



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۳، صفحه ۲۵ تا ۳۵  
Vol. 46, No. 1, Summer 2014, pp. 25- 35



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)  
(AJSR - ME)

## بررسی تجربی پدیده‌ی برگشت شعله در محیط متخلخل سرامیکی

سید عبدالمهدی هاشمی<sup>۱\*</sup>، مجید دستمالچی<sup>۲</sup>، مجید نیکفر<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۲- کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۳- کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

(دریافت ۱۳۹۱/۷/۲۴، پذیرش ۱۳۹۱/۱۰/۴)

### چکیده

در این مقاله چگونگی حرکت شعله در یک سرامیک متخلخل با سوخت گاز طبیعی به طور تجربی بررسی شده است. برای ردیابی شعله از ترموکوپل‌هایی در دیواره‌ی مشعل که در راستای محور مشعل قرار گرفته‌اند، استفاده شده است. نتایج به صورت توزیع دمای دیواره در زمان‌های مختلف ارائه شده است. در این آزمون‌ها دو حالت در روند حرکتی شعله مشاهده می‌شود. حالت اول، حرکت سریع شعله به سطح زیرین محیط متخلخل است (با عنوان پرش شعله از محیط) و در حالت دوم پس از گذشت زمانی مشخص، شعله به تدریج در درون سرامیک نفوذ نموده و پس از طی مسیر کوتاهی در درون آن، به حالت زیر سطح در می‌آید (با عنوان عبور شعله از محیط). با انجام آزمایش‌های متعدد وقوع هر یک از حالات فوق با تغییر عواملی همچون نسبت هم‌ارزی، نرخ آتش، چگای حفره و ضخامت محیط متخلخل بررسی شده است.

### کلمات کلیدی

محیط متخلخل، احتراق، برگشت شعله، حرکت موج احتراق.

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات  
Email: Hashemi@Kashanu.ac.ir

## ۱- مقدمه

فن آوری مشعل‌های متخلخل با داشتن ویژگی‌های برجسته‌ای چون افزایش محدوده دینامیکی توان، کاهش تولید آلودگی، کاهش حجم دستگاه و کاهش تولید سر و صدا و غیره توانسته است که در بسیاری از شاخه‌های صنعتی همچون صنایع غذایی، نیروگاه‌ها و سامانه‌های گرمایش مکان‌های مسکونی و تجاری مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گیرد [۱۰].

نحوه انتقال حرارت در مشعل‌های معمولی از راه جابجایی است که توسط محصولات احتراق انجام می‌شود. در حالی که در مشعل‌های متخلخل، علاوه بر جابجایی، مکانیزم‌های هدایت و تابش نیز نقش عمده‌ای را در انتقال حرارت مشعل ایفا می‌نماید. اجسام متخلخل دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به گازها هستند، بنابراین انتقال حرارت در خلاف جهت جریان مخلوط گاز از محصولات احتراق به مواد نسوخته میسر شده و منجر می‌شود تا دمای گاز بالادست (مخلوط نسوخته) به دمای اشتعال برسد. تابش حرارتی و بالا بودن ضریب هدایت حرارتی محیط متخلخل علاوه بر اینکه موجب افزایش انتقال حرارت از منطقه واکنش می‌شود، موجب کاهش دمای بیشینه‌ی شعله نیز می‌شود. کاهش دمای شعله، کاهش تولید آلاینده  $NO_x$  را در پی دارد [۱۰ و ۱۱].

بیشتر مواد و ترکیبات تشکیل‌دهنده محیط متخلخل در این مشعل‌ها، سرامیک‌های پایدار شده و یا الیاف فلزی هستند. مواد پایه سرامیک‌ها اغلب شامل سیلیکون کرباید (SiC)، آلومینا  $Al_2O_3$  و زیرکونیا ( $ZrO_2$ ) می‌باشد. جنس الیاف فلزی نیز از آلیاژهایی مانند آهن، کروم، آلومینیوم و یا آلیاژهای نیکل است که مقاومت بالایی در برابر اکسید شدن در دماهای بالا دارند [۱۱].

احتراق در محیط‌های 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 شعله‌های پیش مخلوط از اهداف اولیه به‌کارگیری محیط متخلخل در احتراق است. البته بعدها مزایای فراوان آن‌ها باعث شد تا تحقیقات وسیع‌تر و بیشتری در این زمینه انجام شود. بر اساس آزمایش‌هایی که توسط بابکین [۱۲] انجام شد، 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:

$$Pe = \frac{s_f \cdot d_m \cdot c_p \cdot \rho_f}{\lambda_f} \quad (1)$$

که در آن  $s_f$  سرعت شعله آرام،  $d_m$  قطر معادل

حفره‌ها،  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه گاز،  $\rho_f$  چگالی گاز و  $\lambda_f$  ضریب هدایت حرارتی گاز می‌باشد.

برنر و همکاران [۷] روی شعله‌ی پایدار داخل محیط متخلخل به صورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه نمودند. دستگاه آزمایشگاهی آن‌ها یک مشعل  $10\text{ kW}$  با مقطع مستطیلی بود که توسط یک مبدل حرارتی در دیواره‌ی آن شعله را در محلی خاص پایدار می‌نمود. جنس محیط متخلخل پایین‌دست از ساختار لایه‌ای  $Al_2O_3$  و SiC بود. 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. دیامانتیس و همکاران [۸] شعله‌ی پیش مخلوط را در محیط متخلخل مدل‌سازی نمودند. مدل آن‌ها ساختار شعله را در محیط تک لایه و دو لایه بررسی می‌کرد. نتایج نشان داد که در شعله‌ی پایدارشده‌ی سطحی، سرعت کمتر از سرعت شعله‌ی آرام است. در مقابل در شعله‌های مدفون، سرعت شعله بیش از سرعت شعله‌ی آرام است. مین و همکاران [۹] مطالعه‌ی تئوری و تجربی در زمینه‌ی احتراق در محیط‌های متخلخل انجام دادند. آن‌ها در این تحلیل از سرامیک‌های لانه زنبوری استفاده نمودند این محیط‌ها به صورت استوانه‌ای و با قطر  $7/6\text{ cm}$  و طول  $1/9\text{ cm}$  و دارای تخلخل  $75\%$  بود و جنس آن‌ها از منیزیم آلومینا سیلیکات بود. نتایج نشان می‌داد که بازه‌ی شعله‌پذیری و پایداری شعله در مقایسه با شعله‌ی آزاد بیشتر شده است. هم‌چنین تحلیل عددی نشان می‌داد شعله در پایین دست جریان پایدار می‌شود اما به دلیل وجود تلفات حرارتی، آزمایش‌ها این رفتار را نشان نمی‌داد. هم‌چنین در نسبت هم‌ارزی  $0/49$  و  $0/66$  سرعت شعله‌ی پایدار از سرعت شعله‌ی آرام بیشتر بود. وگل و الزی [۱۰] پایداری شعله را در حالت زیر آدیاباتیک و فوق آدیاباتیک (هنگامی که سرعت شعله کمتر و بیشتر از سرعت شعله آرام باشد) در یک مشعل متخلخل دو قسمتی فلزی از آلیاژ آهن و کروم بررسی نمودند آن‌ها در نسبت هم‌ارزی  $0/7$  هر دو نوع احتراق را دیدند در هر دو نوع، شعله در نزدیکی و یا بر روی فصل مشترک دو محیط تشکیل شده است. در نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر از  $0/7$  فقط عملکرد زیر آدیاباتیک دیده می‌شود. هم‌چنین حالت فوق آدیاباتیک را فقط در نسبت هم‌ارزی کمتر از  $0/65$  مشاهده نمودند.

