

## بررسی تجربی پایداری شعله در محیط متخلخل فلزی - سرامیکی

سید عبدالمهدی هاشمی<sup>1\*</sup>، مجید نیکفر<sup>2</sup>

<sup>1</sup>دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

hashemi@kashanu.ac.ir

<sup>2</sup>دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

m.nikfar@me.iut.ac.ir

**چکیده:** پایداری شعله در مخلوط رقیق سوخت و هوا در یک مشعل متخلخل فلزی - سرامیکی، مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. محیط سرامیکی با قطر حفره‌های کوچک به عنوان مانع پخش شعله، روی محیط فلزی قرار می‌گیرد. موقعیت شعله به کمک پروفیل دمای جانبی در دیواره مشعل به دست می‌آید. در نسبت هم‌ارزی و نرخ آتش‌های مختلف پروفیل دما به دست می‌آید و موقعیت شعله مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که محدوده مقادیری از نرخ آتش که در آن پایداری شعله رخ می‌دهد، با افزایش نسبت هم‌ارزی به سمت 1، کاهش می‌یابد. با افزایش مقادیر نسبت هم‌ارزی، محل استقرار شعله به درون محیط متخلخل فلزی منتقل می‌شود. در هیچ یک از این نسبت‌های هم‌ارزی، شعله در محیط سرامیکی تشکیل نمی‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** محیط متخلخل، احتراق، نرخ آتش، پایداری شعله، موقعیت شعله.

1. 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... توانسته است در بسیاری از شاخه‌های صنعتی همچون صنایع غذایی، نیروگاه‌ها و سامانه‌های گرمایش مکان‌های مسکونی و تجاری مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گیرد [1].

سازوکار انتقال حرارت در مشعل‌های معمولی، از طریق هدایت و جابه‌جایی صورت گرفته توسط محصولات احتراق است؛ درحالی‌که در مشعل‌های متخلخل، علاوه بر هدایت و جابه‌جایی، سازوکار تابشی نیز نقش بسیار عمده‌ای را در انتقال حرارت مشعل ایفا می‌کند. اجسام متخلخل دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به گازها هستند؛ بنابراین، به‌واسطه آن‌ها انتقال حرارت در خلاف جهت جریان مخلوط گاز از محصولات احتراق به مواد نسوخته، طی یک اختلاف دمای کوچک‌تری تا رسیدن به دمای اشتعال صورت می‌گیرد؛ در نتیجه، طول منطقه احتراق افزایش می‌یابد و این امر سرعت شعله را افزایش می‌دهد؛ در نتیجه، محدوده شعله‌وری نیز افزایش می‌یابد.

عمده مواد و ترکیبات تشکیل دهنده محیط متخلخل در این مشعل‌ها، سرامیک‌های پایدار شده یا الیاف فلزی هستند. مواد پایه سرامیک‌ها عمدتاً شامل سلیکون کرباید (SiC)، آلومینا (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) و زیرکونیا (ZrO<sub>2</sub>) است. جنس الیاف فلزی نیز از آلیاژی‌هایی مانند آهن، کروم، آلومنیوم یا آلیاژهای نیکل است که مقاومت زیادی در برابر اکسید شدن در دماهای بالا را دارند [1 و 2].

جدول (1): خواص برخی مواد مورد استفاده در مشعل‌های متخلخل [1 و 2]

جنس ماده متخلخل	بیشینه دمای قابل تحمل °C	ضریب هدایت گرمایی W.mK <sup>-1</sup>	ضریب مقاومت در برابر شوک حرارتی	مقاومت در برابر شوک حرارتی
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1700	5 - 30	متوسط	0/28
SiC	1600	20 - 150	خیلی خوب	0/9-0/8
Zr (جامد)	2300	2 - 5	خوب	0/31
فلزات آلیاژی	1250	10 - 28	عالی	0/5-0/045

احتراق در محیط‌های متخلخل به‌طور جدی از دهه 60 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. براساس آزمایشاتی که توسط بابکین و همکاران [3] انجام گرفت، استقرار شعله در داخل جسم متخلخل، تنها زمانی می‌تواند صورت گیرد که عدد پکلت<sup>1</sup> تصحیح شده بزرگ‌تر از 65 باشد. عدد پکلت به‌صورت رابطه (1) 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،  $\rho_f$  چگالی گاز و  $\lambda_f$  ضریب هدایت حرارتی گاز است؛ البته شایان ذکر است که 65 برای گاز شهری یا همان متان محاسبه شده است.

یکی از عوامل مهم در مطالعه مشعل متخلخل، نرخ آتش (firing rate) است که بیانگر میزان انرژی شیمیایی سوخت بر واحد سطح بوده و از رابطه (2) به‌دست می‌آید.

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

در رابطه (2)،  $LHV$  ارزش حرارتی پایین سوخت،  $\dot{m}_f$  دبی جرمی سوخت و  $A$  سطح مقطع مشعل است.

برنر و همکاران [4] بررسی عددی و آزمایشگاهی بر پایداری شعله در داخل محیط متخلخل انجام دادند. در مدل عددی آن‌ها انتقال حرارت و الگوی جریان همگن برای محیط متخلخل ایجاد شده است. دستگاه آزمایشگاهی آن‌ها مشعلی 10 kW با مقطع مستطیلی است که مبدل حرارتی در دیواره آن به‌کار رفته است و توسط آن شعله را در محلی خاص پایدار می‌کنند. جنس محیط متخلخل پایین دست از ساختار لایه‌ای Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و SiC است. آن‌ها پروفیل دما و میزان آلاینده‌ها را در مبدل به‌دست آوردند و با نتایج عددی مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش نسبت هم‌ارزی<sup>2</sup> رقیق، هم دمای گاز و هم دمای جامد کاهش می‌یابد.

