

بررسی تجربی پایداری شعله در محیط متخلخل کاربرد سیلیسیم

سید عبدالمهدی هاشمی^{۱*}؛ جعفرامانی^۲؛ حسین عطوف^۳

چکیده

در این پژوهش، اثر نسبت هم‌ارزی، چگالی حفره‌ی محیط متخلخل و نرخ آتش بر پایداری شعله در محیط متخلخل سرامیکی SiC به طور تجربی بررسی شده است. بر اساس موقعیت قرارگیری شعله، چهار رژیم شعله شامل سطحی، مدفون، زیر سطحی و برخاسته دیده شد. رژیم شعله‌ی سطحی به صورت شعله‌ی غنی به عنوان یک آستانه‌ی پایداری و شعله‌ی برخاسته برای مخلوط رقیق به عنوان آستانه‌ی دیگر پایداری در محیط متخلخل هستند. تغییر چگالی حفره محیط متخلخل در مقادیر نسبت هم‌ارزی برای آستانه‌ی پایداری شعله برخاسته، تغییر چندانی ایجاد نمی‌کند اما برای شعله سطحی، افزایش چگالی حفره باعث کاهش تغییرات نسبت هم‌ارزی می‌شود. همچنین افزایش نرخ آتش، محدوده‌ی پایداری شعله در داخل محیط متخلخل را کاهش می‌دهد. موقعیت شعله با استفاده از توزیع دمای محوری در بدنه مشعل تخمین زده می‌شود. روند تغییر دما برحسب نسبت هم‌ارزی در یک نرخ آتش، به طور تقریب مشابه بوده ولی این روند برای نرخ آتش‌های مختلف متفاوت است. با توجه به نتایج بدست آمده، شعله در دو ناحیه‌ی نزدیک سطح فوقانی و در نیمه‌ی پایین محیط متخلخل، پایدار می‌شود.

کلمات کلیدی: مشعل متخلخل، محیط متخلخل SiC، پایداری شعله، منحنی دمای شعله.

Experimental Study of Flame Stability in SiC Porous Media

S. A. Hashemi, J. Amani, H. Atoof

ABSTRACT

In this paper, the effect of equivalence ratio, pore diameter and firing rate on flame stability in a SiC porous media has been studied experimentally. Based on the position of the flame, four regimes are observed as follows: Surface flame, submerged flame, under-surface and detached flame. The surface flame regime as a rich flame is one of the stability threshold and the detached flame as a lean flame is the other threshold of the flame stability. Change the pore diameter causes so little change in equivalence ratios corresponding to the detached flame threshold but increasing the pore diameter decreases the equivalence ratio changes for the surface flame. Also increasing the firing rate decreases flame stability range in the porous media. Flame position was estimated using axial temperature distribution in the sidewall of the burner. Temperature profiles versus equivalence ratio in a firing rate are approximately similar but the profiles are different for various firing rates. According to the results, flame is stable in near the upper surface or in the half bottom of the porous media.

KEYWORDS: Porous burner, SiC porous media, Flame stability, Flame temperature profile

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱۱/۳۰

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۲/۲۰

^۱ نویسنده مسئول و استادیار گروه مکانیک، دانشگاه کاشان؛ hashemi@kashanu.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه کاشان؛ j.amani@grad.kashanu.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ h.atooof@me.iut.ac.ir

۱- مقدمه

فن آوری مشعل متخلخل، بر پایه احتراق در داخل یک محیط متخلخل است. دامنه کارکرد وسیع همراه با توان حرارتی بالا، ابعاد کوچک و انتشار اندک گازهای آلاینده، موجب بکارگیری این فن آوری در صنایعی مانند نیروگاه‌ها، خودروسازی و کاربردهای خانگی شده است.

با توجه به خواص ضعیف انتقال حرارت تابشی و هدایت در مخلوط گاز، این ایده پیشنهاد شد که با استفاده از خصوصیات حرارتی مناسب مواد جامد می‌توان نرخ انتقال حرارت به مخلوط ورودی به مشعل را افزایش داد. در مواد متخلخل انتقال حرارت از راه هدایت و تابش به میزان زیادی بیشتر از گازها است. به همین دلیل مخلوط ورودی به ناحیه احتراق به وسیله انتقال حرارت تابش و هدایت داخل ماده متخلخل پیش‌گرم می‌شود. هدایت حرارت و تابش صادر شده از ناحیه احتراق، باعث گرم شدن بالای محیط متخلخل می‌شود و این حرارت از راه انتقال حرارت جابجایی به مخلوط ورودی منتقل شده و سبب گرم شدن آن می‌شود. به دلیل ضریب جذب پایین گاز، بخش کمی از تابش صادره از ناحیه احتراق، به طور مستقیم سبب گرمایش مخلوط می‌شود.

بیشتر مواد و ترکیبات تشکیل‌دهنده محیط متخلخل در این مشعل‌ها، سرامیک‌های پایدار شده و یا الیاف فلزی هستند. مواد پایه‌ی سرامیک شامل سلیکون کرباید (SiC)، آلومینا (Al_2O_3) و زیرکونیا (ZrO_2) است. در الیاف فلزی نیز از آلیاژهایی استفاده می‌شود که مقاومت زیادی در برابر اکسید شدن در دماهای بالا را داشته باشند.

استفاده از فن آوری احتراق در محیط متخلخل مزیت‌های زیادی را در سیستم‌های احتراقی ایجاد می‌نماید. از برتری‌های مشعل‌های متخلخل نسبت به مشعل‌های معمولی می‌توان به بازده تابشی بالا، کم بودن آلودگی ناشی از NO_x ، سرعت شعله بالا، کاهش حجم مشعل، افزایش محدوده شعله‌وری، توزیع یکنواخت حرارت و کاهش سر و صدا اشاره نمود. مزیت‌های فوق سبب کاربرد فراوان این مشعل‌ها در صنایع مختلفی مانند خشک کردن چوب و کاغذ، خشک کردن رنگ، بازپخت پلاستیک‌ها، صنایع غذایی و پخت نان شده است [۵].

هاشمی و همکاران [۲] شعله‌ی پایدار در داخل محیط متخلخل لایه‌ای از جنس فلزی را بررسی نمودند. آنها از فشردن لایه‌های فلزی، سه محیط با ضخامت‌ها و چگالی حفره‌ی متفاوت ایجاد نمودند و دمای سطح و راندمان تابشی را

اندازه‌گیری نمودند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش ضخامت محیط، دمای سطح و بازده تابشی مشعل کاهش و با افزایش دبی سوخت و نرخ آتش، دمای سطح افزایش می‌یابد. این افزایش دما در نرخ آتش‌های کم، سریع بوده و با افزایش نرخ آتش کند می‌شود. همچنین با افزایش چگالی حفره، دمای سطح و بازده تابشی کاهش می‌یابد.

پس از آن، معتقدی‌فر [۳]، مطالعه‌ای تجربی در زمینه‌ی مشعل‌های متخلخل از نوع توری فولادی ضدزنگ انجام داد. در این بررسی از توری‌های سیمی با چگالی حفره ppc ۰/۲ و ppc ۰/۵ با ضخامت mm ۰/۷ و mm ۰/۵ استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها بر حسب دمای سطح و راندمان تابشی و برای ۵ نرخ آتش ارائه شدند. در این تحقیق از محیط‌های ۳ تا ۷ لایه و نیز یک محیط ترکیبی استفاده نموده و به این نتیجه رسیدند که بیشینه‌ی دمای سطح در محیط ۲ لایه در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ ایجاد می‌شود و بیشینه‌ی راندمان تابشی در نرخ آتش 98 kW/m^2 مقدار ۳۰٪ بدست می‌آید.