محققان روسی در زمینه احتراق گذرای مشعل‌های متخلخل تحقیقاتی را انجام داده‌اند [۶]. سیستم‌های احتراق گذرا

پایه سرعت انتشار موج احتراقی به رژیم‌های مجزایی زمان از لحظه جرقه تا رسیدن به پایداری کامل شعله در محیط متخلخل انجام نشده است. با توجه به اهمیت شناخت حرکت شعله در مشعل متخلخل، در این تحقیق حرکت شعله داخل محیط متخلخل از سطح مشعل متخلخل تا حالت زیر سطح در دو چگالی حفره ۴ ppc و ۸ ppc در سه نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ و ۰/۷۵ و ۰/۸۵ و نرخ آتش در محدوده  $183kW/m^2 - 512$  و محیط متخلخل تک لایه و دو لایه مطالعه می‌شود. همچنین میزان نفوذ و سرعت نفوذ شعله داخل محیط متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- دستگاه آزمایش

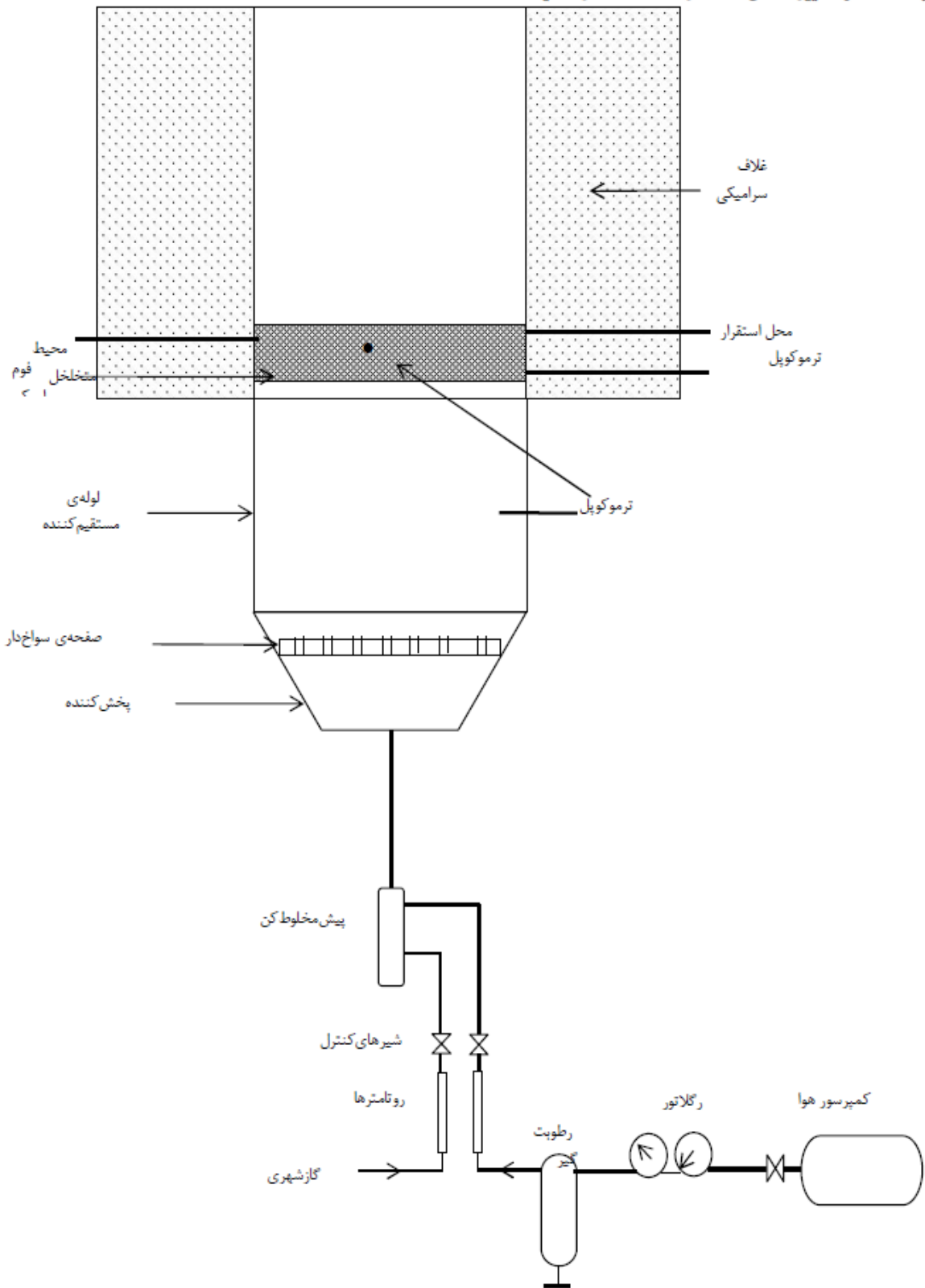
دستگاه آزمایشی که برای این منظور ساخته شده است شامل قسمت‌های مختلفی است. شکل (۱) طرح‌واره دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. در این دستگاه از یک پیش مخلوط‌کن هوا و سوخت استفاده می‌شود. این قطعه به گونه‌ای طراحی شده است که ابتدا هوای مصرفی از درون مجرا وارد شده و سپس گاز به آن اضافه می‌شود. همچنین یک پیچ تنظیم، مقدار دبی ورودی مخلوط سوخت و هوا به داخل محفظه احتراق را کنترل می‌نماید. با توجه به دامن‌های 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. برای تأمین هوا با فشار ۱ bar از یک رگلاتور تنظیم فشار استفاده می‌شود.

