

بررسی تجربی اثر نرخ آتش و نسبت هم ارزی بر عملکرد مشعل متخلخل فلزی تابشی

سید عبدالمهدی هاشمی^{۱*}، مجید نیکفر^۲، روح اله معتقدی فرد^۳

چکیده

در مقاله حاضر عملکرد یک مشعل متخلخل تابشی از نوع فلزی به طور تجربی بررسی شده است. برای بررسی اثر نرخ آتش و نسبت هم ارزی، آزمایش‌ها در پنج نرخ آتش متفاوت و در محدوده‌ای از نسبت‌های هم ارزی که شعله در محیط متخلخل پایدار است انجام شده است. عوامل فوق بر روی سه محیط متخلخل تشکیل شده از توری‌های با شبکه ریز و درشت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش نرخ آتش در اکثر حالت‌ها موجب بالا رفتن دمای سطح مشعل می‌شود. در هر نرخ آتش، مقدار نسبت هم ارزی که دمای سطح در آن بیشینه است مشخص شده است. بیشترین دمای سطح در نسبت هم ارزی‌های کمتر از یک (۰/۷-۱) بوده و راندمان تابشی مشعل با افزایش نرخ آتش کاهش می‌یابد. راندمان تابشی بیشینه در نسبت هم ارزی مربوط به دمای بیشینه سطح بدست می‌آید. در یک نرخ آتش معین، بیشینه دما برای محیط متخلخل ترکیبی (دولایه توری ریز و یک لایه توری درشت) در نسبت هم ارزی کمتری نسبت به دیگر محیط‌های متخلخل رخ می‌دهد. نتایج بدست آمده همخوانی خوبی با نتایج دیگر دارد.

کلمات کلیدی: محیط متخلخل فلزی، احتراق، مشعل تابشی، راندمان تابشی، نرخ آتش، نسبت هم ارزی

Experimental Study of the Effect of Firing Rate and Equivalence Ratio on Performance of a Porous Metal Radiant Burner

S. A. Hashemi, M. Nikfar and R. Motaghedifard

ABSTRACT

In this paper, the performance of a metal porous radiant burner is investigated experimentally. To study the effect of firing rate and equivalence ratio, some tests have been carried out in five different firing rates and in a range of equivalence ratios which the flame is stable in the porous media. These parameters have been investigated on three porous media, which are formed from fine and coarse meshes. The results show that the surface temperature increases with increasing firing rate. In each firing rate, the equivalence ratio corresponding to the maximum temperature is determined. The maximum temperature occurs in equivalence ratios less than one (0.7-1) and Radiation efficiency of the burner decreases with increasing firing rate. The maximum radiation efficiency takes place in equivalence ratio corresponding to the maximum surface temperature. In a specific firing rate, the maximum temperature for the combined porous media (two layers of fine mesh and one layer of coarse mesh) occurs in an equivalence ratio less than that of the other porous media. The obtained results are in a good agreement with the other studies.

KEYWORDS: Metal porous media, combustion, radiant burner, Radiant efficiency, firing rate, equivalence ratio

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۲/۲۶

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۷/۳

* نویسنده مسئول و استادیار، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی و پژوهشکده انرژی؛ hashemi@kashanu.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی و پژوهشکده انرژی؛ me.nikfar@yahoo.com

^۳ کارشناس ارشد، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی؛ motaghedrf@yahoo.com

می‌شود تا انتقال حرارت در خلاف جهت جریان مخلوط گاز و هوا، افزایش یافته و دمای مخلوط بالادست به دمای اشتعال برسد و در نتیجه طول ناحیه احتراق افزایش یابد. وسیع‌تر شدن ناحیه احتراق این امکان را فراهم می‌نماید تا انتقال حرارت از جسم متخلخل بهتر انجام شده و دمای ناحیه احتراق کاهش یابد و در نتیجه میزان تولید آلاینده‌هایی مانند NO که در دماهای بالا تولید می‌شوند تا حد ممکن کاهش یابد.

گفتن این مطلب لازم است که بالا بودن میزان انتقال حرارت در اجسام متخلخل فقط به دلیل داشتن ضریب انتقال حرارت بالا نیست، بلکه وجود خلل و فرج‌های بسیار در اجسام متخلخل موجب افزایش سطح انتقال حرارت و در نتیجه میزان انتقال حرارت جابجایی به همین نسبت می‌شود.

بدلیل بالا بودن دمای ناحیه‌ی احتراق و احتمال اکسیداسیون در مجاورت هوا، جنس ماده به کار رفته در متخلخل باید مقاومت حرارتی و خوردگی بالایی داشته باشد. اجسام متخلخل باید دارای خواص خوب انتقال حرارتی مانند ضریب هدایت بالا و ضریب صدور بالا باشند تا دما در ناحیه احتراق به صورت یکنواخت توزیع شده و دمای ناحیه احتراق به طور مؤثری کاهش یابد.

از آنجا که در هنگام روشن و خاموش شدن دستگاه، جسم متخلخل دچار تغییرات دمایی و شیمیایی شدید می‌شود، بنابراین جنس مواد به کار رفته به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که بتوانند در مقابل تنش‌های حرارتی و شیمیایی از خود مقاومت نشان دهند.

به طور معمول اجسام متخلخل گوناگون با ساختارهای دانه‌ای، شبکه‌ای سیمی، ایستاده، فوم‌های سرامیکی و فیبرهای سرامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

سرامیک‌ها از جمله موادی هستند که مقاومت بالایی در مقابل اکسیداسیون و حرارت از خود نشان می‌دهند. آلومینا (Al_2O_3) کاربرد سیلیکون (SiC) و اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) مهم‌ترین سرامیک‌هایی هستند که در مشعل‌های با محفظه احتراق متخلخل کاربرد دارند [۲]. با توجه به اینکه دمای محفظه احتراق در این نوع مشعل‌ها می‌تواند بالاتر از ۱۳۰۰ درجه سلسیوس برود، فقط برخی از آلیاژهای خاص مانند آلیاژهای آهن، کروم، آلومینیوم و یا آلیاژهای نیکل در این مشعل‌ها به کار رفته است [۳].

جدول (۱) خواص برخی از مواد مورد استفاده در مشعل‌ها را نشان می‌دهد [۱]. بیش‌ترین دمای کارکرد برای آلیاژهای فلزی حدود $1250^\circ C$ است. ضریب هدایت حرارتی در آلیاژهای فلزی حدود $10 W/mK$ در دمای $20^\circ C$ و $28 W/mK$ در دمای

فناوری مشعل‌های متخلخل یکی از روش‌های کاهش تولید آلودگی و مصرف انرژی است که در سال‌های اخیر توسط محققان و پژوهشگران معرفی شده است.

از جمله برتری‌های مشعل‌های متخلخل نسبت به مشعل‌های معمولی کاهش آلودگی، کاهش حجم، افزایش محدوده شعله‌وری، توزیع یکنواخت حرارت در مشعل، افزایش محدوده توان دینامیکی، کاهش سروصدا و غیره است [۱]. برتری‌های فوق در این مشعل‌ها باعث کاربرد فراوان آنها در صنایع مختلف است. برای مثال می‌توان به کاربرد این مشعل‌ها در سامانه‌های گرمایش منازل، سامانه‌های احتراق با سوخت مایع (مانند نفت)، فرایندهای تولید بخار، خشک‌کن‌ها، محفظه احتراق توربین‌های گازی، مشعل‌های تابشی، راکتورهای شیمیایی (به عنوان مولد حرارت)، صنعت شیشه‌گری، صنایع غذایی، صنعت سیمان و صنایع سرامیک اشاره نمود [۲].