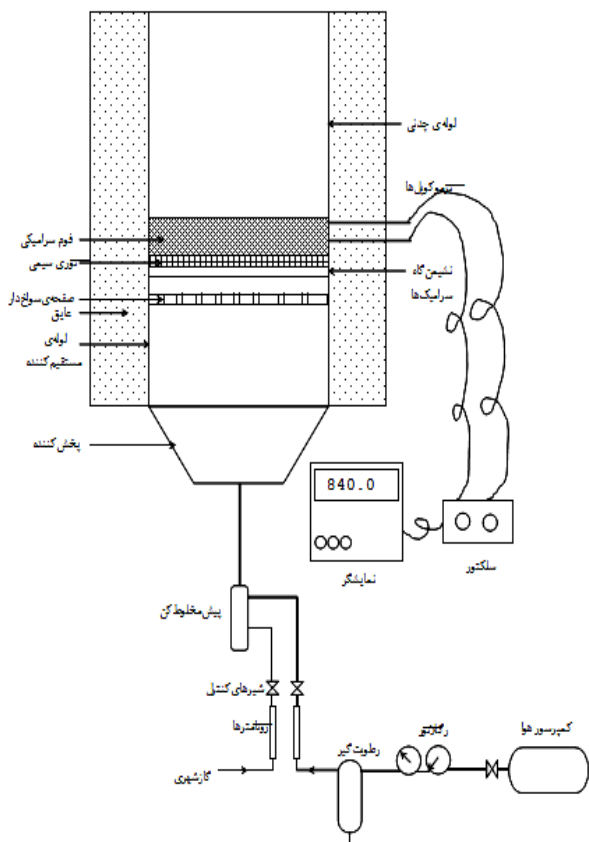
کوتانی و تاکنو [۱۱] در سال ۱۹۸۲ آزمایشی انجام دادند که در آن، احتراق پایدار حتی در نزدیکی نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۲ دیده شد. در این حالت سرعت شعله ۲۰ برابر شعله‌ی آزاد بدست آمده ولی حدود شعله‌وری تغییری نداشته است. در سال ۱۹۹۰، سات و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی در رابطه با تئوری مشعل تابشی با مخلوط متان و هوای رقیق و محیط متخلخل سرامیکی فومی لیتیم آلومینا سیلیکات (LAS)، به این نتیجه رسیدند که احتراق در دو دامنه پایدار می‌شود. یک نوع از شعله در نیمه‌ی پایین محیط متخلخل و دیگری در لبه‌ی بالایی قرار می‌گیرد.

مکینتاش و پروترو [۱۳] در تحلیلی که در سال ۱۹۹۱ انجام دادند دریافتند که برای احتراق سطحی مخلوط هوا و گاز در محیط متخلخل در یک سرعت مخلوط معین، حداقل دو ناحیه برای شعله‌ی پایدار وجود دارد که ناحیه اول در داخل مشعل بوده و ناحیه دیگر درست در پایین مشعل است. مین و همکاران [۱۴] در مطالعه‌ای تئوری و تجربی در سال ۱۹۹۱ دریافتند که در محیط‌های متخلخل لانه زنبوری استوانه‌ای، بازه‌ی شعله‌پذیری و پایداری شعله در مقایسه با شعله‌ی آزاد بیشتر شده است. ایتایا و همکاران [۱۵] در سال ۱۹۹۲، احتراق سطحی مخلوط هوا و متان در حالت پیش‌آمیخته در یک صفحه‌ی سرامیکی را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که در یک نسبت هم‌ارزی که سرعت سوزش مخلوط گازی به سرعت گاز حداقل است، بیشترین دمای سطح بدست می‌آید.

پایداری شعله به عوامل مختلفی مانند سرعت جریان، قطر متوسط حفره‌ها و خواص ترموفیزیکی و تابشی محیط متخلخل و همچنین ساختار دستگاه آزمایش بستگی دارد [۶]. بنابراین تحقیق به صورت تجربی در زمینه‌ی بررسی چگونگی پایداری شعله در یک مشعل متخلخل تک لایه با محیط فومی از جنس SiC انجام شده است. در نتیجه اثر عوامل مختلف بر پایداری شعله و محدوده‌ی پایداری بررسی شده و نیز شرایطی که در آن شعله در داخل محیط متخلخل به صورت پایا ایجاد می‌شود، مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- شرح دستگاه آزمایش

برای انجام آزمایش‌های مختلف، دستگاهی مانند شکل شماتیک (۱) ساخته شد. در این دستگاه برای ترکیب شدن بهتر گاز و هوا یک پیش‌مخلوط‌کن با قابلیت تنظیم دبی‌های گاز و هوا در نظر گرفته شد. محیط‌های متخلخل بکار رفته در آزمایش‌های انجام شده، از جنس SiC با سطح مقطع 64cm^2 و چگالی حفره‌ی ۱۰ ppi و ۲۰ ppi است. طبق شکل (۲) برای یافتن موقعیت شعله از ۶ عدد ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما در محیط متخلخل در سه طرف نگه‌دارنده‌ی سرامیکی، استفاده شده است. همچنین برای مطالعه‌ی پایداری رژیم شعله‌ی مدفون، از دو ترموکوپل استفاده شد به طوری که



شکل (۱): جزییات دستگاه آزمایش

هانامورا و همکاران [۱۶]، [۱۷] یک تحلیل عددی با هدف بررسی پایداری شعله در مشعل‌هایی با شعله‌ی سطحی براساس نسبت هم‌ارزی و سرعت جریان انجام دادند. میتال [۱۸] در سال ۱۹۹۷، پایداری شعله‌ی مدفون داخل محیط متخلخل سرامیکی با جنس‌های مختلف و مخلوط هوا و گاز متان را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که بین نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۶ تا ۰/۷ پرش شعله اتفاق می‌افتد. همچنین افزایش نرخ آتش باعث افزایش غیرخطی سرعت شعله می‌شود و از یک نرخ آتش به بعد شعله داخل محیط متخلخل نفوذ نموده و افزایش بیشتر آن باعث برگشت شعله می‌شود. در سال ۲۰۰۰ میلادی، برنر و همکارانش [۱۹] بررسی الگوی جریان همگن را به صورت عددی انجام داده و بررسی شعله‌ی پایدار داخل محیط متخلخل دو لایه‌ی Al_2O_3 و SiC را به صورت آزمایشگاهی دنبال نمودند. دیامانتیس و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۰۲ میلادی، شعله‌ی پیش مخلوط را داخل محیط متخلخل تک‌لایه و دو لایه بدون هیچ ساده‌سازی مدل نمودند. نتایج نشان می‌دهند که در شعله‌ی پایدار شده‌ی سطحی، سرعت کمتر از سرعت شعله‌ی آرام است. ولی در شعله‌های مدفون، سرعت شعله بیش از سرعت شعله‌ی آرام خواهد بود.

در سال ۲۰۰۳ میلادی، ماتیس و الزی [۲۱] پایداری شعله، بازه‌ی کارکرد و میزان آلاینده‌ها را بصورت آزمایشگاهی در یک مشعل متخلخل دو قسمتی بررسی نمودند. پس از آن تریمیس و همکارانش [۲۲] در سال ۲۰۰۴، پایداری شعله در محیط متخلخل را برای یافتن عدد پکت بحرانی مخلوط‌هایی با عدد لوئیس مختلف و نفوذ بالا مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که عدد پکت ۶۵ برای مخلوط‌هایی با عدد لوئیس بزرگتر یا مساوی ۱ برابری دارد اما برای اعداد لوئیس کوچکتر از ۱ عدد پکت کمتر از ۶۵ است.

وگل و الزی [۲۳] در سال ۲۰۰۵، پایداری شعله در یک مشعل متخلخل دو قسمتی فلزی متشکل از آلیاژهای آهن و کروم را در حالت زیرآدیاباتیک و فوق‌آدیاباتیک بررسی نمودند. کیو و هایدن [۲۴] در سال ۲۰۰۶، ساختار شعله و پایداری احتراق را در محیط متخلخل سرامیکی با ضریب هدایتی پایین و چگالی حفره‌ی بالا را بررسی نمودند. در این مشعل، شعله در انتهای ناحیه بالای محیط متخلخل پایدار می‌شد.