اندازه‌گیری دمای جانبی محیط متخلخل با استفاده از ترموکوپل‌های نوع k انجام می‌شود. سر فلزی ترموکوپل با محیط متخلخل در تماس است. دمای ترموکوپل‌ها به طور لحظه‌ای توسط یک مبدل به رایانه منتقل شده و در آنجا نمایش داده شده و ذخیره می‌شود. 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 اندازه‌گیری می‌شود. ترموکوپل‌ها به فاصله ۵mm از یکدیگر و دورتادور محیط قرار دارند و اولین ترموکوپل ۳mm زیر نشیمن‌گاه محیط است. موقعیت نمای ترموکوپل‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

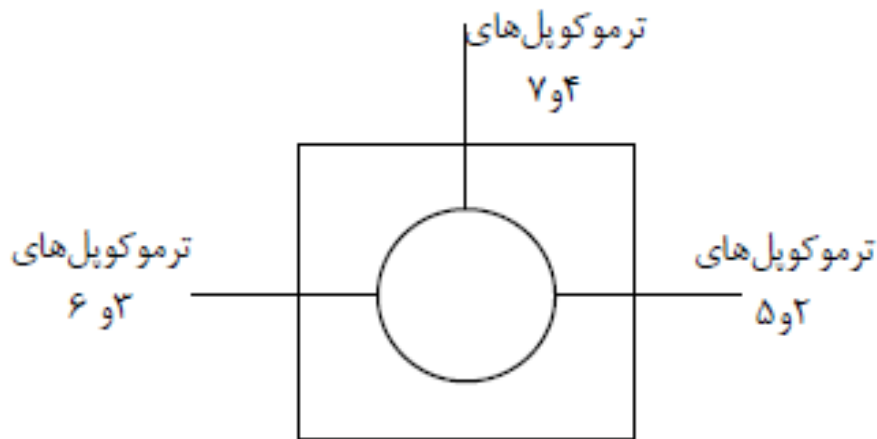
(توسط بابکین [۶] به عنوان احتراق تصفیه‌ای<sup>۱</sup> معرفی شد) بر تقسیم می‌شوند. در رژیم سرعت پایین انتقال حرارت زیادی بین گاز و جامد وجود دارد و موجب چرخش حرارت از محصولات داغ احتراق به واکنش‌دهنده‌های سرد می‌شود که منجر به احتراق فوق آدیاباتیکی می‌شود. در سیستم‌های احتراق گذرا پیچیدگی‌های فراوانی وجود دارد، زیرا حرکت ناحیه احتراقی نسبت به جامد بسته به اینکه حرکت موج احتراقی همسو یا غیر همسو با جریان گاز ورودی باشد اثر فوق آدیاباتیکی را می‌تواند افزایش یا کاهش دهد. در جریان همسو، انتقال حرارت اضافی از جامد به بالا دست جریان گاز وجود دارد و اثر فوق آدیاباتیکی افزایش می‌یابد [۱۳-۱۱]. نتایج عددی [۱۴] نشان می‌دهد که تحت شرایط مخلوط رقیق، مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده موثر بر سرعت موج احتراقی، ظرفیت حرارتی محیط متخلخل است. از سوی دیگر، ظرفیت حرارتی محیط متخلخل اثر ضعیفی بر حداکثر درجه حرارت دارد. وابستگی ضعیف سرعت موج و حداکثر دما در انتقال حرارت همرفتی نیز توسط محاسبات عددی در این مرجع نشان داده شده است. از دست دادن گرما به محیط اطراف از طریق دیواره‌های مشعل نیز در سرعت موج و حداکثر دما موثر هستند.

هاشمی و عطوف [۱] اثر ضخامت و تخلخل را بر عملکرد مشعل تابشی متخلخل فلزی به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش نرخ آتش، موجب افزایش دمای سطح و کاهش ضخامت محیط، موجب افزایش دمای سطح می‌شود. هاشمی و همکاران [۲] به بررسی نرخ آتش، چگالی حفره و نسبت هم‌ارزی بر محدوده‌ی پایداری شعله در محیط متخلخل SiC پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش نرخ آتش، محدوده‌ی پایداری شعله در داخل محیط متخلخل را کاهش می‌دهد. در مطالعه‌ی دیگر، هاشمی و همکاران [۳] اثر نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی را بر عملکرد مشعل متخلخل فلزی به طور تجربی مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بالاترین راندمان تابشی در مشعل با سه لایه توری با شبکه ریز در کم‌ترین نرخ آتش حاصل می‌شود.

در تحقیقات گذشته هاشمی و همکاران [۳-۱] و دیگر تحقیقات مرور شده، مسئله احتراق در محیط متخلخل به صورت پایدار بررسی شده است و بر اساس بررسی مولفین، تاکنون تحقیق تجربی در زمینه احتراق گذرا و بر اساس حرکت شعله با



شکل (۱): طرح‌واره‌ی دستگاه آزمایش



شکل (۲): محل قرارگیری ترموکوپل‌ها بر روی نگه‌دارنده‌ی سرامیکی در دستگاه (نمای از بالا)

### ۳- کمیت‌های آزمایش

دبی گاز طبیعی، دبی هوای ورودی و چگالی حفره محیط سرامیکی عواملی هستند که در این آزمایش‌ها تغییر نمایند. ضخامت محیط متخلخل در طول آزمایش، ثابت است. در این تحقیق با توجه به اینکه آزمایش‌ها بر حسب تغییر دبی جرمی سوخت و تنظیم دبی هوا هستند، بنابراین نتایج بر حسب نرخ آتش بیان می‌شوند. نرخ آتش بیانگر میزان انرژی شیمیایی سوخت بر واحد سطح بوده و از رابطه (۱) بدست می‌آید.

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

در رابطه‌ی (۲)، LHV ارزش حرارتی پایین سوخت،  $\dot{m}_f$  دبی جرمی سوخت و A سطح مقطع مشعل است. سطح مقطع مشعل دستگاه مورد آزمایش  $63 \text{ cm}^2$  می‌باشد.

عامل دیگری که در این جا مورد استفاده قرار می‌گیرد، نسبت هم‌ارزی است و به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

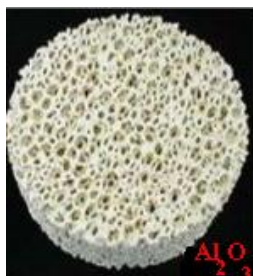
$$\phi = \frac{FA_a}{FA_s} \quad (3)$$

که در آن منظور از  $FA_a$  نسبت سوخت به هوای واقعی که در واکنش حضور دارد بوده و منظور از  $FA_s$  نسبت سوخت به هوای استوکیومتری است.

دو نوع فوم سرامیکی اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم استفاده شده در شکل (۳) نشان داده شده است. درجه‌بندی محیط‌های متخلخل اغلب بر اساس میزان تخلخل و یا اندازه‌ی متوسط حفره‌ها بیان می‌شود. میزان چگالی حفره این محیط‌ها بر اساس PPC (حفره در سانتی‌متر) تعریف می‌شود که مقدار آن برای فوم‌های استفاده شده ۴، ۸ و ۱۲ حفره در سانتی‌متر است.