ساث و همکاران [5] مطالعه‌ای آزمایشگاهی و تئوری در زمینه کارکرد مشعل‌های تابشی انجام دادند. در این مطالعه، پایداری و خواص حرارتی مخلوط رقیق متان-هوا بررسی شده است. محیط متخلخل از جنس سرامیک فومی لیتیم آلومینا سیلیکات (LAS) است. در این مطالعه، ناحیه متخلخل دارای ضخامت 1/5 cm و قطر محیط متخلخل سرامیکی 2/12 cm و میزان تخلخل برحسب ppc (تعداد حفره در سانتی‌متر) برابر 3/94 است. احتراق به دو صورت پایدار می‌شود. در یک نوع، شعله در نیمه بالادست محیط متخلخل و در دیگری در لبه پایین دست محیط قرار

1. Peclet Number  
2. Equivalence Ratio

همچنین بازده تابشی اندازه‌گیری شدند. آزمایش‌ها در هفت نرخ‌آتش در محدوده بین  $170\text{kW.m}^{-2}$  تا  $340\text{kW.m}^{-2}$  و سه نسبت هم‌ارزی انجام شدند. نتایج نشان داد که دمای سطح مشعل با افزایش نرخ‌آتش افزایش می‌یابد. این مقدار برای سطح با پوشش یک‌لایه نسبت به دو لایه پایین‌تر خواهد بود و دمای گازهای داغ حاصل از احتراق با افزایش نرخ‌آتش افزایش خواهد یافت. همچنین دمای گازها برای مشعل با پوشش دو لایه نسبت به یک‌لایه افزایش می‌یابد و بازده تابشی و کلی برای مشعل دو لایه نسبت به مشعل با پوشش یک لایه اندکی افزایش خواهد داشت.

هاشمی و عطوف [11] اثر تخلخل و ضخامت را بر عملکرد یک مشعل متخلخل فلزی به‌طور تجربی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در محیط‌های با تخلخل یکنواخت با افزایش ضخامت محیط، دمای سطح و راندمان تابشی مشعل کاهش می‌یابد.

هدف از این تحقیق، بررسی کارکرد مشعل متخلخل فلزی با شعله محدودشده به‌وسیله محیط متخلخل کاربرد سیلیسیم در مخلوط رقیق سوخت گاز شهری و هوا می‌باشد. همچنین پایدارسازی شعله و موقعیت استقرار آن بررسی شده است. در دسترس بودن و سهولت در ساخت ابعاد دلخواه، از جمله مزایای محیط فلزی در مقایسه با محیط سرامیکی است. محیط متخلخل شامل ترکیبی از توری فلزی با مش‌بندی  $2/5$  حفره در سانتی‌متر و ضخامت  $10\text{ mm}$  و فوم سرامیکی از جنس کاربرد سیلیسیم با تخلخل  $8\text{ ppc}$  و ضخامت  $22\text{ mm}$  است. سطح مقطع مشعل دستگاه مورد آزمایش  $62/63\text{cm}^2$  است. با توجه به تخلخل دو محیط و رابطه (1)، در این آزمایش، از محیط سرامیکی با قطر حفره‌های کم روی محیط فلزی استفاده شده است تا موجب شود که شعله کاملاً در محدوده محیط متخلخل فلزی باشد. تمامی آزمایش‌ها با سوخت گاز طبیعی با  $\text{LHV} = 8400\text{ kcal.m}^{-3}$  انجام شده و نرخ‌آتش در محدوده  $\text{kW.m}^{-2}$   $182/9$  تا  $329\text{ kW.m}^{-2}$  است.

## 2. شرح دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایشی که برای این منظور ساخته شده، 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 شیر تنظیم، مقدار دبی مخلوط سوخت و هوای ورودی به داخل محفظه احتراق را کنترل می‌کند. شکل (1) دستگاه ساخته شده را به همراه پیش مخلوط‌کن نمایش می‌دهد.

می‌گیرد. مدل‌سازی عددی نیز همین نتیجه را پیش‌بینی می‌کند. نرخ سوختن در این آزمایش از سوختن شعله 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  $0/5$ ، شعله در پایین‌دست، جریان با سرعت متوسط جریان ورودی  $15/2$  تا  $17/3\text{ cm.s}^{-1}$  پایدار می‌شود.

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

بیدی و همکاران [7] به بررسی عددی پایداری شعله و بهینه‌سازی مشعل از نظر تولید اترویی پرداخته‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که شعله بیشتر در نیمه بالادست محیط متخلخل پایدار می‌شود و تولید آلاینده‌گی در این حالت کمتر از وقتی است که شعله در نیمه پایین‌دست جریان پایدار می‌شود.