تاکنون معیار مشخصی که نشان‌دهنده‌ی مرز پایداری یا ناپایداری شعله در داخل محیط متخلخل باشد ارائه نشده است. زیرا بسیاری از محققین با انجام آزمایش‌های مختلف و تحلیل‌ها و نتایج عددی بدست آمده به این نتیجه رسیده‌اند که

۳- عوامل بکار گرفته شده

در این پژوهش با توجه به اینکه آزمایش‌ها برحسب تغییر دبی جرمی سوخت و تنظیم دبی هوا است، بنابراین نتایج برحسب نرخ آتش بیان می‌شوند. نرخ آتش بیانگر میزان انرژی شیمیایی سوخت بر واحد سطح بوده و از رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$FR = \frac{LHV \times \dot{m}_f}{A} \quad (1)$$

LHV ارزش حرارتی پایین سوخت، \dot{m}_f دبی جرمی سوخت و A سطح مقطع مشعل است که برای دستگاه مورد آزمایش cm^2 ۶۲/۶۲ است. عامل دیگری که مورد استفاده قرار می‌گیرد، نسبت هم‌ارزی است که به صورت رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود:

$$\phi = \frac{FA_a}{FA_s} \quad (2)$$

FA_a نسبت سوخت به هوای واقعی است که در واکنش حضور دارد و FA_s نسبت سوخت به هوای استوکیومتری است. سرعت جریان در حالت پایا با سرعت شعله برابر است و به صورت رابطه‌ی (۳) بیان می‌شود.

$$S_L = \frac{\dot{V}}{A} \quad cm/sec \quad (3)$$

سرعت موثر شعله نیز برابر با نسبت دبی حجمی مخلوط ورودی به محیط متخلخل است و سطح موثر محیط متخلخل به صورت روابط (۴) و (۵) تعریف می‌شود.

$$V_{eff} = \frac{Q_{mix}}{A_{eff}} \quad (4)$$

$$A_{eff} = \frac{A}{\phi} \quad (5)$$

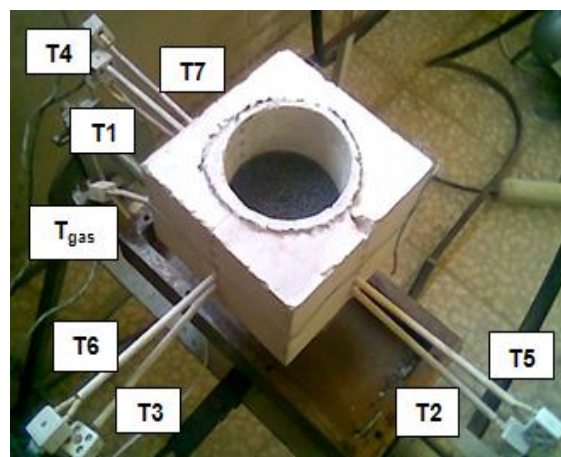
۴- معرفی رژیم‌های مختلف شعله

در آزمایش‌های انجام شده امکان استقرار شعله در چهار ناحیه وجود دارد. این نواحی عبارتند از:

۱. چسبیده بر روی سطح بالایی محیط متخلخل (داخل محیط متخلخل)
 ۲. مدفون در داخل محیط متخلخل
 ۳. در سطح زیرین محیط متخلخل
 ۴. بالای سطح محیط متخلخل
- متناسب با این نواحی، چهار نوع رژیم شعله پدید می‌آید. در این مطالعه، این چهار رژیم به ترتیب با نام‌های شعله‌ی سطحی، شعله‌ی مدفون، شعله‌ی زیرسطحی و شعله‌ی برخاسته

ترموکوپل اول در پایین محیط متخلخل قرار گرفته و ترموکوپل دوم در بالای محیط متخلخل نصب می‌شود. در ادامه از این دو با عنوان‌های ترموکوپل پایینی و بالایی نام برده می‌شود. همه‌ی ترموکوپل‌ها از نوع k بوده و طوری نصب می‌شوند که سر فلزی ترموکوپل با محیط متخلخل SiC در تماس باشد. چگونگی چینش آنها بگونه‌ای است که فاصله‌ی هر سوراخ در یک وجه، $15mm$ و در دو وجه مجاور $10mm$ یا $5mm$ باشد. ترموکوپل با نماد T_{gas} طبق شکل (۲) در ناحیه‌ی مخلوط نسوخته و $4cm$ پایین‌تر از ترموکوپل ۱ بوده و در قسمت لوله‌ی مستقیم‌کننده‌ی جریان قرار دارد. ترموکوپل‌های شماره‌ی ۱ تا ۷ به ترتیب با T_1 تا T_7 نام‌گذاری شده‌اند و ترموکوپل T_7 دمای گازهای خروجی را اندازه‌گیری می‌نماید.

یکی از ویژگی‌های مشعل متخلخل آن است که شعله برای رسیدن به حالت پایدار، زمان زیادی نیاز دارد. البته باید زمان پاسخ ترموکوپل را نیز در نظر گرفت. در هر صورت با توجه به ثبت لحظه‌ای دما، زمانی دمای ثبت شده به عنوان دمای پایدار در نظر گرفته می‌شود که تغییراتی نسبت به زمان نداشته باشد. زمانی که دماهای اندازه‌گیری شده ثابت بوده و یا تغییرات بسیار اندک داشته باشند، پایداری شعله در محیط بدست آمده است. با این کار زمان پایداری شعله نیز مشخص می‌شود که خارج از بحث این تحقیق است.



شکل (۲): ترتیب قرار گرفتن ترموکوپل‌ها

برای اندازه‌گیری دبی هوا و گاز با توجه به دامنه‌ی دبی‌های مورد استفاده از دو عدد روتامتر مناسب استفاده شد. هوای مورد نیاز بوسیله کمپرسور تأمین می‌شود و گاز مصرفی نیز گاز طبیعی است. بر سر راه هوای ورودی از کمپرسور به روتامتر یک فیلتر هوا نصب شده است تا از راه یافتن قطرات آب به داخل روتامتر تا حد امکان جلوگیری شود.

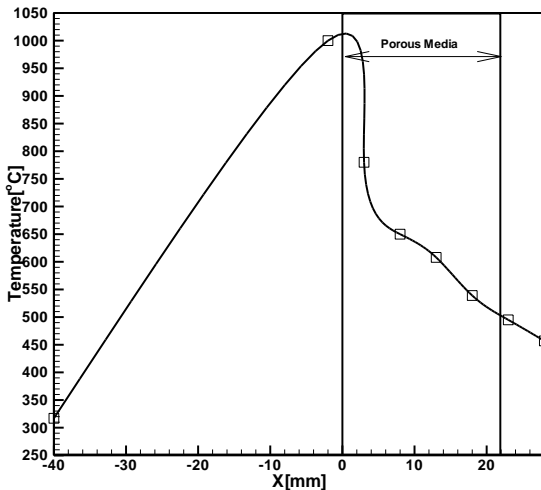
نام‌گذاری شده‌اند. در ادامه رژیم‌های احتراقی به همراه روش ایجاد آنها توضیح داده خواهد شد.

۴-۱- رژیم شعله‌ی سطحی

این شعله که در مطالعه‌ی حاضر در یک مخلوط غنی اتفاق می‌افتد، به فاصله‌ی اندکی از سطح بالایی محیط متخلخل تشکیل می‌شود. مکینتاش و پروترو [۱۳] نیز به رفتاری مشابه در بررسی‌های خود دست یافته بودند.

منحنی دمای نشان داده شده در شکل (۳) نشان می‌دهد که شعله در نزدیکی سطح قرار دارد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، ابتدا دمای مخلوط در ورود به مشعل از مقدار تقریبی 80°C تا حدود 150°C در ورود به محیط متخلخل افزایش می‌یابد. پس از آن به دلیل افزایش انتقال حرارت و پیش‌گرمایش در محیط متخلخل، دمای گاز با افزایش بیشتری نسبت به قبل از محیط متخلخل به مقدار تقریبی 390°C رسیده و در پایان با دمای 445°C از مشعل خارج می‌شود. ویژگی‌های این رژیم آن است که شعله با تغییر نسبت هم‌ارزی، حالتی ناپایدار پیدا کرده و به زیر محیط متخلخل منتقل می‌شود. به بیان دیگر حساسیت این رژیم در برابر تغییرات اندک نسبت هم‌ارزی شدید بوده و باعث تغییر موقعیت شعله می‌شود. از این رژیم می‌توان به عنوان یک رژیم حدی در پایداری شعله در داخل محیط متخلخل نام برد.