(ب) اکسید سیلیسیم



(الف) اکسید آلومینیوم

شکل (۳): فوم‌های سرامیکی استفاده شده

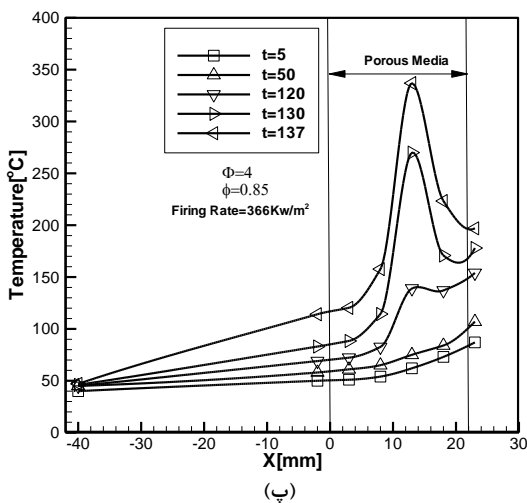
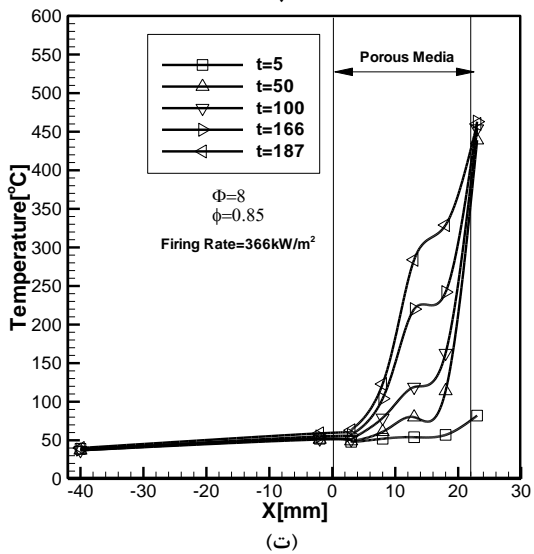
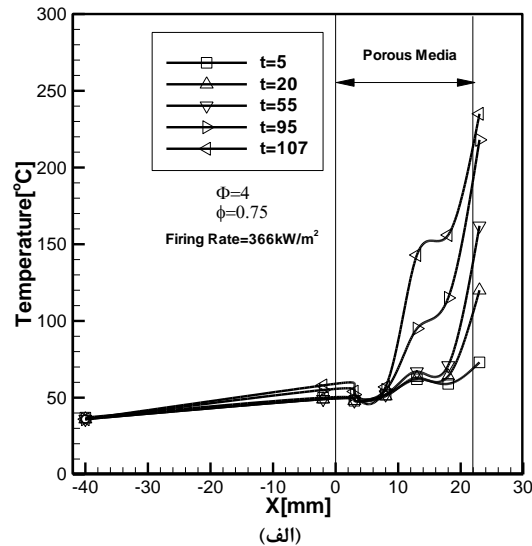
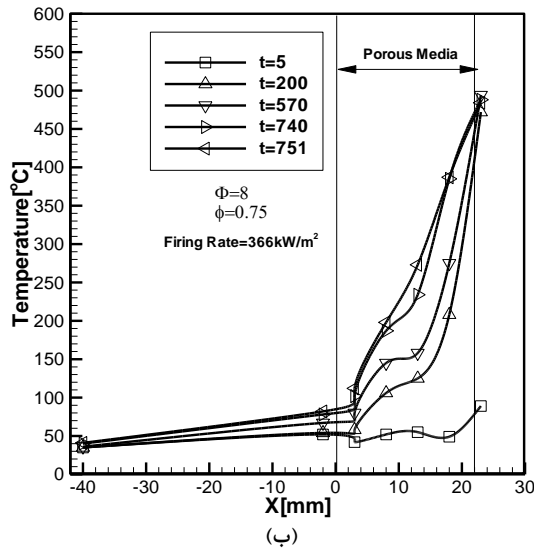
آزمایش‌ها برای نسبت هم‌ارزی رقیق ۰/۶۵ تا ۰/۸۵ که در مشعل‌های متخلخل استفاده می‌شود، انجام شده است که در هر نسبت هم‌ارزی، نرخ آتش بین مقادیر  $182/9 \text{ kW/m}^2$  تا  $512 \text{ kW/m}^2$  متغیر است. بدین منظور دبی هوا و سوخت به گونه‌ای تنظیم می‌شود که نسبت هم‌ارزی ثابت باشد. علت به کار گیری مشعل‌ها در نسبت هم‌ارزی رقیق علاوه بر کامل بودن احتراق در این حالات، بالا بودن دمای احتراق در نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک به ۱ است که موجب ذوب شدن محیط متخلخل می‌شود. لازم به ذکر است که حداکثر دمای قابل تحمل اکسید سیلیسیم ۱۶۵۰ درجه سلسیوس است.

### ۴- نتایج

پس از اینکه فوم سرامیکی اکسید سیلیسیم و ترموکوپل‌ها در غلاف سرامیکی قرار داده شدند، شیرهای کنترل گاز و هوا برای نسبت هم‌ارزی و نرخ آتش معین با استفاده از روتامتر تنظیم می‌شوند. سپس جریان مخلوط سوخت و هوا جرقه زده می‌شود و دمای ترموکوپل‌ها با زمان توسط رایانه ثبت می‌شود. طبق آزمایش‌های انجام گرفته دیده شده است که قبل از اینکه شعله به زیر سطح محیط متخلخل نفوذ نماید دو حالت در روند حرکتی شعله قابل مشاهده است. در حالت اول، پس از راه‌اندازی،

ترموکوپل‌هایی صورت گرفته است که در راستای محوری مشعل قرار گرفته‌اند. شکل ۴ این دو حالت را به صورت نمودار برای دو چگالی حفره و نسبت هم ارزی و در نرخ آتش  $366 \text{ kW/m}^2$  نشان می‌دهد. اولین منحنی مربوط به زمان ۵ ثانیه پس از زدن جرقه و آخرین منحنی نیز دمای محوری مشعل را درست قبل از عبور کامل شعله نشان می‌دهد

با گداخته شدن نسبی سطح، شعله بدون اینکه به داخل محیط متخلخل نفوذ نماید به سرعت به زیر محیط متخلخل منتقل می‌شود. این حالت عبور آبی شعله از محیط نامیده می‌شود. در حالت دوم پس از گذشت زمانی مشخص، شعله به تدریج به درون سرامیک نفوذ نموده و پس از طی مسیری درون آن، به حالت زیر سطح در می‌آید. این حالت عبور تدریجی شعله از محیط نامیده می‌شود. مشاهده‌ی این دو حالت توسط



شکل (۴): نمودارهای دمای محوری مشعل قبل از برگشت شعله در زمان‌های مختلف برای دو چگالی حفره  $4 \text{ ppc}$  و  $8 \text{ ppc}$  در دو نسبت هم‌ارزی  $0.75$  و  $0.85$  در نرخ آتش  $366 \text{ kW/m}^2$ .