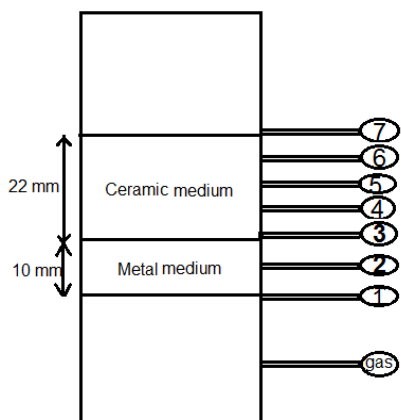
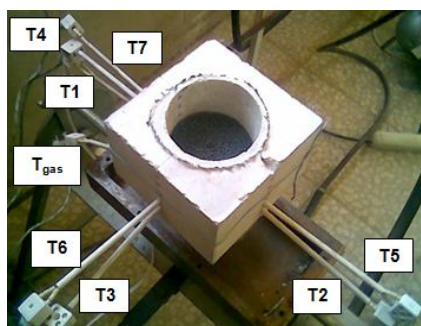
حسین‌پور و همکاران [8] مطالعه عددی بر روی احتراق پیش‌مخلوط هوا-متان در محیط متخلخل دو بعدی انجام دادند. در این مقاله، از چهار سیستیک شیمیایی چند مرحله‌ای متفاوت برای شبیه‌سازی واکنش‌های شیمیایی و بررسی اثر آن‌ها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ضریب انتقال گرمای هدایت در پایین‌دست شعله، دمای گاز و ماده متخلخل در ناحیه احتراق کاهش می‌یابد و کاهش دما موجب کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌شود. همچنین نتایج حاصل از پیش‌بینی چهار سیستیک شیمیایی مختلف با یکدیگر مطابقت دارند.

آودیک و همکاران [9] به مطالعه تجربی احتراق در یک محیط متخلخل برای مصارف خانگی پرداخته‌اند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از مشعل متخلخل می‌تواند توان حرارتی را تا  $8$  برابر مشعل‌های معمولی افزایش دهد و مقادیر  $\text{CO}$  و  $\text{NO}_x$  را کاهش دهد.

در زمینه مشعل‌های متخلخل با محیط فلزی نسبت به مشعل‌های با محیط متخلخل سرامیکی، تحقیقات کمتری صورت گرفته است. مزیت مهم این گونه مشعل‌ها بازده بالای تابشی و عیب آن‌ها پایین بودن حداکثر دمای قابل تحمل محیط متخلخل نسبت به محیط‌های سرامیکی است.

لئوناردی و همکاران [10] آزمایش‌هایی بر روی مشعل با محیط متخلخل با استفاده از فیبر فلزی انجام دادند. در این تحقیق، آزمایش‌ها با یک لایه و دو لایه توری انجام شده و دمای سطح مشعل و دمای گاز و

دمای ترموکوپل‌ها در هر ثانیه با استفاده از نرم‌افزار لب ویو<sup>1</sup> قابل اندازه‌گیری است. دمایی که به‌عنوان دمای محیط متخلخل اندازه‌گیری می‌شود، باید در حالت پایدار شعله خوانده شود. در این آزمایش، متناسب با شکل محیط‌های متخلخل و برای هم‌محور قرارگرفتن آن‌ها نگهدارنده‌ای با مقاومت حرارتی بالا ساخته شده 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 5 میلی‌متر از یکدیگر و در دور تا دور محیط قرار دارند. اولین ترموکوپل ابتدای محیط متخلخل فلزی قرار دارد. ترموکوپل‌های شماره 1 و 2 در محیط فلزی، ترموکوپل شماره 3 در مرز مشترک دو محیط متخلخل و در تماس با محیط سرامیکی است و ترموکوپل شماره 4 تا 7 در محیط سرامیکی قرار دارند. موقیعت ترموکوپل‌ها در شکل (3) نشان داده شده است. شایان ذکر است که دمای اندازه‌گیری شده دمای سطح جانبی محیط متخلخل است که با دمای مرکز آن متفاوت است (اگر 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 (3): نحوه قرارگرفتن ترموکوپل‌ها



شکل (1): دستگاه مشعل متخلخل

با توجه به دامنه دبی‌های مورد استفاده از دو عدد رواتر مناسب برای اندازه‌گیری دبی هوا و گاز استفاده شده است. هوای مورد نیاز توسط کمپرسور تأمین می‌شود و گاز مصرفی، گاز طبیعی شهری است که خواص آن از شرکت گاز منطقه‌ای استعلام شده است. به‌منظور تأمین هوا با فشار 1bar، از یک رگولاتور تنظیم فشار استفاده می‌شود. همچنین یک فیلتر هوا بر سر راه هوای ورودی از کمپرسور به رواتر نصب شده است تا از راه یافتن قطرات آب ناشی از فشرده‌سازی هوا در کمپرسور، به داخل رواتر جلوگیری شود. ورود این قطرات آب به داخل رواتر، باعث می‌شود که دقت اندازه‌گیری دبی هوا کاهش یابد. نحوه اتصال رواترها و کمپرسور و همچنین قرارگرفتن فیلتر هوا در شکل (2) به‌طور کامل نشان داده شده است. اندازه‌گیری دمای جانبی محیط متخلخل با استفاده از ترموکوپل‌های نوع k انجام می‌شود. سر فلزی ترموکوپل دقیقاً با فوم سرامیکی در تماس است. ترموکوپل‌ها به‌وسیله دو مازول تیپ k و g، مبدل پورت و منبع تغذیه به دستگاه رایانه متصل می‌شود.



شکل (2): نحوه اتصال فیلتر هوا و رواترها به کمپرسور

### 3. نتایج آزمایش

دبی گاز طبیعی و دبی هوای ورودی پارامترهایی هستند که در این آزمایش‌ها تغییر می‌کنند. ضخامت و تخلخل محیط سرامیکی و فلزی در همه آزمایش‌ها یکسان است. نتایج مربوط به چنین آزمایش‌هایی در منابع مختلف بر حسب نرخ آتش [12] و نسبت هم‌ارزی [13] ارائه می‌شوند که بستگی به نحوه آزمایش دارند. در این تحقیق، با توجه به اینکه آزمایش‌ها بر حسب تغییر دبی جرمی سوخت و تنظیم دبی هوا است، نتایج در هر نسبت هم‌ارزی بر حسب نرخ آتش بیان می‌شوند. آزمایش‌ها برای نسبت هم‌ارزی 0/65 و 0/7 و 0/75 انجام شده است که در هر نسبت هم‌ارزی، نرخ آتش 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.