روش انتقال حرارت در مشعل‌های متخلخل نسبت به مشعل‌های معمولی متفاوت است. مهم‌ترین نوع انتقال حرارت در مشعل‌های معمولی جابجایی است که از محصولات گازی احتراق به بدنه مبدل صورت می‌گیرد. در حالیکه در مشعل‌های متخلخل، علاوه بر جابجایی، هدایت و تابش نیز نقش مهمی در انتقال حرارت مشعل دارند که به دلیل قابلیت هدایت و تابش بالای مواد متخلخل است. وجود تابش موجب افزایش میزان انتقال حرارت در مشعل‌های متخلخل نسبت به مشعل‌های معمولی می‌شود که در نتیجه آن دمای ناحیه احتراق کاهش می‌یابد. این یکی از عوامل برتری مشعل‌های متخلخل نسبت به مشعل‌های معمولی است که موجب کاهش تولید NO_x می‌شود. بخشی از انرژی احتراق به قسمت ورودی مخلوط منتقل شده و موجب پیش‌گرمایش مخلوط سوخت و هوا می‌شود. عمل پیش‌گرمایش، سرعت شعله را افزایش داده و در نتیجه محدوده شعله‌وری افزایش می‌یابد. این ویژگی در مشعل‌های متخلخل این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان نسبت تنظیم مشعل را افزایش داد. عمل پیش‌گرمایش همچنین باعث افزایش پایداری احتراق می‌شود.

به‌طور معمول ناحیه احتراق در مشعل‌های معمولی پیش مخلوط، بسیار کوچک است. از آنجا که ضریب هدایت حرارتی گاز کوچک است، مخلوط از یک ناحیه کوچک به دمای اشتعال رسیده و مشتعل می‌شود. اجسام متخلخل به دلیل داشتن ضریب هدایت حرارتی بالا، می‌توانند موجب بزرگ شدن ناحیه احتراق شوند [۲]. وجود یک جسم متخلخل در مشعل باعث

۱۰۰۰°C است. انبساط حرارتی و مقاومت در برابر شوک‌های حرارتی در آلیاژهای فلزی بسیار بالا است. ضریب صدور در آلیاژهای فلزی با توجه به سطح آلیاژ و نوع پرداخت سطح آن تغییر می‌نماید. محدوده تغییرات ضریب صدور برای آلیاژهای فلزی در دمای ۳۰۰K بین ۰/۰۴۵ تا ۰/۵ است [۱]. بدیهی است این مقادیر زمانی که از این آلیاژها به صورت یک محیط متخلخل استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش نزدیک شدن محیط متخلخل به یک جسم سیاه بدلیل داشتن حفره‌های متعدد و جذب تابش در این حفره‌ها است [۴].

جدول (۱): خواص برخی مواد مورد استفاده در مشعل‌های

متخلخل [۱]

جنس ماده متخلخل	مقاومت تا دمای °C	ضریب هدایت گرمایی W/mK	ضریب صدور	نوع آلیاژ فلزی
Al ₂ O ₃	۱۷۰۰	۳-۵	۰/۲۸	متوسط
SiC	۱۶۰۰	۱۵۰-۲۰	۰/۹-۰/۸	بالا
Zr (جامد)	۲۳۰۰	۵-۲	۰/۳۱	پایین
فلزات آلیاژی	۱۲۵۰	۲۸-۱۰	۰/۵-۰/۰۴۵	بسیار بالا

شعله و راهکار پایداری احتراق را در محیط متخلخل سرامیکی فیبری در یک مشعل با کاربرد خاص بررسی نمودند. در این مشعل شعله در نزدیکی پایین دست پایدار شده و دارای تابش گرمایی بالایی است. همچنین این مطالعه تجربی نشان می‌دهد که با افزایش هوای ورودی راندمان تابش افزایش می‌یابد [۱۴]. هاشمی و عطوف اثر تخلخل و ضخامت را بر عملکرد یک مشعل متخلخل فلزی به طور تجربی بررسی نمودند [۱۵]. آنها نشان دادند که در محیط‌های با تخلخل یکنواخت با افزایش ضخامت محیط، دمای سطح و راندمان تابشی مشعل کاهش می‌یابد.

در این تحقیق با هدف دستیابی به دانش ساخت مشعل‌های تابشی با راندمان بالا، آزمایش‌هایی بر روی یک مشعل متخلخل فلزی انجام شده است. در اینجا برخلاف کارهای قبلی [۱۵] و [۱۶]، ضخامت‌های کم مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین اثر نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی بر روی دمای سطح مشعل و راندمان تابشی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- دستگاه آزمایش و عوامل مورد بررسی

نمایی از دستگاه آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. برای مخلوط شدن بهتر گاز و هوا یک پیش‌مخلوط در نظر گرفته شده است که قابلیت تنظیم دبی‌های گاز و هوا را دارد. برای اندازه‌گیری دبی هوا و گاز با توجه به دامنه‌ی دبی‌های مورد استفاده از دو عدد روماتر متناسب با دبی‌ها استفاده شده است که در شکل (۱) نشان داده شده است. روماترهای استفاده شده برای هوا و گاز طبیعی در شرایط آزمون طراحی شده‌اند و نیازی به تصحیح مقادیر با استفاده از روابط روماتر نخواهد بود. خطای اندازه‌گیری طبق اعلام شرکت سازنده $\pm 0/2$ حداکثر دبی عبوری است. هوای مورد نیاز به وسیله کمپرسور تأمین می‌شود. از گاز طبیعی به عنوان سوخت گازی استفاده می‌شود. با توجه به اطلاعات دریافتی از شرکت گاز منطقه مقدار چگالی گاز برابر با ۰/۷۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب و ارزش حرارتی خالص آن ۸۴۰۰ کیلوکالری بر متر مکعب بوده و ۸۹ درصد آن را متان تشکیل می‌دهد.

در این تحقیق محفظه احتراق برای ایجاد یک محیط مطلوب برای تولید مشعل متخلخل طراحی و ساخته شده است. بدنه اصلی این بخش از ورق‌های فولادی با ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شده‌اند. از طرفی برای قرارگرفتن لایه‌های توری به شکل مناسب روی نشیمنگاه و جلوگیری از نشت مخلوط سوخت و هوا، بر روی محفظه احتراق فلنج‌هایی تعبیه شده است. ابعاد محفظه ۱۰ در ۱۲ سانتی‌متر است که مساحت موثر

در زمینه مشعل‌های متخلخل فلزی تحقیقات کمتری نسبت به محیط‌های سرامیکی [۵] - [۱۰] انجام شده است. آزمایش‌هایی توسط کریستو و همکاران (۲۰۰۱) بر روی مشعل متخلخل آزمایشی با محیط متخلخل از جنس اینکل ۶۰۱ انجام گرفت و مقادیر دمای سطح و دمای گاز و میزان تابش صادره اندازه‌گیری شدند [۱۱]. همچنین لئوناردی و همکاران (۲۰۰۲) تحقیقات آزمایشگاهی بر روی مشعل متخلخل با محیط فلزی انجام دادند و مقادیر دمای سطح مشعل و راندمان تابشی را اندازه‌گیری نمودند [۱۲]. ووگل و الزی (۲۰۰۵) یک مشعل فلزی از جنس فکالرولی را مورد مطالعه قرار دادند و روند شعله پایدار داخل آن را بررسی نمودند [۱۳]. کیو و هایدن ساختار

اندازه‌گیری دمای سطح، استفاده از روش‌های تابشی توصیه می‌شود [۱۲].