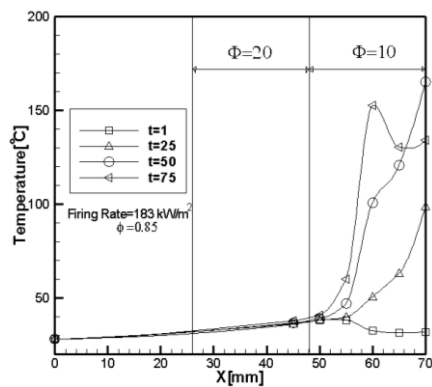
از  $4 \text{ ppc}$  (شکل ۴-الف و پ) است. زمان برگشت شعله در چگالی حفره  $8 \text{ ppc}$  و نرخ آتش  $0.75$  در شکل (۲-ب) بیشتر از سایر چگالی حفره‌ها و نرخ آتش‌ها است. در چگالی حفره  $4 \text{ ppc}$  و نسبت هم‌ارزی  $0.85$  (شکل ۴-پ) عبور شعله از محیط داریم. ولی این پدیده در شکل (۴-الف) دیده نمی‌شود. با توجه به اینکه میزان انرژی آزاد شده در نسبت هم‌ارزی  $0.85$  بیشتر از نسبت هم‌ارزی  $0.75$  است و تابش

با توجه به شکل (۴) فقط در چگالی حفره  $4 \text{ ppc}$  و نسبت هم‌ارزی  $0.85$  (شکل ۴-پ) عبور تدریجی شعله از محیط متخلخل داریم و در بقیه حالات عبور آبی شعله از محیط متخلخل داریم. با توجه به شکل (۴-پ) از زمان ۱۲۰ ثانیه به بعد، شعله به تدریج در داخل سرامیک متخلخل نفوذ می‌کند. همچنین شکل (۴) نشان می‌دهد که دما در نزدیکی سطح محیط متخلخل در چگالی حفره  $8 \text{ ppc}$  (شکل ۴-ب و ت) بیشتر

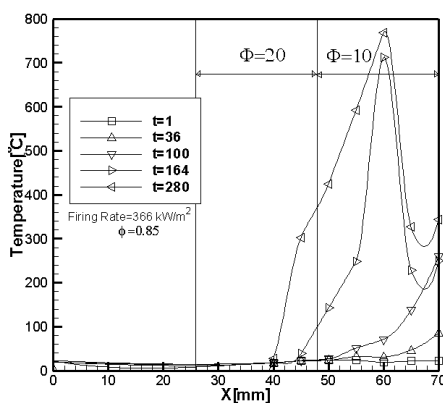
با افزایش نسبت هم‌ارزی، اثرات حرارت تابشی به لایه‌های زیرین سرامیک بیشتر است، بنابراین شعله به لایه‌های پایینی سرامیک نفوذ می‌کند. علاوه بر این، طبق رابطه (۱) عدد پکلت با نسبت هم‌ارزی رابطه مستقیم دارد و هرچه نسبت هم‌ارزی بیشتر شود،  $Re$  و عدد پکلت بزرگ‌تر می‌شود، در نتیجه احتمال اینکه در نسبت هم‌ارزی  $0/85$  شعله درون سرامیک تشکیل شود بیشتر است. در یک نرخ آتش معین، با افزایش درصد هوا و کاهش  $\phi$  سرعت جریان زیادتر می‌شود بنابراین حرارت بیشتری از ناحیه بالا دست سرامیک متخلخل توسط جابجایی جریان گرفته می‌شود. بنابراین در نسبت هم‌ارزی  $0/65$ ، برگشت شعله رخ نمی‌دهد. در سرامیک با چگالی حفره  $8ppc$ ، به دلیل تماس بیشتر سطح جانبی محیط متخلخل با دیواره‌ی (نگهدارنده‌ی) سرامیکی، حرارت اتلافی به دیواره‌های جانبی، بیشتر می‌شود. به علاوه، در این نوع سرامیک مقدار تابش صادره از سطح داغ به محیط اطراف (نسبت به تابش نفوذی به لایه‌های زیرین) بیشتر است. عبور مخلوط هوا و گاز سرد نیز در برخورد با شبکه‌ی جامد متراکم‌تر، سبب می‌شود تا لایه‌های زیرین ماده‌ی متخلخل خنک شوند. همچنین عدد پکلت به دلیل کمتر بودن اندازه قطر حفره-ها و  $Re$  کمتر است، مجموعه‌ی این عوامل، باعث می‌شوند که در سرامیک با چگالی حفره  $8ppc$  برگشت شعله دیرتر رخ دهد. برای بقیه نسبت‌های هم‌ارزی عبور آنی شعله از محیط را داریم.

صادره به لایه زیرین سطح نیز بیشتر است، در نتیجه شعله به داخل سرامیک نفوذ می‌کند. در چگالی حفره  $4ppc$  نسبت به چگالی حفره  $8ppc$ ، تابش بیش‌تری به دلیل اندازه قطر بیشتر حفره‌ها به لایه‌های پایینی سرامیک نفوذ کرده است و شعله به محیط نفوذ می‌کند و از آنجا که شعله در زمان بازگشت به پایین محیط نزدیک‌تر است، دمای  $T2$  در زمان برگشت شعله بیشتر است.

جدول (۱) وقوع پدیده‌های مربوط به حالات ۱ (پرش شعله از محیط) و ۲ (عبور شعله از محیط) را در دو چگالی حفره  $4ppc$  و  $8ppc$  نشان می‌دهند. از جدول ۱ دیده می‌شود که به وجود آمدن دو حالت ۱ و ۲ در یک آزمایش بستگی به چگالی حفره، نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی دارد. برای سرامیک با چگالی حفره  $4ppc$  در دو نسبت هم‌ارزی  $0/65$  و  $0/85$  هر دو حالت ۱ و ۲ رخ می‌دهد. اما در  $\phi=0/75$  در همه نرخ آتش‌ها فقط حالت ۱ رخ می‌دهد. همچنین در  $\phi=0/65$  تعداد دفعاتی که حالت ۲ اتفاق می‌افتد کمتر از این تعداد در  $\phi=0/85$  می‌باشد، بدلیل اینکه در نسبت هم‌ارزی  $0/65$  و چگالی حفره  $8ppc$  برگشت شعله رخ نمی‌دهد. در این نسبت هم‌ارزی و چگالی حفره، ستون‌های مربوط به  $\phi=0/65$  حذف شده‌اند. همچنین در سرامیک با چگالی حفره  $8ppc$  به غیر از نرخ آتش  $512 \text{ kW/m}^2$  در  $\phi=0/85$  در تمامی آزمایش‌ها حالت ۱ اتفاق می‌افتد.