#### 1.3. روند پایدارشدن شعله در محیط

پایدارشدن شعله در یک مکان خاص در محیط متخلخل، مستلزم گذشت زمان است. مدت زمان رسیدن به پایداری به عواملی همچون جنس محیط و پیش‌گرم‌بودن آن بستگی دارد. آزمایش‌ها نشان داد در نسبت هم‌ارزی 0/65، شعله بین مقادیر نرخ آتش  $182/9 \text{ kW.m}^{-2}$  تا  $329/2 \text{ kW.m}^{-2}$  تشکیل و پایدار می‌شود. تشکیل شعله و پایداری آن در نسبت هم‌ارزی 0/70 بین مقادیر نرخ آتش  $256/0 \text{ kW.m}^{-2}$  تا  $329/2 \text{ kW.m}^{-2}$  و در نسبت هم‌ارزی 0/75 بین مقادیر  $292/6 \text{ kW.m}^{-2}$  تا  $329/2 \text{ kW.m}^{-2}$  است. با توجه به آنکه پایداری شعله زمانی به دست می‌آید که دماهای اندازه‌گیری شده تقریباً مستقل از زمان شوند، در نسبت هم‌ارزی 0/7 در نرخ آتش‌های پایین‌تر از  $256 \text{ kW.m}^{-2}$  و در نسبت هم‌ارزی 0/75 در نرخ آتش‌های پایین‌تر از  $292/6 \text{ kW.m}^{-2}$  شعله پایدار تشکیل نمی‌شود و خاموش می‌شود.

شکل (4الف) نحوه تغییرات دما در هفت نقطه از محیط و سوخت و هوای ورودی را بر حسب زمان در نسبت هم‌ارزی 0/65 و نرخ آتش  $329/2 \text{ kW.m}^{-2}$  نشان می‌دهد. در این حالت، زمان پایداری شعله در حدود 1000 ثانیه است. 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 300 ثانیه دیده 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 روند افزایشی تا زمان پایدارشدن شعله دارند. این امر بیانگر استقرار شعله پس از عمل برگشت و تبادل حرارتی با محیط متخلخل سرامیکی و محیط فلزی است. شکل (4ب) نحوه تغییرات دما بر حسب زمان را برای نسبت هم‌ارزی 0/75 و نرخ آتش  $256 \text{ kW.m}^{-2}$  نشان می‌دهد. با توجه به شکل، دماها پس از حدود 15 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 است. 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.

#### 2.3. بررسی موقعیت استقرار شعله

موقعیت استقرار شعله عامل تعیین‌کننده‌ای در عملکرد آن است. بررسی موقعیت شعله با داشتن توزیع دما در محیط متخلخل، امکان‌پذیر است. موقعیت بیشترین مقدار دما، محل تشکیل شعله را نشان می‌دهد. در شکل (5-الف) نحوه تغییرات دما بر حسب مکان، از محل ورود مخلوط سوخت و هوا تا محل آخرین ترموکوپل، در نسبت هم‌ارزی 0/65 و برای نرخ آتش‌های متفاوت نشان داده شده است.

موقعیت مکانی  $x = -40 \text{ mm}$  محل ورود مخلوط سوخت و هوا و موقعیت‌های  $0 \text{ mm}$  و  $x = 30 \text{ mm}$  به ترتیب مکان، پایین‌ترین و بالاترین ترموکوپل در محیط متخلخل است. همان‌گونه که در شکل مشخص است در نرخ آتش  $182/9 \text{ kW.m}^{-2}$  شعله در مرز مشترک دو محیط متخلخل پایدار می‌شود. با زیاد شدن نرخ آتش تا مقدار  $256 \text{ kW.m}^{-2}$  مقادیر دماها در سرتاسر دو محیط متخلخل افزایش می‌یابد؛ اما مقادیر افزایش دما در محیط فلزی که قبل از احتراق قرار دارد، قدری بیشتر است. دمای آدیاباتیک محصولات احتراق تابع نسبت هم‌ارزی است که در این آزمون ثابت است. بر اثر افزایش نرخ آتش، دبی گازهای داغ احتراق افزایش می‌یابد. این افزایش دبی موجب افزایش انتقال حرارت به محیط متخلخل و افزایش دمای آن می‌شود که در شکل مشهود است. باید توجه داشت که در صورت عایق‌بودن محیط متخلخل و عدم انتقال حرارت به بیرون (اعم از افت حرارت جانبی یا انتقال حرارت از سطح خروجی)، دمای نهایی در تمام نرخ آتش‌ها باید برابر دمای آدیاباتیک شعله (که تنها تابع نسبت هم‌ارزی است) باشد. اما وجود اتلاف حرارت موجب اختلاف دما در نرخ آتش‌های مختلف می‌شود. اتلاف حرارت از محیط متخلخل، تابع خواص حرارتی آن است. در نرخ آتش  $\text{kW.m}^{-2}$  292/6 شعله داخل محیط فلزی پایدار می‌شود. با افزایش نرخ آتش، دما