محیط متخلخل افزایش می‌یابد و پس از آن دما با افت شدیدی در فاصله‌ی اندکی پس از سطح ورودی روبرو می‌شود. این پدیده به دلیل بالا بودن انتقال حرارت از ناحیه‌ی احتراق است. پس از آن دما به صورت تقریبی خطی تا مقدار 500°C در خروج از محیط متخلخل کاهش یافته و به دمای حدودی 460°C در دریافت که شعله در مجاورت سطح زیرین محیط متخلخل تشکیل شده است. همان‌طور که گفته شد، بیشینه‌ی دمای ایجاد شده بالاتر از 1000°C است.

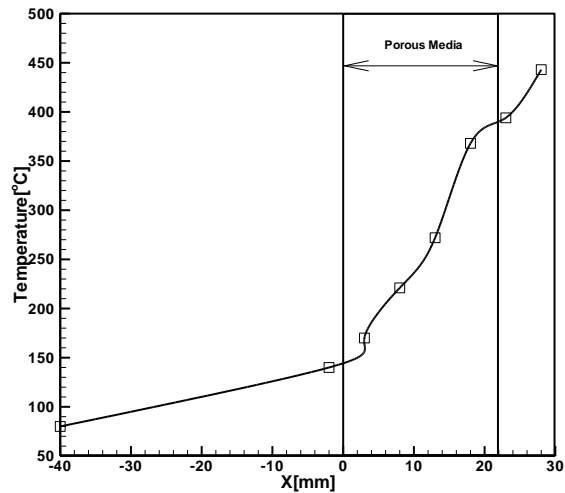


شکل (۴): منحنی دمای محوری در رژیم شعله‌ی مدفون

با توجه به ضریب صدور بالای محیط متخلخل و همچنین دمای بالای آن، تابش حرارتی عامل اصلی اتلاف حرارت و کاهش دمای محیط متخلخل است.



شکل (۵): نمونه‌ای از رژیم شعله‌ی مدفون



شکل (۳): پروفیل دمای محوری در رژیم شعله‌ی سطحی

۴-۳- رژیم شعله‌ی زیر سطحی

در این حالت یک شعله آزاد در قسمت زیرین محیط متخلخل تشکیل می‌شود. در واقع احتراق در محیط متخلخل انجام نمی‌گیرد. در آزمایش‌های انجام شده، این رژیم ممکن است در هر دو مخلوط غنی و رقیق بوجود آید. منحنی دمای ارائه شده در رژیم شعله‌ی زیرسطحی طبق شکل (۶) است.

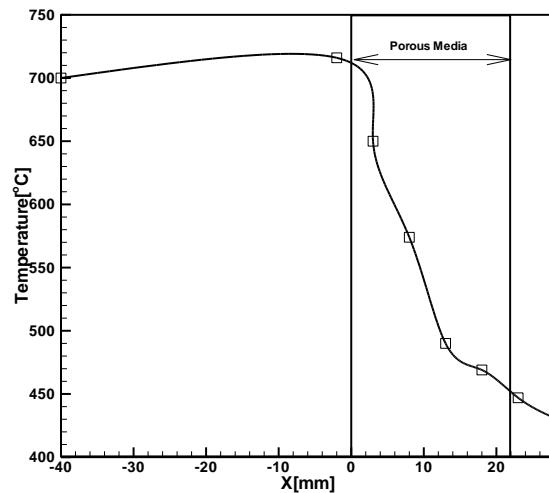
۴-۲- رژیم شعله‌ی مدفون

در این حالت شعله داخل محیط متخلخل بوده و بیشتر در نزدیکی سطح پایینی محیط متخلخل تشکیل می‌شود. شکل (۴) نمودار دما و شکل (۵) نمونه‌ای از سطح گداخته شده در این رژیم را نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده شد، دمای مخلوط ورودی از 320°C در ورودی مشعل به حدود 1000°C در

۵۰°C می‌رسد. در داخل محیط متخلخل، دما با شیب زیاد نزدیک به ۳۱۰°C در خروج از محیط متخلخل رسیده و پس از آن در دمایی حدود ۳۹۰°C از مشعل خارج می‌شود. در این رژیم، انرژی بسیار کمی به مخلوط ورودی منتقل می‌شود. زیرا شعله در بالای سطح تشکیل شده است و بیشتر انرژی منتقل شده به صورت انرژی تابشی و مقدار اندکی با رسانش از محل شعله به نواحی زیرین شعله منتقل می‌شود. در این رژیم نیز محیط متخلخل نقش مفید خود را ایفا می‌کند به گونه‌ای که دمای مخلوط ورودی قبل از محیط متخلخل به مقدار کم و با شیب حرارتی کمی، افزایش یافته ولی با وارد شدن به محیط متخلخل، گرادیان دما افزایش یافته و دمای مخلوط ورودی تغییر قابل توجهی خواهد داشت. یعنی محیط متخلخل در این رژیم نیز بر پیش‌گرم نمودن مخلوط ورودی اثر داشته است. توزیع دمای ثبت شده برای این رژیم مشابه با رژیم شعله‌ی سطحی است با این تفاوت که افزایش دما در این حالت بیشتر است. دقت شود که بیشینه‌ی دمای ثبت شده در این رژیم در ناحیه‌ی اشتعال و در بیرون محیط متخلخل است. در حالی که مقدار دمای بیشینه نسبت به رژیم‌های دیگر مقدار کمتری دارد. به دلیل اینکه این مقدار بیشینه دما در سیال گازی ایجاد می‌شود، مقدار انرژی تابشی ایجاد شده بسیار کمتر از انرژی تابشی رژیم شعله‌های داخل محیط متخلخل است.

۵- مراحل تشکیل رژیم‌های مختلف شعله

مراحل تشکیل شعله‌ی پایدار در شکل (۸) آمده است. در شروع هر آزمایش برای ایجاد یک نرخ آتش ثابت، ابتدا فقط شیر گاز به مقدار خاصی باز می‌شود. پس از آن با ایجاد جرقه در بالای سطح محیط متخلخل، شعله غنی (زرد رنگ) بر روی مشعل ایجاد می‌شود. شکل (۸-الف) نمایش تشکیل این شعله است. پس از آن با افزایش هوا و کاهش نسبت هم‌ارزی، طول شعله کاهش یافته و شعله با تغییر رنگ از زرد به سبز و سپس آبی به سطح بالایی محیط متخلخل، نزدیک می‌شود. با نزدیک شدن شعله به سطح، شعله مسطح شده و دمای سطح افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود سطح بالایی محیط به مقدار کم گداخته شده و به رنگ قرمز درآید. در این حالت، رژیم شعله سطحی طبق شکل (۸-ب) ایجاد می‌شود و زمانی که دبی هوا و گاز ثابت نگه داشته شوند، شعله بر روی سطح پایدار است. پس از ایجاد شعله‌ی سطحی با کاهش بیشتر نسبت هم‌ارزی، دو حالت ممکن است رخ دهد. حالت اول این است که ناگهان شعله به زیر محیط متخلخل برگشت کند (رژیم شعله زیر سطحی) و در حالت دیگر شعله در داخل محیط متخلخل به

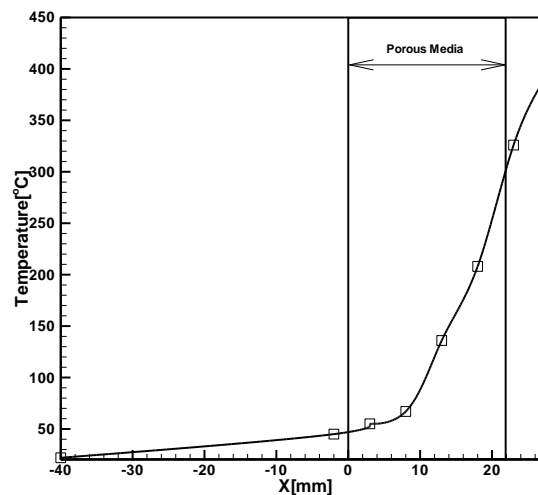


شکل (۶): منحنی دمای محوری در رژیم شعله‌ی زیرسطحی

مخلوط، بلافاصله پس از ورود به مشعل سوخته شده و دمای حدودی ۷۰۰°C را ایجاد می‌نماید. گازهای داغ به هنگام ورود به محیط متخلخل به دمایی نزدیک ۷۱۵°C می‌رسند. در محیط متخلخل دما با تغییرات شدیدی تا حدود ۴۴۵°C افت می‌نماید و پس از آن در دمایی نزدیک به ۴۳۰°C از مشعل خارج می‌شود. در شعله‌ی زیرسطحی، حرارت تابشی زیادی به قسمت‌های زیرین محیط متخلخل (جایی که ترموکوپل T1 قرار دارد) منتقل می‌شود.

۴- رژیم شعله‌ی برخاسته

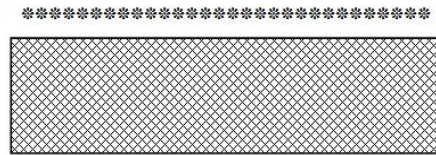
در این حالت شعله‌ی آزاد پایدار روی سطح محیط متخلخل بوجود می‌آید و شعله، داخل محیط متخلخل تشکیل نمی‌شود. نمودار توزیع دمای این رژیم در شکل (۷) نشان داده شده است.



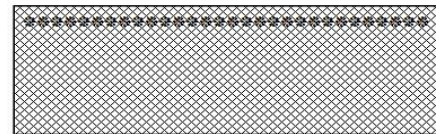
شکل (۷): منحنی دمای محوری در رژیم شعله‌ی برخاسته

با توجه به شکل، مخلوط گاز و هوا با دمای نزدیک به ۴۰°C وارد مشعل می‌شود. این مخلوط پس از اندکی پیش-گرمایش به هنگام ورود به محیط متخلخل، به دمایی در حدود

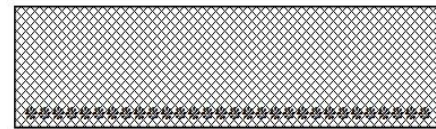
صورت پایا تشکیل می‌شود (رژیم شعله مدفون). همانطور که گفته شد رژیم شعله‌ی مدفون در درون محیط متخلخل و در نزدیک سطح زیرین آن تشکیل می‌شود. مکان رژیم شعله‌ی مدفون در شکل (۸-ج) نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۸): موقعیت (الف) شعله پس از جرقه زدن، (ب) شعله‌ی سطحی، (ج) شعله‌ی مدفون

در برخی موارد دیده شد که با کاهش بیشتر نسبت هم‌ارزی، شعله‌ای که درون محیط متخلخل قرار دارد (رژیم شعله-ی مدفون) ناگهان به زیر محیط متخلخل بازگشت نموده و رژیم شعله‌ی زیر سطحی را بوجود می‌آورد.

در حالات دیگر رژیم شعله مدفون و نیز در حالت رژیم شعله‌ی زیرسطحی، با کاهش بیشتر نسبت هم‌ارزی، شعله از قسمت نیمه‌ی پایین محیط متخلخل و نزدیک به سطح پایینی و به طرف بالای آن حرکت می‌نماید. این حرکت تا جایی ادامه پیدا می‌کند که در یک نسبت هم‌ارزی مشخص، شعله از بالای محیط متخلخل بیرون آمده و یک شعله‌ی آزاد پایدار بوجود آید. این پدیده متناظر با رژیم شعله‌ی برخاسته است که رفتاری مشابه با این رژیم توسط میتال و همکاران [۱۸] نیز گزارش شده است. با کاهش بیشتر نسبت هم‌ارزی، شعله از مکان پایدار خود بالاتر آمده و در پایان با پرش شعله خاموش می‌شود.

بنابراین محیط متخلخل، تا یک نسبت هم‌ارزی مشخصی می‌تواند شعله را درون خود نگه دارد. با کاهش ناحیه‌ی پیش‌گرم و کاهش بیشتر نسبت هم‌ارزی، شعله به تدریج خاموش می‌شود. در حالتی که شعله در زیر محیط متخلخل قرار دارد، با کاهش نسبت هم‌ارزی، شعله مقداری از ضخامت محیط متخلخل (نزدیک به ۵mm) را با سرعت مشخصی طی

می‌کند. از آنجا به بعد با کاهش بیشتر نسبت هم‌ارزی، سرعت حرکت شعله به سمت بالای محیط متخلخل بیشتر می‌شود، تا اینکه شعله به طور کامل از محیط متخلخل خارج شود.

در حین انجام آزمایش‌های مختلف دیده شد که زمان پایداری شعله در محیط متخلخل پیش‌گرم شده نسبت به محیط سرد، کمتر بوده و نوع رژیم بوجود آمده و نیز مدت زمان پایداری شعله در مشعل به نوع و جنس محیط متخلخل، نگه‌دارنده و عایق وابستگی زیادی دارد.

۶- بررسی نتایج

نتایج این بخش شامل اثرات مختلف نرخ آتش، چگالی حفره و نسبت هم‌ارزی بر محدوده پایداری شعله در محیط متخلخل است. در ابتدا آستانه‌های پایداری شعله شامل رژیم شعله‌ی سطحی و رژیم شعله‌ی برخاسته بررسی می‌شود و پس از آن پایداری شعله در رژیم شعله‌ی مدفون مورد بررسی قرار می‌گیرد. حالت‌هایی که رژیم شعله زیرسطحی مانع تشکیل شعله‌ی پایدار می‌شود نیز بیان می‌گردند. همان‌طور که بیان شد، رژیم شعله‌ی سطحی و برخاسته به عنوان دو آستانه‌ی پایداری شعله در محیط متخلخل هستند. این دو آستانه‌ی پایداری در یک طرف حد غنی که شعله به سطح می‌چسبد (شعله سطحی) و زمانی که مخلوط بسیار رقیق است و از محیط خارج می‌شود (شعله برخاسته) تعریف شده‌اند. گفتنی است نتایجی که در این بخش بیان شده‌اند از نظر کیفی با نتایج دیگر محققین [۱۲]، [۱۳]، [۱۶]، [۱۸]، [۱۹]، [۲۳] هم‌خوانی دارد. اما مقدار کمی برخی نتایج در این تحقیق با نتایج دیگران متفاوت است. زیرا علاوه بر اینکه جنس محیط‌های متخلخل بکار رفته در مراجع با این تحقیق تفاوت دارند، دستگاه آزمایش مورد استفاده نیز متفاوت است.

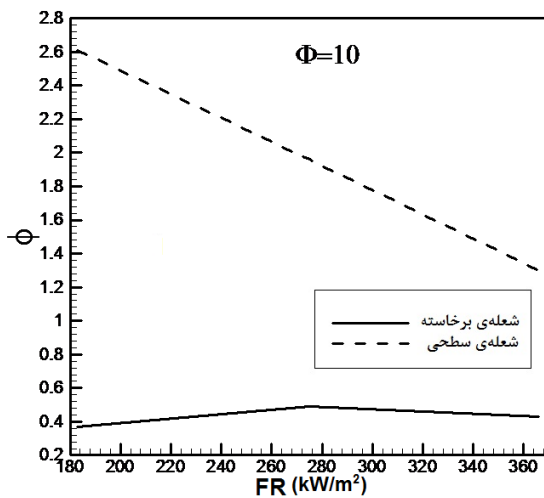
۶-۱- اثر عوامل مختلف بر آستانه‌های پایداری

در جدول (۱) شرایط نسبت هم‌ارزی و نرخ آتشی که در آن شعله‌ی سطحی و شعله‌ی برخاسته پدید می‌آیند، ارائه شده است. شعله‌ی سطحی در نسبت‌های هم‌ارزی بیشتر از ۱ و شعله‌ی برخاسته در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از ۰/۵ ایجاد می‌شوند. حرارتی که از واکنش در این دو رژیم تولید می‌شود، به اندازه‌ی کافی نمی‌تواند به لایه‌های پایینی محیط متخلخل نفوذ کند. بنابراین شعله یا در قسمت پایین محیط متخلخل قرار می‌گیرد و یا به سمت سطح بالایی آن حرکت می‌نماید.

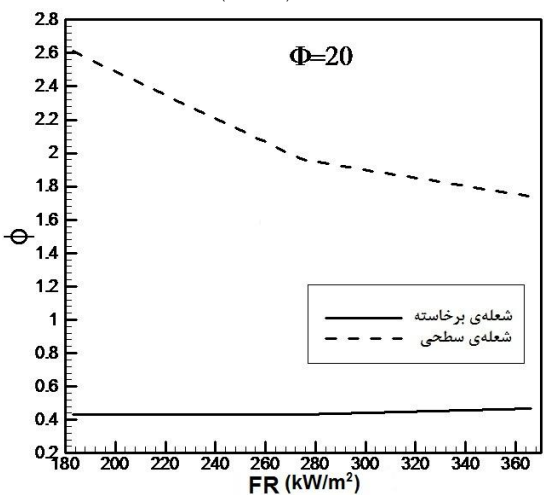
جدول (۱): شرایط ایجاد شعله‌ی سطحی و شعله‌ی برخاسته

چگالی حفره (ppi)	آتش: (Kw/m^2)	تایم: (lit/min)	شعله برخاسته		شعله سطحی	
			نسبت هم ارزی	سرعت مخلوط (cm/s)	نسبت هم ارزی	سرعت مخلوط (cm/s)
۱۰	۱۸۳	۲	۰/۳۷	۱۵/۷	۲/۶۱	۲/۷
	۲۷۵	۳	۰/۴۹	۱۸/۱	۱/۹۶	۵/۱
	۳۶۶	۴	۰/۴۳	۲۷/۱	۱/۳۰	۹/۷
۲۰	۱۸۳	۲	۰/۴۳	۱۳/۵	۲/۶۱	۲/۷
	۲۷۵	۳	۰/۴۳	۲۰/۳	۱/۹۶	۵/۱
	۳۶۶	۴	۰/۴۷	۲۴/۹	۱/۷۴	۷/۶

(۹-الف) و برای چگالی حفره‌ی ۲۰ ppi در شکل (۹-ب) رسم شده‌اند. با توجه به شکل (۹-الف) در چگالی حفره ۱۰ ppi، افزایش نرخ آتش و نیاز به هوای ثانویه برای احتراق سطحی باعث می‌شود که این شعله در نسبت هم ارزی کمتری پایدار شود. اما برای ایجاد رژیم شعله‌ی برخاسته، با افزایش نرخ آتش، نسبت هم‌ارزی به طور تقریب ثابت می‌ماند. روند کاهش نسبت هم‌ارزی رژیم شعله‌ی سطحی در چگالی حفره ۲۰ ppi مشابه چگالی حفره ۱۰ ppi است با این تفاوت که نمودار نسبت هم ارزی بر حسب نرخ آتش در چگالی حفره‌ی ۲۰ ppi شیب کمتری دارد.



شکل (۹-الف)



شکل (۹-ب)

شکل (۹): محدوده‌ی پایداری برای دو چگالی حفره ۱۰ ppi و ۲۰ ppi

با توجه به نتایج می‌توان دریافت که تغییر میزان چگالی حفره، مقادیر نسبت هم‌ارزی را در آستانه‌ی پایداری شعله برخاسته تغییر زیادی نمی‌دهد اما افزایش چگالی حفره سبب کاهش تغییرات نسبت هم ارزی برای شعله سطحی می‌شود.

همان‌طور که در بخش ۵ (مراحل تشکیل رژیم‌های مختلف شعله) بیان شد، رژیم شعله‌ی زیرسطحی در اثر برگشت شعله به زیرسطح سرامیک ایجاد شده و در زیر سرامیک پایدار می‌شود. این رژیم در دو حالت پس از شعله‌ی سطحی و پس از تشکیل شعله‌ی مدفون می‌تواند پدید آید. در این تحقیق، شرایطی که در آن رژیم شعله‌ی زیرسطحی پس از شعله‌ی مدفون بوجود می‌آید در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): شرایط ایجاد شعله‌ی زیرسطحی

چگالی حفره (ppi)	نرخ آتش (kW/m^2)	دبی‌گاز (lit/min)	دبی‌هوا (m^3/hr)	نسبت هم‌ارزی	سرعت مخلوط (cm/s)
۱۰	۱۸۳	۲	۱	۱/۰۳	۴/۹
	۲۷۵	۳	۲	۰/۹۸	۹/۵
	۳۶۶	۴	۳/۵	۰/۷۵	۱۶/۲
۲۰	۱۸۳	۲	-	-	-
	۲۷۵	۳	۳	۰/۶۵	۱۳/۸
	۳۶۶	۴	۲/۵	۱/۰۴	۱۱/۹
			۳	۰/۸۷	۱۴/۱
			۳/۵	۰/۷۵	۱۶/۲
			۴/۵	۰/۵۸	۲۰/۶

دیده می‌شود که برای محیط با چگالی حفره ۱۰ ppi، برگشت شعله به زیر محیط متخلخل در نسبت‌های هم ارزی بین دو آستانه‌ی گفته شده در جدول (۱) رخ می‌دهد. در محیط متخلخل ۲۰ ppi برای نرخ آتش ۱۸۳ kW/m^2 شعله‌ی زیر سطحی ایجاد نمی‌شود ولی برای نرخ آتش ۳۶۶ kW/m^2 در تمام چهار نسبت هم ارزی، شعله زیر سطحی تشکیل می‌شود.

۶-۲- اثر چگالی حفره بر دو آستانه‌ی پایداری

برای نمایش تغییرات محدوده‌ی پایداری شعله، نسبت هم-ارزی بر حسب نرخ آتش برای چگالی حفره‌ی ۱۰ ppi در شکل

۳-۶- اثر نرخ آتش بر دو آستانه‌ی پایداری

با توجه به شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) می‌توان دریافت که با افزایش نرخ آتش، محدوده‌ی شعله‌ی پایدار در داخل محیط متخلخل مشخص کاهش می‌یابد. همچنین نرخ آتش اثری بر تشکیل رژیم شعله‌ی برخاسته در داخل محیط متخلخل از جنس SiC نداشته و نسبت هم ارزی لازم برای تشکیل این رژیم شعله در هر دو چگالی حفره ثابت و برابر با ۰/۴ است.

با توجه به اثر نداشتن میزان نرخ آتش و چگالی حفره بر رژیم شعله‌ی برخاسته، به نظر می‌رسد که قابلیت محیط متخلخل برای نگهداری شعله، فقط می‌تواند وابسته به جنس محیط باشد.

۴-۶- بررسی پایداری در رژیم شعله‌ی مدفون

بیشترین شرایط پایداری شعله در رژیم شعله‌ی مدفون اتفاق می‌افتد. پیش از تشکیل این رژیم، شعله ابتدا بر روی سطح محیط متخلخل قرار داشته و پس از مدتی در بین لایه‌های محیط متخلخل مدفون می‌شود.

تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که پایداری شعله یا روی سطح (شعله سطحی) و یا در ناحیه‌ای نزدیک به سطح زیرین محیط متخلخل (شعله مدفون) روی می‌دهد. تاث و همکاران [۱۲] به موقعیت مشابهی برای شعله پایدار در محیط متخلخل سرامیکی فومی لیتیم آلومینا سیلیکات رسیده‌اند. مین و همکاران [۱۴] و نیز میتال و همکاران [۱۸] به نتیجه‌ای مشابه در تحقیقات خود دست یافته‌اند. به عبارتی دیگر آنها به کمک نتایج دستگاه‌های آزمایش و تحقیقات خود دریافتند که می‌توان شعله پایدار را در دو ناحیه خاص ایجاد نمود. یکی از موقعیت‌های قرارگیری شعله، در داخل محیط متخلخل و دیگری در ناحیه باریکی نزدیک به صفحه خروجی محیط متخلخل است.

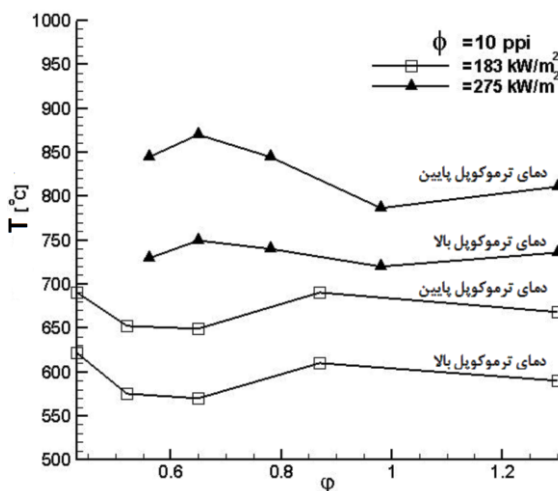
میتال و همکاران [۱۸] محدوده‌ی نسبت هم ارزی که در آن شعله از روی سطح محیط بلند می‌شود (رژیم شعله برخاسته) را بین ۰/۶ و ۰/۷ بدست آوردند. همچنین، کمترین مقدار نسبت هم ارزی که در آن شعله خاموش می‌شود را بین ۰/۵ و ۰/۶ بدست آوردند. اما در این تحقیق، محدوده‌ای که در آن رژیم شعله برخاسته تشکیل می‌شود بین ۰/۳۵ و ۰/۵ بدست می‌آید که از حدود ارائه شده به وسیله میتال و همکاران کمتر است. برای مقادیر کمتر از ۰/۳۵ شعله خاموش خواهد شد. در هر دو مطالعه انجام شده، با افزایش نرخ آتش، بازه پایداری کاهش می‌یابد.

برای پی بردن به مکان شعله در رژیم شعله‌ی مدفون، از نمودارهای دما استفاده شده است. شکل (۱۰) دمای

ترموکوپل‌های واقع در پایین (ترموکوپل پایین) و بالای محیط متخلخل (ترموکوپل بالایی) را بر حسب نسبت هم‌ارزی در دو نرخ آتش و چگالی حفره‌ی نمونه نشان می‌دهد. نکته مهم در این شکل آن است که روند تغییرات دما در هر دو ترموکوپل یکسان است. با استفاده از مقادیر این دو دما می‌توان موقعیت تقریبی شعله را تخمین زد.

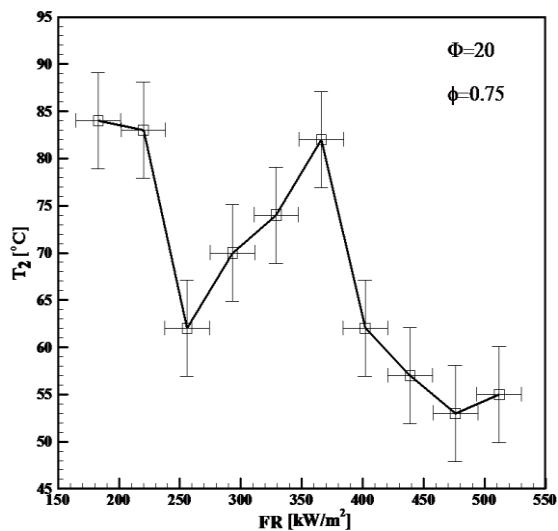
با توجه به نمودار شکل (۱۰)، در هر دو نرخ آتش با تغییر نسبت هم‌ارزی، دمای ترموکوپل پایین از ترموکوپل بالایی بیشتر است. در نرخ آتش‌های دیگر که به دلیل تعداد زیاد شکل‌ها و نیز مشابه بودن رفتار نمودارها نمایش داده نشده‌اند نیز همین رفتار دیده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که شعله، به ترموکوپل پایینی نزدیکتر بوده و بنابراین شعله در نزدیک ناحیه‌ی پایین محیط متخلخل پایدار می‌شود. روند تغییر دمای ترموکوپل پایینی و بالایی برحسب نسبت هم‌ارزی در نرخ آتش مشخص، مشابه بوده در حالیکه نمودارهای متفاوتی برای دمای ترموکوپل پایینی و بالایی در نرخ‌های آتش متفاوت ایجاد می‌شود.

برخلاف شعله‌ی آرام که بیشترین دمای شعله در حدود مخلوط استوکیومتری اتفاق می‌افتد [۴]، در شعله‌ی مدفون این پدیده دیده نمی‌شود. به عبارتی دیگر، در نرخ‌های آتش مختلف بیشترین مقدار دما، در مخلوط‌هایی خارج از حالت استوکیومتری رخ می‌دهد.



شکل (۱۰): اثر نرخ آتش بر پایداری شعله در رژیم شعله‌ی مدفون

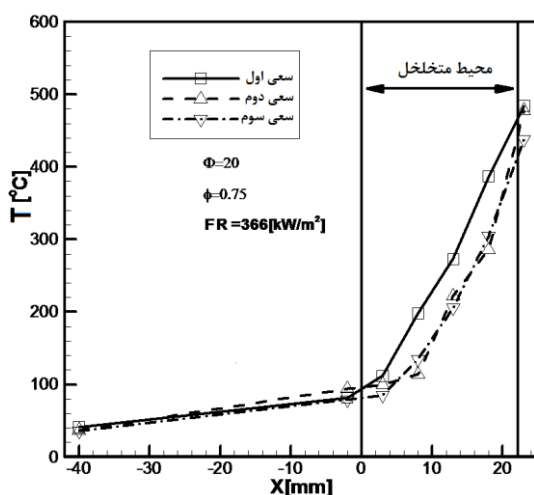
در یک نسبت هم‌ارزی هرچه بر نرخ آتش افزوده می‌شود، بطور متوسط دمای ترموکوپل‌ها افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش نرخ تولید انرژی و اکسایش ناشی از افزایش مقدار دبی گاز است. از آنجا که شعله در قسمت پایینی محیط متخلخل ایجاد



شکل (۱۱): نمودار عدم قطعیت دمای برگشت شعله در رژیم شعله‌ی مدفون برای یک نمونه ۲۰ppi و نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵

۸- تکرارپذیری

آزمون دیگری که برای اطمینان از داده‌های نتایج آزمایشگاهی انجام می‌شود، تکرار آزمایش‌ها است. اثر تکرار آزمون‌ها بر تغییر نتایج در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. این شکل دمای محوری مشعل را در نرخ آتش 366 kW/m^2 ، نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ و چگالی حفره ۲۰ ppi نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۲) روند دمای محوری در سه تکرار نسبت به یکدیگر اختلاف چندانی ندارند. بنابراین می‌توان گفت که آزمایش‌ها از نظر تکرارپذیری دقت خوبی دارند.



شکل (۱۲): دمای محوری مشعل در لحظه‌ی قبل از برگشت شعله، ۱۰ ppi، $\phi=0.75$ و نرخ آتش 366 kW/m^2 در سه تکرار

می‌شود، دمای ترموکوپل پایینی بیشتر از دمای ترموکوپل دیگر است. با توجه به شکل (۱۰)، در نرخ آتش 183 kW/m^2 ، بیشترین دما در حدود 680°C مربوط به رقیق‌ترین مخلوط یعنی $\phi=0.43$ است. البته در $\phi=0.87$ بیشینه نسبی دما و در $\phi=0.65$ کمترین دما وجود دارد. بیشترین دما در نرخ آتش 278 kW/m^2 نزدیک به 870°C بوده و در $\phi=0.65$ رخ می‌دهد.

۷- عدم قطعیت و تحلیل خطا

یکی از مباحث مهمی که در انجام مطالعات آزمایشگاهی مطرح می‌شود، برآورد میزان خطای موجود در نتایج است. روش‌های مختلفی برای تعیین میزان خطا وجود دارد. یک روش دقیق برای تخمین نتایج تجربی بوسیله هولمن [۱] ارائه شده است. خطاهایی که در یک فرایند آزمایشگاهی می‌تواند بوجود آید شامل خطای موجود در وسایل اندازه‌گیری، خطای اندازه‌گیری و خطای موجود در محاسبات هستند. با توجه به ساده بودن معادلات بکار رفته و کم مقدار بودن حجم محاسبات میزان خطای ناشی از گردکردن و عملیات محاسباتی بسیار اندک و قابل چشم‌پوشی است.