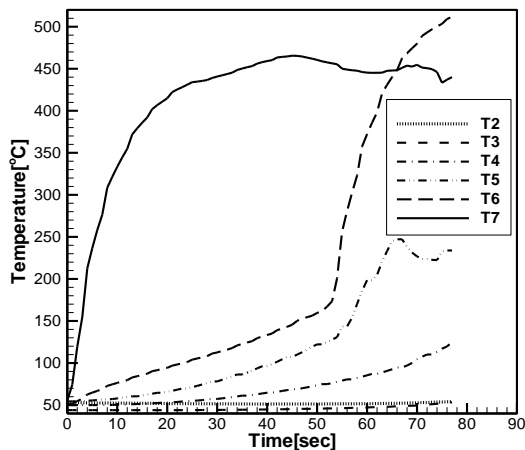
(الف)



(ب)

جدول ۱: بررسی وقوع حالات ۱ (پرش شعله از محیط) و ۲ (عبور شعله از محیط) در سرامیک با چگالی حفره  $4ppc$  و  $8ppc$  برای نسبت هم‌ارزی  $0/65$ ،  $0/75$  و  $0/85$

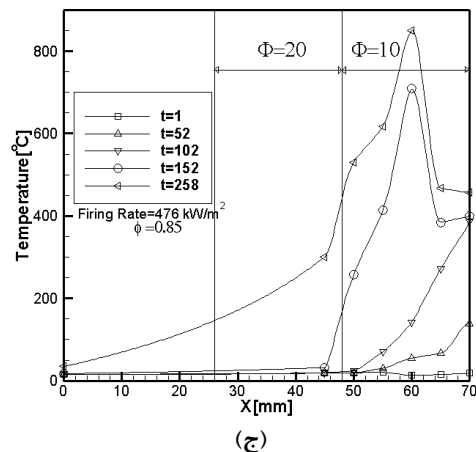
نرخ آتش ( $\text{kW/m}^2$ )	چگالی حفره $4ppc$		چگالی حفره $8ppc$	
	$0/65$	$0/75$	$0/85$	$0/75$
۱۸۳	۱	۱	۲	۱
۲۲۰	۲	۱	۲	۱
۲۵۶	۱	۱	۱	۱
۲۹۳	۱	۱	۱	۱
۳۲۹	۲	۱	۱	۱
۴۰۲	۱	۱	۲	۱
۴۳۹	۱	۱	۲	۱
۴۷۶	۱	۱	۲	۱
۵۱۲	۱	۱	۱	۲



شکل (۶): نمودار زمانی دمای T2 تا T7 در چگالی حفره ۸ ppc، نسبت هم‌ارزی ۰/۸۵ و نرخ آتش ۵۱۲kW/m<sup>2</sup>.

با توجه به شکل (۶) قبل از اینکه پدیده‌ی برگشت شعله به حالت زیر سطح رخ دهد، ترموکوپلی که در نهایت به دمای بیشینه می‌رسد (و البته از دمای T7 بیشتر است)، در یک زمان ناگهان دمای آن صعود پیدا می‌نماید. این افزایش ناگهانی به دلیل نزدیک شدن شعله به سطح و افزایش میزان انتقال حرارت تابشی و هدایت به لایه‌های زیرین سطح است. بر این اساس مبنای محاسبه‌ی سرعت نفوذ شعله به داخل سرامیک به این گونه است که: حداکثر فاصله‌ی مکان تشکیل شعله تا سطح به عنوان فاصله‌ی مکانی و بازه‌ی زمانی بین زمان شروع برگشت شعله تا افزایش ناگهانی دما به عنوان زمان نفوذ شعله در نظر گرفته شده است.

در شکل (۷) سرعت نفوذ شعله بر حسب نرخ آتش برای دو نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ و ۰/۸۵ نشان داده شده است. دیده می‌شود که سرعت نفوذ برای نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ با افزایش نرخ آتش کاهش می‌یابد. برای نسبت هم‌ارزی ۰/۸۵ سرعت نفوذ، ابتدا افزایش یافته و سپس به طور ناگهانی کاهش می‌یابد. نکته‌ی دیگری که شکل (۶) نشان می‌دهد آن است که سرعت نفوذ در داخل محیط متخلخل سرامیکی از جنس SiC در مقایسه با سرعت جریان (و نیز سرعت شعله‌ی آرام) بسیار کمتر است. سرعت‌های نفوذ شعله در وضعیت‌های نشان داده شده از مرتبه‌ی ۱mm/s هستند. نتیجه‌ی بدست آمده در این مطالعه مشابه نتیجه‌ای است که در مرجع [۱۳] برای مخلوط‌های بسیار رقیق (در حد  $\phi=0/1$ ) گفته شده است.



(ج)

شکل (۵): نمودارهای دمای محوری مشعل قبل از برگشت شعله در زمان‌های مختلف برای حالت ترکیبی چگالی حفره ۴ ppc و ۸ ppc در نسبت هم‌ارزی ۰/۸۵ در (الف) نرخ آتش ۱۸۲kW/m<sup>2</sup> (ب) نرخ آتش ۳۶۶kW/m<sup>2</sup> (ج) نرخ آتش ۴۷۶kW/m<sup>2</sup>

برای بررسی اثر ضخامت محیط متخلخل یک سری آزمون در حالت ترکیبی دو محیط ۸ ppc و ۱۲ ppc انجام شده است به طوری که محیط متراکم‌تر در زیر و محیط با سوراخ‌های درشت‌تر در بالا قرار دارد. در این شرایط تعداد ۵ ترموکوپل در محیط متخلخل بالایی (منطقه احتراق) و یک ترموکوپل در سطح تماس دو محیط متخلخل ولی در تماس با محیط با حفره‌های ریزتر (محیط زیرین) قرار دارد و همچنین ترموکوپلی دمای مخلوط ورودی را اندازه‌گیری می‌کند. این تست در نسبت هم‌ارزی ۰/۸۵ و در سه نرخ آتش انجام شده است که نتایج آن در شکل (۵) نشان داده شده است.

از شکل ۴ دیده می‌شود که شعله در محیط با حفره‌های درشت‌تر تشکیل شده است؛ بنابراین برگشت شعله رفتاری مشابه با حالت تک لایه‌ای با حفره‌های درشت دارد. افزایش ضخامت محیط متخلخل بر روی زمان برگشت شعله تأثیر می‌گذارد به طوری که با دو برابر شدن ضخامت محیط متخلخل، زمان برگشت شعله دو برابر می‌شود.

برای پی بردن به چگونگی فرایند تغییر دمای محوری مشعل با زمان، شکل (۴) نمونه‌ای از نمودار زمانی دمای ترموکوپل‌های T2 تا T7 را برای نرخ آتش ۵۱۲kW/m<sup>2</sup> در  $\phi=0/85$  در چگالی حفره ۸ ppc نشان می‌دهد. این شکل، زمان افزایش ناگهانی دمای ترموکوپل‌های T5 و T6 را نیز نشان می‌دهد که معیاری از نفوذ شعله به داخل محیط متخلخل است.