اما در  $x=5\text{ mm}$  این مقدار به شدت کاهش می‌یابد و به حدود نصف می‌رسد. قطر حفره‌ها در محیط سرامیکی کمتر بوده ( $0/5\text{ mm}$ ) و سطح تماس محیط با جریان گازهای داغ بیشتر است؛ لذا دمای این محیط نسبت به نواحی داخلی محیط فلزی بیشتر است. بابکین و همکاران [3] نشان دادند که ضریب انتقال حرارت جابجایی در یک محیط متخلخل با قطر حفره‌ها نسبت عکس و با ضریب هدایت حرارتی محیط، رابطه مستقیم دارد؛ لذا بدیهی است که میزان انتقال حرارت از گازهای داغ به محیط متخلخل سرامیکی، بیشتر از محیط فلزی است؛ در نتیجه، دما در مرز دو محیط در ابتدای محیط سرامیکی بیشتر خواهد بود. شایان ذکر است که در موقعیت  $x=10\text{ mm}$  ترموکوپل در تماس با محیط متخلخل سرامیکی است. سیر نزولی دما در محیط سرامیکی به علت افت حرارت به اطراف، به علت ضریب هدایت حرارتی و ضریب صدور بالای این محیط است. در نسبت هم‌ارزی  $0/75$  محدوده‌ای از نرخ‌آتش‌ها که در آن شعله پایدار تشکیل می‌شود، کاهش می‌یابد و تنها در دو نرخ‌آتش انتهایی، شعله در زیر محیط متخلخل تشکیل می‌شود.

یکی از معیارهای مهم در پایداری شعله، در محیط متخلخل عدد پکلت است ( $Pe$ ) که در مقدمه به آن اشاره شد. برای بررسی عدد پکلت با توجه به معادله (1)، با معلوم بودن قطر حفره‌های هر یک از محیط‌های متخلخل تنها به ضریب نفوذ حرارتی مخلوط ورودی و سرعت شعله آرام بستگی دارد. در شرایط ورودی استاندارد، سرعت شعله آرام تابعی از نسبت هم‌ارزی است [14]. خواص حرارتی مخلوط ورودی نیز تابع دما و تابع ضعیفی از نسبت هم‌ارزی است. در دمای ورودی یکسان و در یک نسبت هم‌ارزی، خواص مخلوط ورودی ثابت است؛ لذا عدد پکلت برای یک نسبت هم‌ارزی ثابت بوده و تابع نرخ‌آتش نیست. مقادیر محاسبه‌شده عدد پکلت براساس قطر حفره‌های هر دو محیط متخلخل در جدول (2) آمده است.

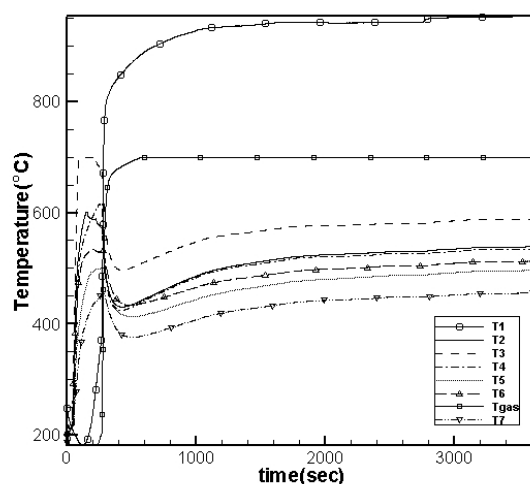
جدول (2): عدد پکلت ( $Pe$ ) در دو محیط متخلخل

نسبت هم‌ارزی	$Pe$ در محیط فلزی	$Pe$ در محیط
0/65	34	4/25
.70	48	6
.75	51/84	6/48

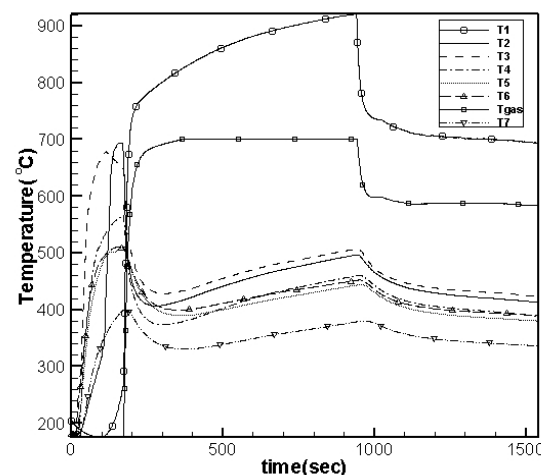
معیار بابکین [3] بیان می‌کند که در  $Pe > 65$  شعله می‌تواند داخل محیط متخلخل منتشر شود و در  $Pe < 65$  شعله امکان انتشار ندارد و خاموشی رخ می‌دهد. شایان ذکر است که انحراف معیار فوق  $\pm 15$  است [3]. با وجود این، در نسبت هم‌ارزی  $0/65$  (شکل 5- الف) مشخص است که در یک عدد پکلت ثابت ( $Pe=34$ ) شعله در داخل محیط

در محیط سرامیکی و فلزی افزایش می‌یابد. افزایش دما در محیط فلزی موجب می‌شود که دمای مخلوط نسوخته زودتر به دمای اشتعال برسد و شعله به سمت بالادست جریان شروع به حرکت کند. این روند موجب می‌شود که در نرخ‌آتش  $329/2\text{ kW.m}^{-2}$  شعله در زیر سطح محیط متخلخل فلزی تشکیل شود.