خطاهای موجود در ابزارهای اندازه‌گیری با توجه به مشخصات ارائه شده از طرف سازندگان عبارتند از:

۱. خطای ترموکوپل (کالیبراسیون): ۵ کلوین
۲. خطای اندازه‌گیری دما به وسیله ترموکوپل: ۰/۱ کلوین
۳. خطای روتامتر گاز: ۰/۲ لیتر بر دقیقه
۴. خطای روتامتر هوا: ۰/۱۴ مترمکعب بر ساعت
۵. خطای ثبت زمان ناشی از پاسخ زمانی ترموکوپل‌ها

خطاهای موجود در یک وسیله در بدترین حالت با هم جمع می‌شوند. فرض شده است که عدم قطعیت مربوط به ارزش حرارتی گاز و ابعاد ناچیز باشد. همچنین خطای موجود در ثبت زمانی دمای ترموکوپل‌ها، در همه اندازه‌گیری‌ها وجود دارد ولی در تحلیل خطای انجام شده در نظر گرفته نشده است. با توجه به نتایج اصلی موجود، عوامل اثر گرفته از خطا شامل نسبت هم‌ارزی، نرخ آتش و دما هستند. عدم قطعیت دما به صورت مجموع دو خطای مربوط به ترموکوپل، برابر با ۵/۱ کلوین است.

با جایگذاری مقادیر، عدم قطعیت نرخ آتش برابر مقدار ثابت 18.3 kW/m^2 خواهد شد. شکل (۱۱) میزان عدم قطعیت را برای چگالی حفره ۲۰ppi و نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ بر حسب نرخ آتش نشان می‌دهد.

محدوده نسبت هم‌ارزی مشخصی می‌تواند شعله را در درون خود حفظ نماید. مقادیر نسبت هم‌ارزی برای آستانه‌ی پایداری شعله برخاسته با تغییر نرخ آتش تغییر چندانی نمی‌کند و نسبت هم‌ارزی لازم برای تشکیل این رژیم شعله در هر دو چگالی حفره، ثابت برابر با $0/4$ است. اما افزایش چگالی حفره باعث کاهش شیب منحنی نسبت هم‌ارزی برحسب نرخ آتش برای شعله سطحی می‌شود. همچنین دیده شد که با افزایش نرخ آتش، محدوده‌ی شعله‌ی پایدار در داخل محیط متخلخل کاهش می‌یابد. روند تغییر دمای ترموکوپل پایینی و بالایی برحسب نسبت هم‌ارزی در نرخ آتش مشخص، مشابه بوده در حالیکه نمودارهای متفاوتی برای دمای ترموکوپل پایینی و بالایی در نرخ‌های آتش متفاوت بدست می‌آید. در پایان دو منطقه برای شعله‌ی پایدار وجود دارد. یکی از این دو ناحیه در نیمه‌ی پایین و دیگری در نزدیک سطح فوقانی محیط متخلخل می‌باشند.

در حالت کلی، نوع رژیم بوجود آمده در مشعل متخلخل به نوع و جنس محیط متخلخل، نگه‌دارنده و عایق وابستگی است. در این مقاله تأثیر نرخ آتش، چگالی حفره و نسبت هم‌ارزی بر محدوده‌ی پایداری شعله در محیط متخلخل SiC مورد مطالعه قرار گرفته است. چهار رژیم مختلف شعله شامل رژیم شعله‌ی سطحی، مدفون، زیر سطحی و برخاسته تعریف شدند که در حالت کلی به ترتیب چسبیده به سطح محیط متخلخل، در داخل، زیر محیط و در بالای محیط متخلخل تشکیل می‌شوند. رژیم شعله‌ی سطحی به عنوان یک آستانه‌ی پایداری و رژیم شعله‌ی برخاسته به عنوان آستانه‌ی دیگر پایداری شعله در محیط متخلخل در نظر گرفته شدند. رژیم شعله‌ی سطحی به صورت شعله‌ی غنی در نسبت‌های هم‌ارزی بیشتر از ۱ و رژیم شعله‌ی برخاسته برای مخلوط بسیار رقیق در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از $0/5$ تشکیل می‌شوند. بنابراین محیط متخلخل، در یک

۱۰- مراجع

- [۱] هولمن، ج.پی؛ ترجمه ملکی، م؛ دیبایی‌نیا، ب؛ روشهای تجربی برای مهندسين، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۶۹.
- [۲] هاشمی، س.ع.م؛ شاهرویدیان، ح؛ عطوف، ح؛ بررسی تجربی یک نمونه مشعل تابشی از نوع محیط متخلخل فلزی، یازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه خواجه نصیرالدین، خرداد ۱۳۸۷.
- [۳] معتقدی فر، ر؛ بررسی تجربی مشعل متخلخل از جنس توری فلزی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، ۱۳۸۸.
- [۴] Glassman, Irvin; Combustion, 2nd Edition, Academic Press, Princeton-Newjersey, 114-151, 1987.
- [۵] Charles E. Baukal, Industrial Burners handbook, CRC Press, section 11-13, 2003.
- [۶] Kambiz Vafai; Handbook of Porous Media, 2nd Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, US, 2005.
- [۷] Mößbauer, S., Pickenäcker, O., Pickenäcker K., Trimis, D., "Application of the Porous Burner Technology in Energy-and Heat-engineering", Clean Air, 3, 185-198, 2002.
- [۸] Howell, J.R, Hall, M.J, Ellzey, J.L, "Combustion of Hydrocarbon Fuels within Porous Inert Media", Prog. Energ. Combust. Sci., 22, 121-145, 1996.
- [۹] Wood, S., Harris, A.T., "Porous burners for lean-burn applications", Prog. Energ. Combustion Sci., 34, 667-684, 2008.
- [۱۰] Abdul Mujeebu, M., Abdullah, M.Z., Abu Bakar, M.Z., Mohamad, A.A., Muhad, R.M.N., Abdullah, M.K., "Combustion in porous media and its applications - A comprehensive survey", J. Env. Man., 90, 2287-2312, 2009.
- [۱۱] Kotani, Y., Takeno, T., "An Experimental Study on Stability and Combustion Characteristics of an Excess Enthalpy Flame", Proc. Combust. Institute, 19, pp. 1503-1509, 1982.
- [۱۲] Sathe, S.B., Kulkarni, M.R., Peck, R.E., Tong, T.W., "An experimental and theoretical study of porous radiant burner performance", Proc. Combust. Int., 23, 1011-1018, 1990.
- [۱۳] McIntosh, A. C., Prothero, A., "A model of large heat transfer surface combustion with radiant heat emission", Combust. Flame., 83, 111-126, 1991.
- [۱۴] Min, D.K., Shin, H.D., "Laminar premixed flame stabilized inside a honeycomb ceramic", Int. J. Heat Mass Trans., 34, 341-356, 1991.
- [۱۵] Itaya, Y., Miyoshi, K., Maeda, S., Hasatani, M., "Surface combustion of a premixed methane-air gas on a porous ceramic", Int. Chem. Eng., 32, 123-131, 1992.
- [۱۶] Hanamura, K., Echigo, R., "An analysis of flame stabilization mechanisms in radiation burners", Wa'rme Stoffu" bertrag, 26, 377-383, 1991.
- [۱۷] Hanamura, K., Echigo, R., Zhdanok, S.A., "Superadiabatic combustion in a porous medium", Int. J. Heat Mass Trans., 36, 3201-3209, 1993.
- [۱۸] Mital, R., Gore, J.P., Viskanta, R., "A Study of the Structure of Submerged Reaction Zone in Porous Ceramic Radiant Burners", Combust. Flame, 111, 175-184, 1997.
- [۱۹] Brenner, G., Pickenacker, K., Pickenacker, O., Trimis, D., Wawrzinek, K., Weber, T., "Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methane/air combustion in porous inert media", Combust Flame, 123, 201-213, 2000.

- Vogel, B.J., Ellzey, J.L., "Subadiabatic and superadiabatic performance of a two section porous burner", *Combust Sci Technol*, 177, 1323–38, 2005. [۲۳]
- Qiu, K., Hayden, ACS., "Premixed gas combustion stabilized in fibre felt and its application to a novel radiant burner", *Fuel*, 85, 1094–1100, 2006. [۲۴]
- Diamantis, D.J., Mastorakos, E., Goussis, A., "Simulation of premixed combustion in porous media", *Combust Theor Model*, 6, 383–411, 2002. [۲۰]
- Mathis Jr W.M., Ellzey J.L., "Flame stabilization, Operating Range and Emissions for a Methane/Air Porous Burner", *Combust. Sci. And Tech.*, 175, 825-839, 2003. [۲۱]
- Trimis, D., Wawrzinek, K., "Flame stabilization of highly diffusive gas mixtures in porous inert media", *J. Comput. Appl. Mech.*, 5, 367–381, 2004. [۲۲]