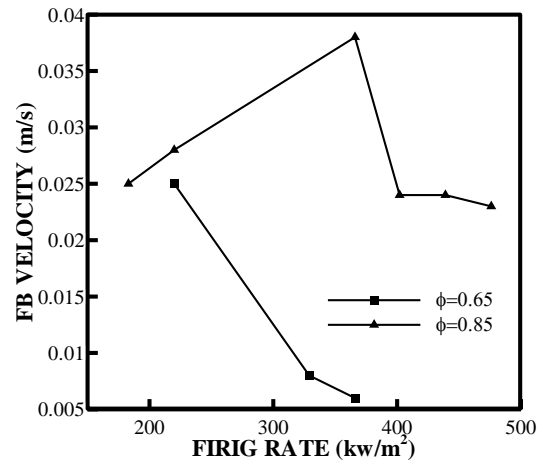
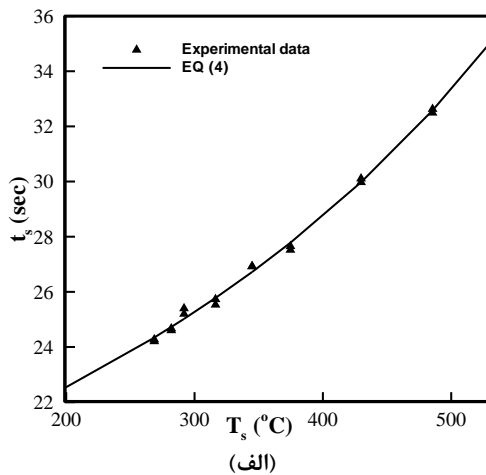
دمای محیط هستند با سطح محیط متخلخل تماس داده می‌شوند و افزایش دمای ترموکوپل‌ها با زمان توسط رایانه ثبت می‌شود. پس از رسیدن به حالت پایا و عدم تغییر دمای ترموکوپل‌ها، دمای پایا  $T_s$  و زمان پاسخ  $t_s$  اندازه‌گیری می‌شود (زمان پاسخ زمان مورد نیاز برای رسیدن به  $0.63$  دمای پایداری است [۱۵]). این آزمایش چندین بار برای دماهای مختلف سطح محیط متخلخل انجام می‌شود. با استفاده از داده‌های به‌دست آمده برای دمای پایداری و زمان پایداری، یک منحنی با استفاده از نرم‌افزار لب فیت برازش داده می‌شود. رابطه زمان پایداری بر حسب دمای پایداری با توجه به برازش داده‌ها به صورت رابطه (۴) است:

$$t_s = 1/(-0.0000917T_s + 0.023607) \quad (4)$$

در شکل (۷-الف) نمودار برازش شده زمان پایداری بر حسب دمای پایداری معادله (۴) به همراه داده‌های تجربی رسم شده است.

دماهای ثبت شده ترموکوپل‌ها بر حسب زمان با استفاده از دمای پایداری ( $T_s$ ) و زمان پایداری ( $t_s$ ) بی بعد شده است. یک منحنی از میان داده‌های بی بعد دما و زمان با استفاده از نرم افزار لب فیت برازش داده شده است. معادله (۵) دمای بی بعد بر حسب زمان بی بعد است:

$$\frac{T}{T_s} = 1 - 0.90056 \exp\left(-4.2673 \frac{t}{t_s}\right) \quad (5)$$



شکل (۵): سرعت نفوذ شعله بر حسب نرخ آتش در دو نسبت هم‌ارزی

## ۵- بررسی خطاهای آزمایش

یکی از مباحث مهمی که در انجام مطالعات آزمایشگاهی مطرح می‌شود، برآورد میزان خطای موجود در نتایج است. خطاهایی که در یک فرایند آزمایشگاهی می‌تواند به وجود آید شامل خطای موجود در وسایل اندازه‌گیری، خطای اندازه‌گیری و خطای موجود در محاسبات هستند. با توجه به ساده بودن معادلات به کار رفته و کم مقدار بودن حجم محاسبات، میزان خطای ناشی از گرد نمودن و عملیات محاسباتی بسیار اندک و قابل چشم‌پوشی است.

خطاهای موجود در یک وسیله در بدترین حالت با هم جمع می‌شوند. خطاهای موجود در ابزارهای اندازه‌گیری با توجه به مشخصات ارائه شده از طرف سازندگان عبارتند از:

خطای ثبت زمان ناشی از پاسخ زمانی ترموکوپل‌ها  
 خطای خواندن دمای ترموکوپل:  $0.1$  درجه سلسیوس  
 خطای اندازه‌گیری دما به وسیله ترموکوپل: تا  $4$  درجه سلسیوس

خطای روتامتر گاز:  $0.2$  لیتر بر دقیقه

خطای روتامتر هوا:  $0.14$  مترمکعب بر ساعت

علاوه بر خطاهای فوق مربوط به ترموکوپل‌ها، خطای ناشی از پاسخ زمانی یا واکنش ترموکوپل‌ها به طور معمول به عنوان یک عامل محدودکننده در اندازه‌گیری دمای گذرا تلقی می‌شود. دماهای اندازه‌گیری شده بر حسب زمان، بدون در نظر گرفتن اثر پاسخ زمانی ترموکوپل‌ها از قطعیت مناسبی برخوردار نیست و پاسخ زمانی می‌تواند تأثیرات مهمی در خطای آزمایش در حالت گذرا داشته باشد [۱۵]. بدین منظور آزمایش‌هایی برای پی بردن به اثر پاسخ زمانی ترموکوپل در خطای اندازه‌گیری دماها، انجام شد. روش آزمایش به این شرح است که شعله پایدار و مدفون (در این حالت دمای محیط متخلخل نسبت به زمان ثابت است) در محیط متخلخل ایجاد می‌شود، سپس ترموکوپل‌هایی را که در

افزایش و با زمان، کاهش یافته و از زمان ۳۰ ثانیه به بعد خطا کمتر از ۱۰ درصد بوده و این مقدار با کاهش دما و افزایش زمان کاهش می‌یابد.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله چگونگی حرکت شعله در یک سرامیک متخلخل از جنس سرامیک با تغییر عواملی همچون نسبت هم‌ارزی، میزان تخلخل، نرخ آتش، ضخامت محیط متخلخل در شرایط گذرا به صورت تجربی پرداخته شد و نتایج زیر حاصل شد:

(۱) در آزمایش‌ها دیده شده است که قبل از اینکه شعله به حالت زیر سطحی درآید، دو حالت در روند حرکتی آن پدید می‌آید. در حالت اول، پس از راه‌اندازی، پس از گداخته شدن نسبی سطح، به سرعت به سمت پایین دست سرامیک منتقل می‌شود. در این حالت شعله در داخل سرامیک نفوذ نمی‌نماید. در حالت دوم پس از آنکه سرامیک گرم شد، شعله به تدریج در درون سرامیک نفوذ نموده و پس از طی مسیر کوتاهی به حالت زیر سطح در می‌آید.