شکل (5.ب) و شکل (5.ج) تغییرات دما بر حسب مکان را به ترتیب، برای نسبت‌های هم‌ارزی  $0/70$  و  $0/75$  نشان می‌دهند. این دو شکل نشان می‌دهد که محل استقرار شعله در قسمت زیرین محیط متخلخل است. بعد از ناحیه احتراق در محیط فلزی، دما به شدت کاهش می‌یابد. در نرخ‌آتش‌های مختلف، مقادیر دما در نقاط مختلف اختلاف اندکی دارند. در محل  $x=0\text{ mm}$  سطح محیط متخلخل فلزی در معرض محصولات داغ احتراق است و دمای نسبتاً بالایی ( $860-940^\circ\text{C}$ ) دارد؛



(الف)



(ب)

شکل (4): تغییرات دما بر حسب زمان

الف. نرخ‌آتش  $329/2\text{ kW.m}^{-2}$  و نسبت هم‌ارزی  $0/65$

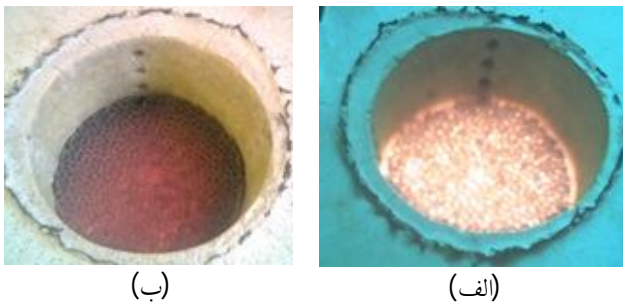
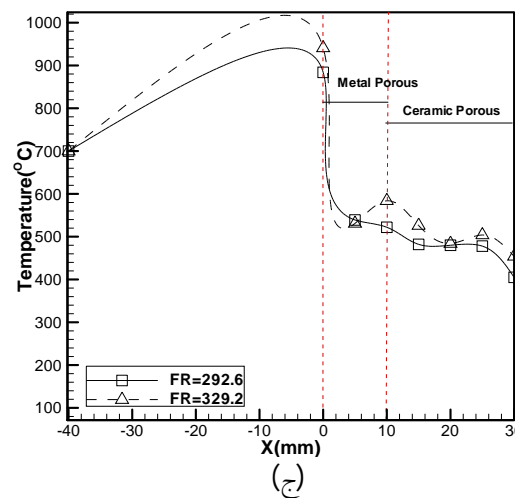
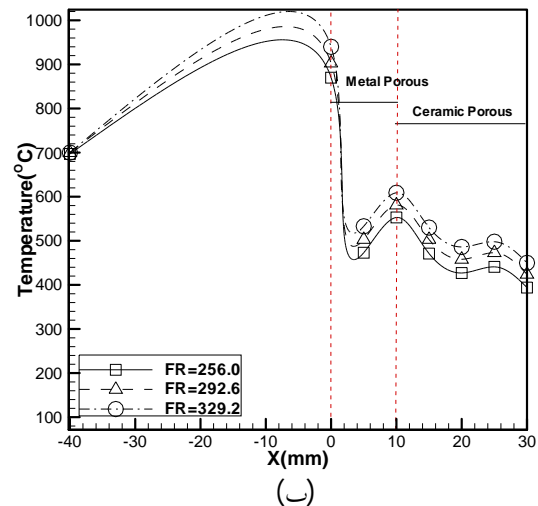
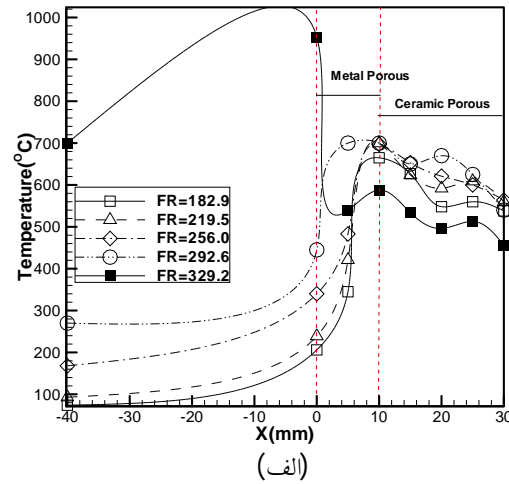
ب. نرخ‌آتش  $256\text{ kW.m}^{-2}$  و نسبت هم‌ارزی  $0/75$

حرکت کرده و در آن پایدار نیز شده است. در آزمون با دو نسبت هم‌ارزی دیگر، عدد Pe افزایش یافته و شعله در پایین محیط متخلخل تشکیل شده است.

لازم است ذکر شود که نسبت قطر حفره‌های محیط متخلخل سرامیکی به قطر حفره‌های محیط متخلخل فلزی 1 به 8 است؛ بنابراین، عدد پکلت در محیط سرامیکی، بسیار پایین‌تر از محیط فلزی است؛ لذا مشاهده می‌شود که هیچ شعله پایداری در محیط سرامیکی که مقدار عدد پکلت در آن کم است، تشکیل نمی‌شود.

سطح تابشی مشعل در نسبت هم‌ارزی 0/65 و نرخ آتش  $256/0 \text{ kW.m}^{-2}$  در شکل (6الف) نشان داده شده است. در این شکل، شعله به سطح محیط نزدیک است. هرچه شعله به سطح محیط نزدیک‌تر باشد، تابش صادرشده از سطح خارجی مشعل بیشتر است.

شکل (6ب) نیز سطح تابشی مشعل را در نسبت هم‌ارزی 0/75 و در نرخ آتش  $329/2 \text{ kW.m}^{-2}$  نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده، شعله در پایین محیط فلزی است و سطح خارجی مشعل گداختگی کمتری دارد.