در این سری آزمایش‌ها از یک نمونه آذرسنج که بر مبنای اندازه‌گیری میزان تابش خروجی از سطح دما را اندازه‌گیری می‌نماید استفاده شده است. اندازه‌گیری دمای سطح با استفاده از آذرسنج نیازمند داشتن مقدار ضریب صدور سطح مورد نظر است. در اصل محیط‌های متخلخل بدلیل داشتن حفره‌های متعدد در سطح، رفتاری نزدیک به یک جسم سیاه داشته و مقدار ضریب صدور آنها به عدد یک نزدیک است [۴]. البته باید توجه داشت که با توجه به اینکه هدف نهایی بررسی تابش سطح است و دما را به کمک نرخ تابش سطح محاسبه می‌نماید، برای هر مقدار ضریب صدور داده شده به دستگاه میزان تابش نهایی سطح یکسان خواهد بود. برای تعیین تجربی ضریب صدور آنها با توجه به وابستگی کم آن به دما [۴]، آزمون ساده‌ای در دمای محیط، بدون اثر خطای گازهای داغ می‌توان انجام داد. در این آزمون میزان ضریب صدور به گونه‌ای برای دماسنج مادون قرمز تنظیم می‌شود که مقدار دمای بدست آمده از آن با دمای بدست آمده از یک ترموکوپل برابر باشد. با این توصیف مقدار ضریب صدور برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شده است که البته برابر مقدار پیشنهادی توسط کریستو و همکارش [۱۱] است.

نسبت هم‌ارزی در احتراق سوخت عبارت است از نسبت سوخت به هوا بر پایه جرمی در حالت واقعی به نسبت سوخت به هوای استوکیومتری که به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

$$\phi = \frac{FAR}{FAR_s} \quad (1)$$

نرخ آتش عبارت است از حاصل ضرب ارزش حرارتی سوخت در دبی جرمی آن به واحد سطح مشعل که به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود:

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

۳- نتایج آزمایش

در این آزمایش‌ها با توجه به روابط (۱) و (۲) با تغییر دبی سوخت نرخ آتش تغییر نموده و با تغییر دبی هوا نسبت هم‌ارزی کنترل می‌شود. نمودارها در پنج نرخ آتش شامل 0.98 kW/m^2 ، 1.96 kW/m^2 ، 2.94 kW/m^2 ، 3.92 kW/m^2 و 4.90 kW/m^2 رسم می‌شوند. گفتنی است که محدوده دبی هوای ورودی بر اساس پایداری شعله داخل محیط متخلخل تعیین می‌شود، بنابراین در دبی‌های هوای کمتر و بیشتر از محدوده نشان داده شده، ناپایداری در شعله متخلخل بروز می‌نماید، بدین معنی که

۰/۱۲ متر مربع را دارد. همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، توری‌ها توسط پیچ و مهره روی محفظه بسته می‌شوند.

در این آزمایش‌ها توری با جنس فولاد ضد زنگ استفاده می‌شود که خواص مکانیکی خوبی دارد. از دو نوع توری با شبکه‌بندی ریز و درشت که به ترتیب دارای ۲/۵ حفره در سانتی‌متر و ۶ حفره در سانتی‌متر هستند استفاده می‌شود. ضخامت سیم‌های توری در نوع ریز ۰/۵ میلی‌متر و برای توری درشت ۰/۷ میلی‌متر است. نمونه‌ای از توری‌های مورد استفاده در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۱): نمایی از دستگاه آزمون مشعل متخلخل



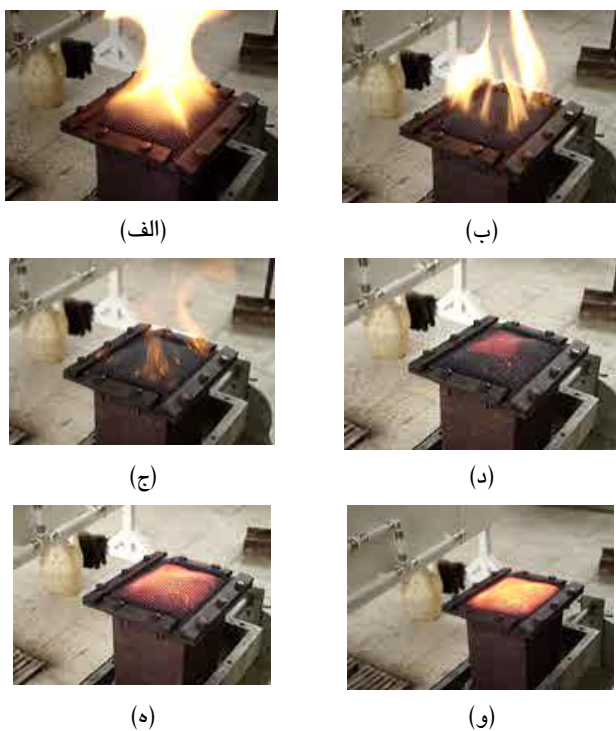
شکل (۲): محفظه احتراق مشعل آزمایشی



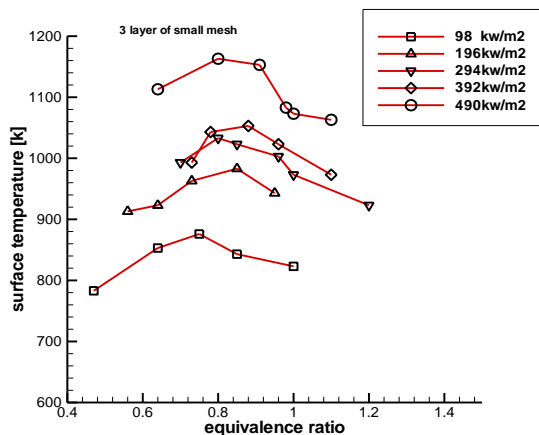
شکل (۳): نمونه‌ی توری بکار رفته در آزمایش

دمای سطح مشعل به کمک یک دماسنج تابشی مادون قرمز (آذرسنج) اندازه‌گیری می‌شود. استفاده از ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای سطح داغ بدلیل اثر عبور گازهای داغ احتراق خطای زیادی دارد و قابل اعتماد نیست. بنابراین برای

نرخ آتش (98 kW/m^2)، مقدار دمای سطح در نسبت هم‌ارزی $0/75$ بیش‌ترین مقدار را دارد. به تدریج با افزایش نرخ آتش به 490 kW/m^2 ، مقادیر دمای سطح در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف به بالاتر از 1000 K افزایش پیدا می‌کند. همان‌گونه که دیده می‌شود در نرخ آتش بیشینه مقدار دما در نسبت هم‌ارزی $0/8$ به 1163 K می‌رسد. در تمام نرخ آتش‌ها بیشینه دمای سطح در نسبت هم‌ارزی بین $0/75$ تا $0/85$ است.



شکل (۴): روند تشکیل شعله در مشعل متخلخل با سه لایه توری ریز



شکل (۵): دمای سطح مشعل با سه لایه توری

در شکل (۶) نمودار دمای سطح برای دو لایه توری با شبکه ریز در زیر سطح و یک لایه توری با شبکه درشت در روی سطح در نرخ‌های آتش مختلف برای نسبت‌های هم‌ارزی از $0/5$

یا شعله از سطح محیط متخلخل خارج می‌شود و یا به سمت پایین مشعل باز می‌گردد. آزمایش‌ها برای محیط‌هایی با سه لایه توری ریز، ترکیب دو لایه توری ریز در زیر و یک لایه توری درشت روی آن و سه لایه توری ریز به هم بافته شده انجام شده است. نتایج تجربی از نظر وابستگی به شرایط نیز آزمایش شده‌اند. برخی نمونه آزمون‌ها چندین بار تکرار شده و نتایج تغییر محسوسی نداشته‌اند.