(۲) بر خلاف ایجاد رژیم فوق‌آدیاباتیک در نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ بر خلاف چگالی حفره ۴ در چگالی حفره ۸ برگشت شعله رخ نمی‌دهد.

(۳) در چگالی حفره ۸ تنها در نرخ آتش  $512 \text{ kW/m}^2$  در  $\varphi=0/85$  برگشت نماید رخ می‌دهد. در بقیه‌ی شرایط مربوط به این چگالی حفره، پرش شعله از محیط روی می‌دهد.

(۴) حداکثر میزان نفوذ شعله در داخل محیط متخلخل برابر ۱ cm است.

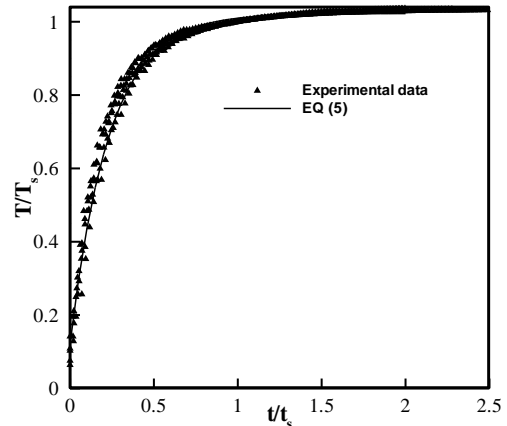
(۵) سرعت نفوذ شعله در داخل محیط متخلخل در برگشت کند از مرتبه‌ی  $1 \text{ mm/s}$  است.

### تشکر و قدردانی

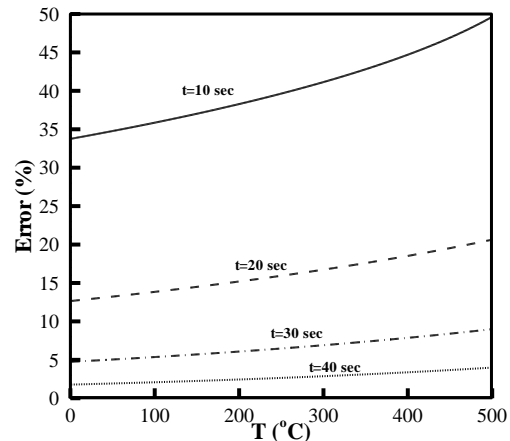
نویسندگان مایلند از پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان بخاطر حمایت از این تحقیق و آقای مهندس حسین عطوف به خاطر همکاری، تشکر و قدردانی نمایند.

[۲] هاشمی، س. ع، امینی، ج، عطوف، ح، "بررسی تجربی پایداری شعله در محیط متخلخل کاربرد سیلیسیمی"، مجله علمی پژوهشی امیرکبیر، سال ۴۳، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۰.

[۳] هاشمی، س. ع، نیکفر، م، معتقدی فرد، ر، "بررسی تجربی اثر نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی بر عملکرد مشعل متخلخل فلزی تابشی"، مجله علمی پژوهشی امیرکبیر،



(ب)



(ج)

شکل (۷): (الف) زمان پاسخ،  $t_s$  بر حسب دمای پایداری،  $T_s$  ترموکوپل (ب) دمای بی بعد بر حسب زمان بی بعد (ج) درصد خطای پاسخ زمانی ترموکوپل بر حسب دمای ترموکوپل

در شکل (۷-ب) دمای بی بعد ترموکوپل بر حسب زمان بی‌بعد برای داده‌های تجربی و منحنی برازش شده بر داده‌های تجربی نشان داده شده است. درصد خطای پاسخ زمانی ترموکوپل را می‌توان با استفاده از معادله (۶) بدست آورد:

$$Error(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{T}{T_s}\right) \quad (6)$$

در این تحقیق خطای ترموکوپل بر حسب دمای ترموکوپل،  $T$  با استفاده از حل معادلات (۴) و (۵) بدست آمده است. در شکل (۷-ج) خطای پاسخ زمانی ترموکوپل بر حسب دما رسم شده است. دیده می‌شود که خطای پاسخ زمانی با افزایش دما،

### ۷- مراجع

[۱] هاشمی، س. ع. و عطوف، ح، "بررسی تجربی اثر ضخامت و تخلخل بر عملکرد مشعل تابشی متخلخل فلزی"، نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق، سال دوم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۳۸۸.

- سال ۴۳، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۰. [۱۰]
- Vogel, B. J., and Ellzey J. L., “Subadiabatic and Superadiabatic Performance of a Two-Section Porous Burner”, *Combust. Sci. and Tech.*, 177, pp. 1323- 1338, 2005.
- Abdul Mujeebu, M., Abdullah, M.Z., Abu Bakar, M.Z., Mohamad, A.A., Abdullah, M.K., “A review of investigations on liquid fuel combustion in porous inert media”, *Journal of Environmental Management*, 90, pp. 2287– 2312, 2009. [۱۱]
- Wood, S., Harris, A. T., “Porous burners for lean-burn applications”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, pp. 667– 684, 2008. [۱۲]
- Singh, M., Singh, L.P, Husain, A., “Propagation of nonlinear travelling waves in Darcy-type porous media”, *Acta Astronautica*, 67, pp. 1053– 1058, 2010. [۱۳]
- Shih, J.R., Xie, M.Z., Liu, H., Li, G., Zhou, L., “Numerical simulation and theoretical analysis of premixed low-velocity filtration combustion”, *Heat and Mass Transfer*, 51, pp. 1818– 1829, 2008. [۱۴]
- Manual on the use of thermocouples in temperature measurement, Fourth Edition, sponsored by ASTM Committee E20 on Temperature Measurement. [۱۵]
- 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*, 3, pp. 185- 198, 2002. [۴]
- Christo, F.C., “A Parametric Analysis of a Coupled Chemistry-Radiation Model in Poious Media”, *DSTO– Research Report RR- 0188*, 2000. [۵]
- Babkin, V., “Filtrational combustion of gases: present state of affairs and prospects”, *Pure Appl Chem*, 65, pp. 335– 44, 1993. [۶]
- 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*, 123, pp. 201- 213, 2000. [۷]
- Diamantis, D.J., Mastorakos, E., and Goussis, D.A., “Simulations of premixed combustion in porous media”, *Combustion Theory and Modeling*, 6, pp. 383- 411, 2002. [۸]
- Min, D.K., and Shin, H.D., “Laminar premixed flame stabilized inside a honeycomb ceramic”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34, pp. 341- 356, 1991. [۹]

۸- زیرنویس

<sup>۱</sup> Filtration Combustion