(الف) (ب)

شکل (6): تصویر سطح تابشی از مشعل

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

ب. نرخ آتش  $329/2 \text{ kW.m}^{-2}$  و نسبت هم‌ارزی 0/75

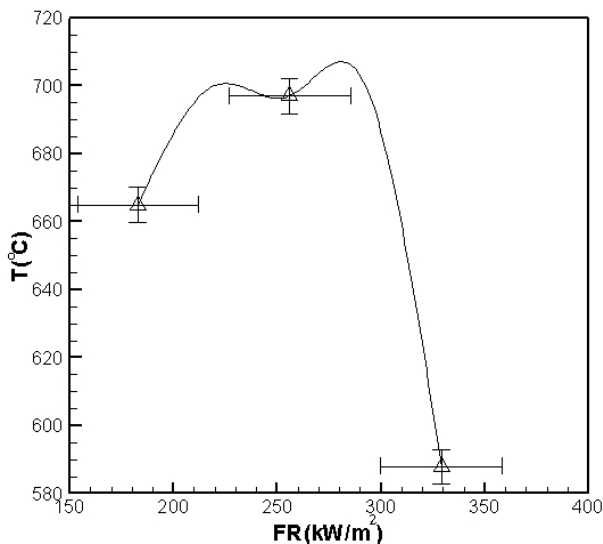
تغییرات دمایی تمامی ترموکوپل‌ها برحسب نرخ آتش در نسبت هم‌ارزی 0/65 در شکل (7) نشان داده شده است. از شکل (7) مشخص است که با افزایش نرخ آتش تا مقدار  $292/6 \text{ kW.m}^{-2}$  دمای همه ترموکوپل‌ها در محیط متخلخل فلزی افزایش یافته و تغییرات دما در محیط سرامیکی، بر اثر افزایش نرخ آتش، ناچیز است. بر اثر افزایش نرخ آتش اختلاف دمای بین  $T_2$  و  $T_3$  کاهش یافته تا در نرخ آتش  $292/6 \text{ kW.m}^{-2}$  دمای این دو نقطه یکی می‌شود. این نشان می‌دهد شعله بین این دو نقطه پایدار شده است و با افزایش نرخ آتش، به تدریج شروع به حرکت به سمت پایین محیط متخلخل فلزی می‌کند. با افزایش نرخ آتش، شعله زیر سطح محیط متخلخل فلزی پایدار می‌شود و دمای  $T_1$  ماکزیمم می‌شود و به تبع آن، دمای  $T_{\text{gas}}$  نیز افزایش می‌یابد؛ اما بقیه نقاط در محیط‌های فلزی و سرامیکی به علت فاصله گرفتن از محل شعله مقداری کاهش دما دارند.

شکل (5): تغییرات دما بر حسب موقعیت برای نرخ آتش‌های متفاوت

الف. نسبت هم‌ارزی 0/65 ب. نسبت هم‌ارزی 0/70

ج. نسبت هم‌ارزی 0/75

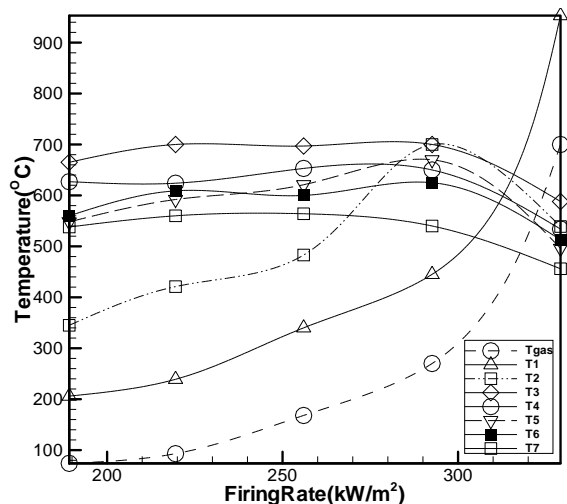
1. خطای روتامتر گاز برابر 0/2 لیتر بر دقیقه؛ 2. خطای روتامتر هوا برابر 0/14 مترمکعب بر ساعت؛ 3. خطای مربوط به درجه‌بندی ترموکوپل 5 کلوین و خطای اندازه‌گیری توسط ترموکوپل برابر 0/1 کلوین است. همچنین خطای ثبت زمانی ناشی از پاسخ زمانی ترموکوپل‌ها نیز وجود دارد که در اینجا در نظر گرفته نشده است. همچنین فرض شده است که عدم قطعیت مربوط به ارزش گرمایی گاز و ابعاد ناچیز باشد. با توجه به نتایج اصلی موجود در این تحقیق، متغیرهای متأثر از خطا شامل نسبت هم‌ارزی، نرخ‌آتش و دما می‌شود. با استفاده از روابط (2) و (3) عدم قطعیت نرخ‌آتش برابر  $kW.m^{-2}$  29/3 است؛ برای نمونه، در شکل (8) میزان تغییر عدم قطعیت دمای  $T_3$  بر حسب نرخ‌آتش، برای نسبت هم‌ارزی 0/65 نشان داده شده است.



