porous radiant burner performance* ", Symposium (International) on Combustion, Vol. 23, pp. 1011-1018, 1991.
- 6- Diamantis, D.J., Mastorakos, E., and Goussis, D.A., "*Simulations of premixed combustion in porous media*", Combustion Theory and Modeling , Vol. 6, pp. 383-411, 2002.
- 7- Min, D.K., and Shin, H.D., "*Laminar premixed flame stabilized inside a honeycomb ceramic*", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 34, pp. 341-356, 1991.
- 8- Christo, F.C., and Krishnamoorthy, L., "*Experimental and Numerical Analysis of Thermal Radiation of a Porous Radiant Burner* ", DSTO . Technical Report (*in press*), 2001.
- 9- Leonardi, S.A., Viskanta, R., and Gore, J.P., "*Radiation and thermal performance measurements of a metal fiber burner*", Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol.73, pp. 491-501, 2002.
- 10- Howell, J., Hall, M., and Ellzey, L., "*Combustion of Hydrocarbon Fuel within Porous Inert Media*", Prog. Energy Combustion Sci., Vol. 22, pp 121-145, 1996.
- 11- Takeno, T., and Sato, K., "*A theoretical and experimental study on an excess enthalpy flame, combustion in reactive systems*", Proceedings of the Seventh International Colloquium on Gas dynamics, Honolulu (Ed. J. P. Boris), Vol. 76, pp. 596–610, 1981.