در آزمایش مشعل متخلخل به دلیل بروز ناپایداری در تشکیل شعله، لازم است از راهکار خاصی برای انجام آزمایش و پایدارسازی شعله در محیط متخلخل استفاده شود. در شکل (۴) روند تشکیل شعله در محیط متخلخل متشکل از سه لایه توری ریز نشان داده شده است. بدین منظور ابتدا شیر گاز به اندازه‌ای باز می‌شود که دبی گاز و نرخ آتش موردنظر بدست آید پس از آن با ایجاد جرعه، احتراق روی سطح مشعل ایجاد می‌شود. در این حالت شعله آزاد نفوذی زرد رنگ روی مشعل دیده می‌شود (شکل ۴-الف). سپس شیر هوای ورودی باز می‌شود. به تدریج که دبی هوای ورودی افزایش می‌یابد، ارتفاع شعله کاهش یافته و شعله همراه با تغییر رنگ از زرد به آبی، روی سطح قرار می‌گیرد (شکل ۴-ب و ج). با افزایش بیشتر مقدار هوای ورودی، سطح مشعل به تدریج گداخته شده و شعله آزاد نیز ناپدید می‌شود. (شکل ۴-د). با افزایش مقدار هوای اضافی، گداختگی در همه سطح توری منتشر شده و سطحی یکنواخت از نظر اشتعال را ایجاد می‌نماید (شکل ۴-ه). پس از آن با افزایش بیشتر هوای ورودی، گداختگی سطح مشعل افزایش یافته و در نتیجه دمای سطح افزایش می‌یابد (شکل ۴-و). افزایش بیشتر هوای ورودی از حدی مشخص منجر به خاموشی شعله خواهد شد.

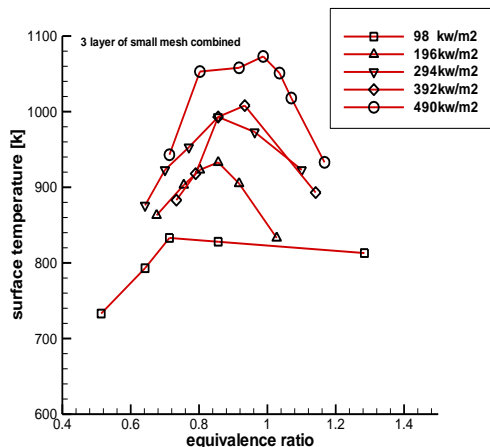
گفتنی است که در اصل شعله در محدوده‌ای که نتایج نمایش داده می‌شود پایدار است. بنابراین نتایج به نوعی بیانگر محدوده پایداری هستند.

نمودار دمای سطح برای محیطی با سه لایه توری ریز در شکل (۵) در نرخ‌های آتش مختلف برای نسبت‌های هم‌ارزی از $0/5$ تا $1/2$ ارائه شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش نرخ آتش دمای سطح افزایش می‌یابد.

افزایش نرخ آتش (افزایش دبی سوخت) در یک نسبت هم‌ارزی ثابت به معنی افزایش میزان انرژی ورودی به مشعل است و موجب افزایش انرژی آزاد شده در ناحیه متخلخل فلزی شده که منجر به افزایش دمای آن می‌شود.

به طور تقریب تغییرات دمای سطح در اثر تغییر نسبت هم‌ارزی نیز در نرخ آتش‌های مختلف مشابه است. در کم‌ترین

سیم‌هایی از همان جنس توری‌ها ساخته شد و آزمایش‌ها بر روی این نمونه انجام گرفت. نتایج بدست آمده در شکل (۷) برای نرخ‌های آتش و بر حسب نسبت هم‌ارزی‌های مختلف رسم شده است. در این حالت برخلاف حالت سه لایه توری که در بخش قبلی به آن اشاره شد به دلیل نبود فاصله بین لایه اول و دوم، شعله در سطح مشعل تشکیل می‌شود. بنابراین دماهای سطح اندازه‌گیری شده از حالت سه لایه توری ریز کمتر هستند.



شکل (۷): نمودار دمای سطح مشعل با سه لایه توری بافته شده

۳-۱- اثر نرخ آتش

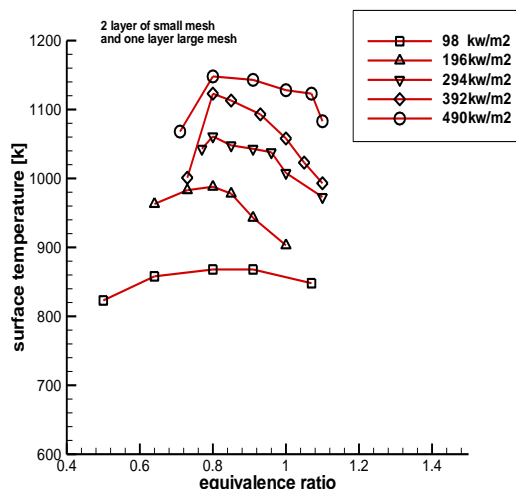
با مقایسه نمودار دمای سطح برای تمام حالت‌ها به روشنی دیده می‌شود که با افزایش نرخ آتش دمای سطح مشعل افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، دمای بیشینه سطح در اولین نرخ آتش 873K بوده که این مقدار در نرخ آتش 490 kW/m^2 به 1163K افزایش می‌یابد. این روند برای نمودارهای دیگر نیز تکرار می‌شود. این بدان معنی است که دمای سطح مشعل رابطه مستقیم با نرخ آتش دارد. برای نشان دادن اثر نرخ آتش بر روی دمای بیشینه سطح، مقادیر دمای سطح برای نمودارهای مختلف در جدول (۲) داده شده است.

افزایش دمای سطح بواسطه افزایش مقادیر نرخ آتش، به دلیل افزایش میزان سوخت ورودی به محل شعله و در نتیجه بالاتر رفتن ارزش حرارتی احتراق خواهد بود. بنابراین برای اکثر نمودارها روند افزایشی دمای سطح تکرار می‌شود.

با دقت در نمودارها دیده می‌شود که روند افزایش دمای بیشینه سطح، بواسطه افزایش نرخ آتش به طور تقریب در دو حالت توری ریز و ترکیبی یکسان است و میزان تخلخل اثر چندانی نداشته است ولی در حالتی که توری‌های ریز بهم بافته شده‌اند این روند افزایشی کمتر از دو محیط دیگر است. بنابراین در شرایطی که شعله امکان نفوذ بین لایه‌ها را دارد اثر افزایش نرخ آتش روی دمای بیشینه سطح نیز افزایش می‌یابد.

تا $1/1$ ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود در نرخ آتش 98 kW/m^2 ، بیش‌ترین دمای سطح در نسبت هم‌ارزی 0.91 برابر با 868K بدست آمده است. به همین صورت در نرخ آتش 196 kW/m^2 ، مقدار دمای سطح در مخلوط استوکیومتری برابر با 903K بوده که با افزایش میزان هوای اضافی این مقدار در نسبت هم‌ارزی 0.8 به 993K خواهد رسید. سپس به تدریج با افزایش هوا، دمای سطح در نسبت هم‌ارزی 0.76 به 963K کاهش خواهد یافت. در نرخ آتش 294 kW/m^2 مقادیر دمای سطح به بالاتر از 1000K در مقادیر مختلف نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد. پس دمای بیشینه در این حالت 1061K بوده و در نسبت هم‌ارزی 0.8 بدست آمده است. در نرخ آتش 392 kW/m^2 نیز این روند ادامه یافته تا در بالاترین نرخ آتش دمای سطح به 1123K می‌رسد. بالاترین نرخ آتش در این حالت نیز بیشترین دمای سطح را دارد. مقدار دمای بیشینه سطح در نسبت هم‌ارزی 0.8 برابر 1143K نشان داده شده است.

در حالت‌هایی که از توری با شبکه درشت به صورت تنها استفاده شده است به دلیل ناپایداری ایجاد شده در شعله متخلخل، جمع‌آوری نتایج امکان‌پذیر نیست. بنابراین محیط ترکیبی از شبکه‌بندی ریز و درشت آزمایش می‌شود.



شکل (۶): نمودار دمای سطح برای محیط ترکیبی

یکی از پیامدهای استفاده از لایه‌های توری برای ایجاد محیط متخلخل، انبساط لایه‌ها و جدا شدن آنها از یکدیگر است. این پدیده موجب انتقال شعله بین لایه‌ها شده و موجب افزایش راندمان مشعل می‌شود.

برای بررسی شرایطی که در آن لایه‌های توری امکان جدا شدن از یکدیگر را نداشته و شعله نتواند در بین لایه‌ها قرار گیرد؛ یک محیط متخلخل یکنواخت با بافت سه لایه توری توسط

۲-۳- اثر نسبت هم‌ارزی

چنانچه در اکثر نمودارها دیده می‌شود بیش‌ترین دمای سطح در حالت استوکیومتری روی نمی‌دهد. این نسبت هم‌ارزی کمتر از یک (بین ۰/۷ تا ۱) خواهد بود. در نمودارهای دیگر نیز مقدار نسبت هم‌ارزی تا کمتر از ۰/۸۵ برای نرخ آتش 98 kW/m^2 و 196 kW/m^2 کاهش می‌یابد. در جدول (۳) مقادیر نسبت هم‌ارزی که در آن بیشترین دمای سطح بدست می‌آید برای محیط‌های مختلف ارائه شده است. کمتر شدن نسبت هم‌ارزی از حالت استوکیومتری نشان دهنده راهکار انتقال حرارت هدایتی و تابشی ناشی از فاز جامد محیط متخلخل در منطقه احتراق است که موجب کاهش میزان مصرف سوخت خواهد شد.

از طرف دیگر نسبت‌های هم‌ارزی که بیش‌ترین دمای سطح در آنها بدست می‌آید در مقادیر مختلف نرخ آتش متفاوت هستند. هم‌چنین دیده می‌شود که نسبت‌های هم‌ارزی مربوط به دماهای بیشینه در نمونه ترکیبی بطور کلی کمتر از مقادیر مشابه در نمونه‌های دیگر هستند. دلیل این رویداد کامل‌تر بودن احتراق در نمونه و کاهش میزان سوخت مصرفی خواهد بود. نکته قابل توجه در جدول (۳) ثابت بودن نسبت هم‌ارزی برای حالت ترکیبی است. این امر نشان می‌دهد که در این محیط نرخ آتش اثری در نسبت هم‌ارزی مربوط به بیش‌ترین دمای سطح ندارد.

جدول (۲): مقادیر دمای بیشینه سطح مشعل بر حسب کلورین

محیط متخلخل	نرخ آتش kW/m^2				
	۹۸	۱۹۶	۲۹۴	۳۹۲	۴۹۰
۳ لایه ریز	۸۷۳	۹۸۳	۱۰۳۳	۱۰۵۳	۱۱۶۳
ترکیبی	۸۶۸	۹۸۸	۱۰۶۱	۱۱۲۳	۱۱۴۸
۳ لایه بافته	۸۳۷	۹۳۲	۹۹۵	۱۰۰۸	۱۰۷۸

در نتیجه جذب حرارت بالاتر، بیشتر است. در بالاترین نرخ آتش نیز اثر افزایش دما در اثر افزایش نرخ آتش بیشتر است و محیطی که قطر حفره کمتر و فلز بیشتر در واحد سطح دارد دمای بالاتری نیز دارد. برای سه نرخ آتش میانی در جدول (۳) مشاهده می‌شود که نسبت هم‌ارزی برای محیط متخلخل ترکیبی کمتر از محیط متخلخل سه لایه توری ریز است. بنابراین در این سه نرخ آتش میانی با استفاده از محیط متخلخل ترکیبی می‌توان در نسبت هم‌ارزی‌های پایین‌تر (درصد سوخت کمتر) به دمای بالاتری رسید که از نظر راندمان تابشی اهمیت دارد.

۳-۴- راندمان تابشی

مهم‌ترین ویژگی مشعل‌های تابشی، راندمان تابشی آنهاست. بنابراین در این بخش میزان راندمان تابشی برای سطوح مختلف بر اساس نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی محاسبه و نمودارهای مربوطه ارائه می‌شود. راندمان تابشی عبارت است از میزان انرژی تابشی صادر شده از سطح مشعل به کل انرژی حاصل از احتراق سوخت که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{rad} = \frac{Q_{rad}}{FR} \quad (3)$$

که در این رابطه، Q_{rad} ، نرخ تابش بر واحد سطح است که مقدار آن از رابطه استفان-بولتزمن بدست می‌آید:

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{surf}^4 - T_{surr}^4) \quad (4)$$

جدول (۳): مقادیر نسبت هم‌ارزی مربوط به دماهای سطح بیشینه

محیط متخلخل	نرخ آتش kW/m^2				
	۹۸	۱۹۶	۲۹۴	۳۹۲	۴۹۰
۳ لایه ریز	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۹۶	۰/۸۸	۰/۸
ترکیبی	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
۳ لایه بافته	۰/۷۱	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۹۳	۱

در رابطه (۴) ε ، ضریب صدور، σ ، ثابت استفان بولتزمن $(\sigma = 5/6697 \times 10^{-8} \text{ W/M}^2\text{K}^4)$ و T_{surf} و T_{surr} به ترتیب دمای سطح مشعل و دمای محیط هستند. مقادیر دمای سطح اندازه‌گیری شده توسط آذرسنج و دمای محیط برابر با ۳۰۰ کلورین در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین مقدار ضریب صدور سطح برابر با ۰/۸ که همان مقدار ورودی آذرسنج است در نظر گرفته می‌شود. پس مقادیر راندمان تابشی برای سطوح مختلف با استفاده از رابطه (۳) بدست آمده و نمودار آنها بر اساس نرخ

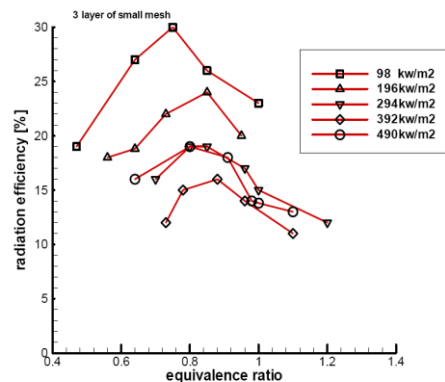
۳-۳- اثر تخلخل

همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود مقادیر دمای سطح برای محیط متخلخل ترکیبی در نرخ آتش‌های میانی حدود ۵٪ بیشتر از محیط متخلخل با سه لایه توری ریز است اما در دو نرخ آتش ابتدا و انتهای دمای سطح محیط متخلخل توری ریز بیشتر است. می‌توان گفت در پایین‌ترین نرخ آتش هنوز شعله بین لایه‌ها نفوذ نکرده بنابراین دمای محیط با قطر حفره کمتر

آتش و نسبت هم‌ارزی ترسیم می‌شود. در شکل (۸) راندمان تابشی مشعل سه لایه به ازای نرخ آتش‌های مختلف برحسب نسبت هم‌ارزی رسم شده است.

در این نمودار بیش‌ترین میزان راندمان تابشی در نرخ آتش 98 kW/m^2 و نسبت هم‌ارزی 0.75 به میزان 30% درصد بدست آمده است. این مقدار برای نرخ آتش‌های بالاتر افت قابل توجهی دارد، چنانکه در نرخ آتش 196 kW/m^2 به 24% درصد و برای 294 kW/m^2 به 19% درصد و در نرخ آتش 392 kW/m^2 به 16% درصد تقلیل پیدا کرده است. با توجه به رابطه (۳) افزایش نرخ آتش موجب کاهش راندمان تابشی می‌شود، از طرف دیگر افزایش نرخ آتش موجب افزایش دمای سطح و نرخ تابش می‌شود که اثر افزایش بر راندمان تابشی دارد، ولی میزان این افزایش کمتر از اثر افزایش نرخ آتش است و اثر خالص کاهش راندمان تابشی است. در نرخ آتش 490 kW/m^2 مقدار راندمان تابشی بیشینه، اندکی بیش از این مقدار در نرخ 392 kW/m^2 است. علت این مسئله افزایش قابل ملاحظه دمای سطح در این حالت نسبت به بقیه حالت‌ها است.

در صورتی که از توری با شبکه‌بندی ریز و درشت به صورت ترکیبی استفاده شود، در اکثر نرخ آتش‌ها راندمان تا 2% نسبت به حالت قبلی افزایش خواهد داشت (شکل ۹).



شکل (۸): راندمان تابشی مشعل با سه لایه توری ریز

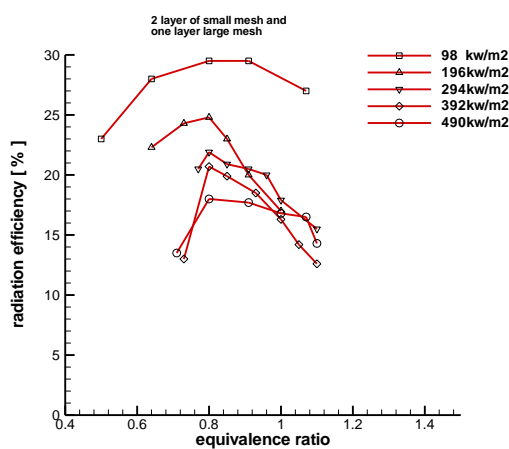
همانگونه که در شکل (۹) دیده می‌شود، برای مشعل با دو لایه توری ریز و یک لایه توری با شبکه درشت مقادیر راندمان تابشی به ویژه برای نرخ آتش‌های بالاتر نسبت به مشعل با لایه توری ریز اندکی افزایش خواهد داشت. هم‌چنین دیده می‌شود که با افزایش نرخ آتش، میزان راندمان تابشی مشعل کاهش می‌یابد و در نرخ آتش 98 kW/m^2 بیشترین میزان راندمان تابشی را خواهیم داشت.

در تحلیلی دیگر راندمان تابشی برای مشعل با سه لایه توری ریز در نرخ آتش‌های پایین در مقایسه با نرخ‌های بالاتر تا 15% کاهش می‌یابد. این مقدار اختلاف برای حالت ترکیبی به

9% تقلیل می‌یابد.

در پایان نکته‌ای قابل توجه آن است که در حالت سه لایه توری ریز نسبت هم‌ارزی که بیش‌ترین راندمان تابشی در آن روی می‌دهد به نرخ آتش وابسته است. چنانکه برای نمودار (۸) مقدار بیشینه راندمان برای نرخ آتش 98 kW/m^2 در نسبت هم‌ارزی 0.75 و برای نرخ آتش 490 kW/m^2 در نسبت هم‌ارزی 0.8 بدست آمده است. در حالت ترکیبی این نسبت هم‌ارزی تابع نرخ آتش نیست.

با دقت در نمودارهای (۸) و (۹) دیده می‌شود که بیش‌ترین مقدار راندمان برای یک نرخ آتش ثابت مربوط به نسبت هم‌ارزی است که دمای بیشینه سطح نیز بدست می‌آید.



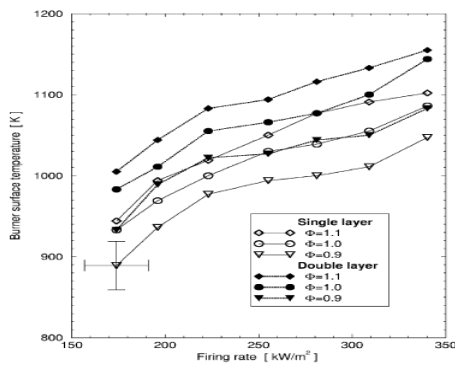
شکل (۹): نمودار راندمان تابشی مشعل با محیط ترکیبی

۸- مقایسه تحقیق حاضر با مطالعات دیگر

در این بخش با ارائه نتایج تحقیقات قبلی در زمینه مشعل‌های متخلخل فلزی، به مقایسه نتایج تحقیق حاضر با آنها پرداخته می‌شود. با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده در زمینه مشعل‌های متخلخل فلزی، دو مورد از آنها شامل تحقیق کریستو [۱۱] و تحقیق لئوناردی [۱۲] مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و نمودارهای دمای سطح و میزان راندمان تابشی مطالعه حاضر با آنها مقایسه می‌شوند.

در شکل (۱۰) نمودار دمای سطح مربوط به آزمایش کریستو نشان داده شده است. محیط متخلخل در مشعل آزمایشی کریستو از سه لایه توری فشرده شده به هم با ضخامت مؤثر 3 میلی‌متر ساخته شده است.

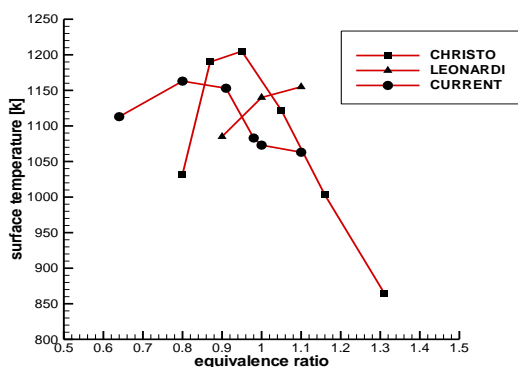
با مقایسه نمودار (۱۰) با نمودار شکل (۵) می‌توان دریافت که در هر دو تحقیق با افزایش میزان نرخ آتش، دمای سطح مشعل افزایش یافته است. در نمودار (۱۰) مقدار دمای سطح در



شکل (۱۱): نمودار دمای سطح آزمایش لئوناردی [۱۲]

در شکل (۱۱) نیز دیده می‌شود که با افزایش لایه‌ها دمای سطح افزایش یافته است. از طرف دیگر در نمودار لئوناردی برخلاف آزمایش کریستو و تحقیق حاضر مقدار بیشینه دمای سطح در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ روی می‌دهد، در حالیکه در این تحقیق این میزان برای برخی نرخ‌های آتش به ۰/۸ کاهش می‌یابد. این اختلاف می‌تواند ناشی از اختلاف ساختار محیط‌های متخلخل در تحقیق لئوناردی و مطالعه حاضر باشد. همانطور که گفته شد در تحقیق لئوناردی از الیاف بافته شده استفاده شده است.

در شکل (۱۲) مقایسه‌ای بین دمای سطح بدست آمده در این تحقیق با نتایج دیگر برای حالت سه لایه در بالاترین نرخ آتش ارائه شده است. حداکثر دمای بدست آمده در هر سه مطالعه نزدیک به هم است. همچنین تغییرات دما در این مطالعه با تغییرات دمای گزارش شده توسط کریستو نزدیک هستند با این تفاوت که تغییرات در تحقیق کریستو مقداری شدیدتر است که با توجه به تفاوت ویژگی محیط‌ها، طبیعی است.



شکل

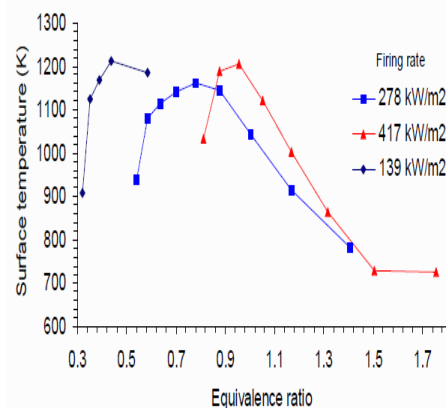
(۱۲): مقایسه دمای سطح بدست آمده از این تحقیق با نتایج مراجع

[۱۱] و [۱۲]

در شکل (۱۳) راندمان تابشی مشعل متخلخل فلزی کریستو و همکاران ارائه شده است. با مقایسه این نمودار با شکل (۸)

نرخ آتش 417 kW/m^2 به بالاترین مقدار خود به میزان 1205 K می‌رسد. از طرف دیگر برای نرخ آتش 278 kW/m^2 دمای بیشینه سطح 1162 K بوده و در نرخ 139 kW/m^2 به 1112 K تقلیل می‌یابد. همچنین حداکثر دمای سطح مانند تحقیق حاضر، در نسبت هم‌ارزی کمتر از یک رخ می‌دهد.

از طرف دیگر دیده می‌شود که دمای سطح بدست آمده در نمونه آزمایشی کریستو حدود 50 درجه کلوین در حالت بیشینه، بیشتر از دمای سطح در این تحقیق است. این موضوع در حالی است که نرخ آتش حداکثر در آزمایش کریستو 417 kW/m^2 است و در تحقیق حاضر نرخ آتش به 490 kW/m^2 می‌رسد.

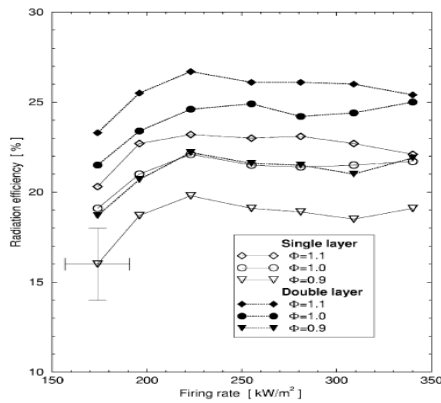


شکل (۱۰): نمودار دمای سطح آزمایش کریستو [۱۱]

البته باید گفت که در آزمایش کریستو از LPG (گاز مایع) به عنوان سوخت استفاده شده است در حالیکه در این تحقیق از گاز شهری استفاده می‌شود.

در شکل (۱۱) نمودار دمای سطح مربوط به مشعل آزمایشی لئوناردی ارائه شده است. این تحقیق روی مشعل یک لایه و دو لایه الیاف فلزی انجام شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود؛ مقادیر دمای بیشینه سطح در هر دو نمودار (لئوناردی و تحقیق حاضر) وابسته به نرخ آتش بوده و با افزایش نرخ آتش مقادیر دمای سطح افزایش می‌یابد. با مقایسه نمودارهای (۵) و (۷) مشخص می‌شود که هنگامی که شعله امکان قرارگیری بین لایه‌ها را داشته باشد دمای سطح بالاتری بدست می‌آید.

هم‌ارزی ۱/۱ بدست آمده است. این اختلاف در نمودار دمای سطح نیز مشهود است.



شکل (۱۴): نمودار راندمان تابشی آزمایش لئوناردی [۱۲]

۵- تحلیل خطا

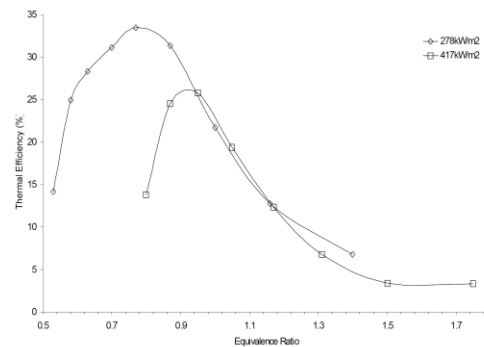
یکی از مباحث مهمی که در انجام مطالعات آزمایشگاهی مطرح می‌شود، برآورد میزان خطای موجود و یا عدم قطعیت در نتایج به دست آمده از آزمایش‌هاست. در این تحقیق از روشی که توسط هولمن [۱۷] برای برآورد میزان خطای موجود در نتایج تجربی ارائه شده است، استفاده می‌شود. در روش مورد-نظر میزان عدم قطعیت یک کمیت وابسته از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$W_R = \left(\sum \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \times w_i \right)^2 \right)^{0.5} \quad (5)$$

که در آن W_R عدم قطعیت کمیت وابسته مورد نظر و w_i عدم قطعیت کمیت مستقل X_i است. خطاهای موجود در ابزارهای اندازه‌گیری با توجه به مشخصات ارائه شده از سوی سازندگان عبارت است از: ۱- خطای روماتر گاز برابر ۰/۲ لیتر بر دقیقه ۲- خطای روماتر هوا برابر با ۰/۱۴ مترمکعب بر ساعت ۳- خطای اندازه‌گیری توسط آذرسنج برابر ۰/۱ کلوین و ۴- خطای مربوط به محاسبه ضریب صدور ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که آذرسنج دمای سطح را با استفاده از تابش صورت گرفته از سطح محاسبه می‌نماید، در نتیجه در محاسبه تابش صدور، خطای محاسبه ضریب صدور خود به خود حذف می‌شود. 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 دما، نرخ آتش، راندمان تابشی و نسبت هم‌ارزی می‌شود. با استفاده از روابط (۲) و (۵) عدم قطعیت نرخ آتش برابر $9/75 \text{ kW/m}^2$ است. عدم قطعیت راندمان تابشی در کار قبلی مرجع [۱۵] به

مربوط به راندمان تابشی مشعل سه لایه در تحقیق حاضر دیده می‌شود که با افزایش نرخ آتش در هر دو تحقیق میزان راندمان تابشی کاهش می‌یابد. چنانکه دیده می‌شود، در نمودار راندمان تابشی کریستو بیشترین مقدار راندمان تابشی در نرخ آتش 278 kW/m^2 ، ۲۳٪ بدست می‌آید که این مقدار برای نرخ آتش 417 kW/m^2 به ۲۵٪ تقلیل می‌یابد.

از طرف دیگر کاهش راندمان تابشی در مشعل این تحقیق در اثر افزایش نسبت هم‌ارزی به مراتب کمتر از مشعل کریستو است. در نمودار راندمان تابشی این تحقیق نیز این روند کاهش راندمان دیده می‌شود و بیشینه راندمان تابشی در کم‌ترین نرخ آتش به میزان ۳۰٪ بدست آمده است. همچنین در هر دو آزمایش میزان بیشینه راندمان تابشی در یک نرخ آتش ثابت، در نسبت هم‌ارزی کمتر از یک روی می‌دهد که بیشینه دمای سطح نیز در این مقدار حاصل می‌شود.



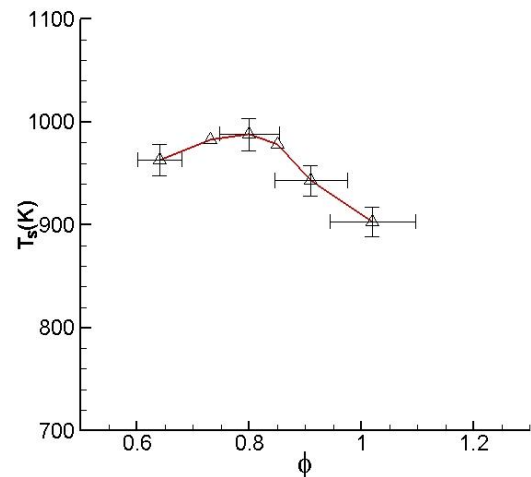
شکل (۱۳): راندمان تابشی مشعل متخلخل تابشی [۱۱]

در نمودار کریستو، بیشینه راندمان تابشی در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۷ بدست می‌آید که نزدیک به مقدار بدست آمده در این تحقیق است.

در آزمایش لئوناردی میزان راندمان تابشی مشعل برای هفت نرخ آتش از 170 kW/m^2 تا 340 kW/m^2 و در سه نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و ۱/۱ و ۱/۱ بدست آمده است. همانطور که در شکل (۱۴) دیده می‌شود در این نمودار برخلاف نتایج داده شده در دو آزمایش کریستو و تحقیق حاضر مقادیر راندمان تابشی در یک نرخ آتش بهینه بدست آمده است. با توجه به این نمودار مقدار بیشینه راندمان تابشی برای نرخ آتش 220 kW/m^2 بدست آمده است. البته به این نکته نیز باید توجه شود که مقادیر راندمان تابشی برای نرخ آتش‌های بیشتر از این مقدار به تدریج کاهش می‌یابد. این موضوع برای دو نمونه مشعل یک لایه و دو لایه به وضوح دیده می‌شود.

مقادیر بیشینه راندمان تابشی در تحقیق لئوناردی بر خلاف نتایج تحقیق کریستو و تحقیق حاضر، نه تنها در مخلوط رقیق سوخت و هوا روی نمی‌دهد، بلکه در مخلوطی غنی با نسبت

طور کامل بررسی شده است. با استفاده از روابط (۱) و (۵) عدم قطعیت مربوط به نسبت هم‌ارزی به شکل تابعی از دبی سوخت، هوا و نسبت هم‌ارزی بدست می‌آید. شکل (۸) میزان عدم قطعیت دمای T_s را بر حسب نسبت هم‌ارزی در kW/m^2 $FR=196$ برای محیط متخلخل ترکیبی نشان داده است. با توجه به شکل، با افزایش نسبت هم‌ارزی مقدار عدم قطعیت این عامل افزایش می‌یابد.



شکل (۱۰): عدم قطعیت دما و نسبت هم‌ارزی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی بر عملکرد مشعل متخلخل فلزی (سه محیط متخلخل تشکیل شده از توری‌های با شبکه ریز و درشت) به طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها به طور خلاصه عبارتند از:

- ۱- به طور کلی با افزایش نرخ آتش دمای سطح افزایش می‌یابد.
- ۲- حداکثر دمای سطح در نسبت هم‌ارزی کمتر از یک بدست می‌آید. بنابراین حداکثر تابش از مشعل در حداکثر نرخ آتش و در این محدوده نسبت هم‌ارزی بدست می‌آید.

۷- مراجع

- | | |
|--|--|
| Christo, F. C., "A Parametric Analysis of a Coupled Chemistry-Radiation Model in Porous Media", DSTO – Research Report RR-0188, 2000. [۳] | Trimis, D., Durst, F., Picknacker, O. and Picknacker, K., "Porous Medium Combustor Versus Combustion Systems with Free Flames", University Erlangen Nuremberg, Germany, 2002. [۱] |
| Howell J. R., communication via email, jhowell@mail.utexas.edu. [۴] | 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.: Lisbon, pp. 519-523, 1999. [۲] |
| Viskanta R, Gore JP, "Overview of cellular ceramics based porous radiant burners for supporting combustion", Environ Combust Technol;1: 167e203, 2000. [۵] | |

۳- بالاترین راندمان تابشی در مشعل با سه لایه توری با شبکه ریز در کمترین نرخ آتش حاصل می‌شود. راندمان اندازه‌گیری شده ۳۰٪ است و در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ روی می‌دهد. این حالت بهینه به لحاظ مصرف سوخت خواهد بود.

۴- مشعل مورد تحقیق حساسیت کمتری در مورد بازده تابشی در اثر تغییرات نسبت هم‌ارزی نسبت به مشعل‌های مشابه در تحقیقات دیگر دارد.

۵- در محیط متخلخل ترکیبی، شعله در نسبت هم‌ارزی کمتری نسبت به محیط متخلخل با شبکه ریز پایدار می‌شود. همچنین به طور متوسط دمای سطح نیز برای محیط متخلخل ترکیبی بیشتر است. بنابراین محیط متخلخل ترکیبی در نسبت هم‌ارزی کمتر به دمای بالاتری می‌رسد که از نظر راندمان تابشی اهمیت دارد.

۶- در صورتی که از توری با شبکه‌بندی ریز و درشت به صورت ترکیبی استفاده شود، در اکثر نرخ آتش‌ها راندمان تا ۲٪ نسبت به توری با شبکه ریز افزایش خواهد داشت.

۷- هنگامی که شعله امکان قرارگیری بین لایه‌های توری-های فلزی را داشته باشد دمای سطح بالاتری بدست می‌آید. پس در حالت سه لایه توری بافته شده به دلیل نبود فضا در بین لایه‌های توری، دمای سطح کمتری نسبت به سه لایه توری شبکه ریز بدون بافت دارد. این موضوع با افزایش تعداد لایه‌ها از یک لایه به دو لایه و در نتیجه افزایش دمای سطح در آزمایش دیگران نیز دیده می‌شود.

۸- در شرایطی که شعله امکان نفوذ بین دو لایه اول سطح را دارد اثر افزایش نرخ آتش روی افزایش دمای بیشینه سطح نیز بیشتر می‌شود.

۹- در حالت سه لایه توری ریز (تخلخل کمتر) نسبت هم‌ارزی که بیشترین راندمان تابشی در آن روی می‌دهد به نرخ آتش وابسته است. در حالت ترکیبی نرخ آتش اثری در نسبت هم‌ارزی مربوط به بیشترین دمای سطح ندارد.

- Leonardi, A. S., Viskanta, R. and Gore, P. J., "Radiation and thermal performance measurements of a metal fiber burner", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 73, pp. 491-501, 2002.
- Vogel BJ, Ellzey JL, "Subadiabatic and superadiabatic performance of a twosection porous burner", *Combust Sci Technol* 177: pp1323-38. 2005.
- Qiu K, Hayden ACS., "Thermophotovoltaic power generation systems using natural gas-fired radiant burners", *Sol Energy Mat Sol C*;91: pp588-96, 2007.
- هاشمی، سید عبدالمهدی، عطوف، حسین؛ بررسی تجربی اثر ضخامت و تخلخل بر عملکرد مشعل تابشی متخلخل فلزی، سوخت و احتراق، سال دوم، شماره اول، ۱۳۸۸.
- هاشمی، سید عبدالمهدی، امانی، جعفر، عطوف، حسین؛ بررسی تجربی پایداری شعله در محیط متخلخل کاربید سیلیسیم، مجله علمی پژوهشی امیرکبیر، سال ۴۳، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۰.
- هولمن، جی. آر؛ روش های اندازه گیری در مهندسی، ترجمه ملکی و دیبایی نیا، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، صفحات ۹۷-۷۹، ۱۳۶۹.
- [۶] Mao-Zhao Xie, Jun-Rui Shi, Yang-Bo Deng, Hong Liu, Lei Zhou, You-Ning Xu, "Experimental and numerical investigation on performance of a porous medium burner with reciprocating flow", *Fuel* 88, pp. 206-213, 2009.
- [۷] Ayman Bakry a, Ahmed Al-Salaymeh, Ala H. Al-Muhtaseb, Ahmad Abu-Jrai, D. Trimis, "Adiabatic premixed combustion in a gaseous fuel porous inert media under high pressure and temperature": Novel flame stabilization technique, *Fuel*, 2010.
- [۸] H. Davarzani, M.Marcoux, P.Costeseque, M.Quintard, "Experimental measurement of the effective diffusion and thermodiffusion coefficients for binary gas mixture in porous media", *Chemical Engineering Science* 65, pp.5092-5104, 2010.
- [۹] M. Abdul Mujeebu, M. Zulkifly Abdullah, A.A. Mohamad, M.Z. Abu Bakar, "Trends in modeling of porous media combustion", *Progress in Energy and Combustion Science* 36 , pp. 627-650, 2010.
- [۱۰] R.C. Catapan, A.A.M. Oliveira, M. Costa, "Non-uniform velocity profile mechanism for flame stabilization in a porous radiant burner", *Experimental Thermal and Fluid Science* 35, pp.172-179, 2011.
- [۱۱] Farid C. Christo, Lakshmanan V. Krishnamoorthy, "An Experimental and Numerical Study of Infrared (IR) Emission from a Porous Radiant Burner" Published by DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory 506 Australia, 2001.

۸- زیر نویس‌ها

¹turn down ratio