شکل (8): عدم قطعیت دما و نرخ آتش برای پروفیل T3

### 5. نتیجه‌گیری

در این مقاله، کارکرد مشعل متخلخل فلزی-سرامیکی در مخلوط رقیق سوخت گاز طبیعی و هوا به‌طور تجربی، بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که محدوده‌ی مقادیری از نرخ‌آتش که در آن پایداری شعله رخ می‌دهد، با افزایش نسبت هم‌ارزی کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که در نسبت هم‌ارزی 0/65 به‌ازای همه‌ی مقادیر نرخ‌آتش شعله پایدار است؛ ولی در نسبت‌های هم‌ارزی 0/7 و 0/75 محدوده‌ی نرخ‌آتش‌هایی که در آن شعله پایدار داریم، کاهش می‌یابد. با افزایش



شکل (7): تغییرات دما بر حسب نرخ‌آتش در نسبت هم‌ارزی 0/65 (موقعیت ترموکوپل‌ها به ترتیب از  $T_1$  تا  $T_7$  از کف محیط متخلخل هر یک به فاصله 5 mm از دیگری است و  $T_{gas}$  40 mm زیر محیط متخلخل فلزی قرار دارد).

### 4. تحلیل خطا

یکی از مباحث مهمی که در انجام مطالعات آزمایشگاهی مطرح می‌شود، برآورد میزان خطای موجود یا عدم قطعیت در نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌هاست. در این تحقیق، از روشی که توسط هولمن [15] برای برآورد میزان خطای موجود در نتایج تجربی ارائه شده است، استفاده می‌شود. در روش مورد نظر، میزان عدم قطعیت یک کمیت وابسته از رابطه (3) به‌دست می‌آید.

$$W_R = \left( \sum \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} \times w_i \right)^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $W_R$  عدم قطعیت کمیت وابسته مورد نظر  $R$  است و  $w_i$  عدم قطعیت کمیت مستقل  $X_i$  است. خطاهای موجود در یک فرایند آزمایشگاهی، شامل سه بخش عمده است که عبارت‌اند از: خطای موجود در وسایل اندازه‌گیری، خطای اندازه‌گیری که معمولاً ناشی از بی‌دقتی پژوهشگر است و خطای موجود در محاسبات. با توجه به ساده‌بودن معادلات به‌کاررفته و کم‌بودن حجم محاسبات، میزان خطای ناشی از گردکردن و عملیات محاسباتی بسیار اندک و قابل صرف نظر است. خطاهای موجود در ابزارهای اندازه‌گیری با توجه به مشخصات ارائه‌شده از سوی سازندگان عبارت است از:



پکلت (به تبع آن نسبت هم‌ارزی) عوامل مؤثر بر پایداری و انتشار شعله در محیط متخلخل هستند.

### سپاسگزاری

نویسندگان لازم می‌دانند از پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان (شماره پژوهانه 65477) برای حمایت از این تحقیق تشکر و قدردانی کنند.

مقادیر نسبت هم‌ارزی، محل استقرار شعله به پایین محیط متخلخل منتقل می‌شود و در هیچ یک از این مقادیر، شعله در محیط سرامیکی تشکیل نمی‌شود. بیشترین تابش سطح از محیط متخلخل در نسبت هم‌ارزی 0/65 دیده می‌شود. دمای محیط متخلخل با افزایش نرخ‌آتش افزایش می‌یابد.

عدد پکلت در یک محیط متخلخل، تابع نسبت هم‌ارزی است و افزایش نسبت هم‌ارزی منجر به انتقال جبهه شعله می‌شود. از سوی دیگر، در یک نسبت هم‌ارزی ثابت با افزایش نرخ‌آتش، جبهه شعله شروع به تغییر موقعیت در محیط متخلخل می‌کند؛ لذا نرخ‌آتش و عدد

### منابع

- چند مرحله‌ای مختلف» نشریه علمی پژوهشی سوخت و احتراق، سال سوم، شماره اول، بهار و تابستان 1389.
- [1] Mobbauer, S., Pickenacker, O., Pickenacker, K., 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., 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., 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., 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., Goussis, D.A., "Simulations of Premixed Combustion in Porous Media", Combustion Theory and Modeling, Vol. 6, pp. 383-411, 2002.
- [7] Bidi, M., Nobari, M.R.H., Saffar Aval, M., "A Numerical Evaluation of Combustion in Porous Media by EGM (Entropy Generation Minimization) ", Energy, 35, pp. 3483-3500, 2010.
- [8] حسین‌پور، سیامک، معلمی خیابوی، نگین، «شبیه‌سازی عددی احتراق در محیط متخلخل در حالت دو بعدی با استفاده از چهار سازوکار شیمیایی
- [9] Avdic, F., Adzic, M., Durst, F., "Small scale porous medium combustion system for heat production in households", Appl. Energy 87, 2148-2155, 2010.
- [10] Leonardi, S.A., Viskanta, R., 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.
- [11] هاشمی، سید عبدالمهدی، عطوف، حسین، «بررسی تجربی اثر ضخامت و تخلخل بر عملکرد مشعل تابشی متخلخل فلزی»، نشریه علمی پژوهشی سوخت و احتراق، سال دوم، شماره اول، 1388.
- [12] Howell, J., Hall, M., Ellzey, L., "Combustion of Hydrocarbon Fuel within Porous Inert Media", Prog. Energy Combustion Sci., Vol. 22, pp. 121-145, 1996.
- [13] Takeno, T., 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.
- [14] Brian, J. Vogel, Janet, L. Ellzey, "Subadiabatic and Superadiabatic Performance of a Two-Section Porous Burner", Taylor & Francis Inc. Combust. Sci. and Tech., 177, 1323-1338, 2005.

[15] هولمن، جی آر، «روش‌های اندازه‌گیری در مهندسی»، ترجمه ملک‌ی و ص 97-79، 1369.

دیپایی‌نیا، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان،