

## بررسی تجربی اثر ضخامت و تخلخل بر عملکرد مشعل تابشی متخلخل فلزی

سید عبدالمهدی هاشمی\* و حسین عطوف\*\*

دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

(دریافت: ۱۳۸۸/۳/۲۲، پذیرش: ۱۳۸۹/۲/۹)

در مقاله حاضر یک مشعل متخلخل تابشی از نوع فلزی مورد تحلیل تجربی قرار گرفته است. دو تخلخل متفاوت به طور تک تک و ترکیبی مورد آزمون قرار گرفته‌اند. دمای سطح و بازده تابشی مشعل به عنوان معیار ارزیابی عملکرد مشعل بررسی شده‌اند. آزمون‌ها نشان می‌دهند که با افزایش نرخ آتش دمای سطح مشعل افزایش می‌یابد. این افزایش دما در نرخ آتش‌های کم سریع و با افزایش نرخ آتش کند می‌شود. در محیط‌های با تخلخل یکنواخت (غیر ترکیبی) با افزایش ضخامت محیط، دمای سطح و بازده تابشی مشعل کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تخلخل دمای سطح و بازده تابشی کاهش می‌یابد. بازده تابشی در این موارد با افزایش نرخ آتش ابتدا افزایش یافته و سپس تقریباً ثابت باقی می‌ماند. در محیط ترکیبی (با دو نوع تخلخل) دمای سطح در یک ضخامت معین بیشترین مقدار را دارد و بازده تابشی با افزایش نرخ آتش ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: محیط متخلخل فلزی، احتراق، مشعل تابشی تخت، دمای سطح، بازده تابشی

### مقدمه

تکنولوژی مشعل متخلخل، بر پایه احتراق در داخل یک محیط متخلخل است. دامنه کارکرد وسیع همراه با توان گرمایی بالا، ابعاد کوچک و نشر کم گازهای آلاینده، این تکنولوژی را در صنایعی همچون نساجی، سرامیک، توربین‌های گاز و صنعت خودروسازی و همچنین کاربردهای خانگی گسترش داده است.

در عمده سیستم‌های احتراقی از ساختار شعله آزاد استفاده می‌شود که در آن‌ها ضخامت شعله (به ویژه در حالت پیش مخلوط) بسیار باریک است. دلیل این ضخامت نازک ضریب انتقال گرمای هدایتی پایین مخلوط گاز است. گرادیان دمای بالا در منطقه باریک احتراق، باعث انتقال گرما در خلاف جهت حرکت جریان و در نتیجه رساندن مخلوط احتراق به دمای شعله‌وری می‌شود. به منظور افزایش توان گرمایی و افزایش سرعت شعله در شعله آزاد از روش ایجاد اغتشاش در بالادست جریان گاز استفاده می‌شود. این امر باعث ضخیم‌تر شدن جبهه شعله و افزایش انتقال گرما می‌شود. اما در کنار این بهبود، افزایش اغتشاش باعث افزایش ناپایداری، تولید سروصدا و افزایش افت فشار می‌شود.

با توجه به خواص ضعیف انتقال گرمای تابشی و هدایت در مخلوط گاز، این ایده پیشنهاد شد که با استفاده از ویژگی‌های گرمایی مناسب مواد جامد می‌توان نرخ انتقال گرما را افزایش داد. محیط‌های جامد متخلخل که توان عبور سیال را دارند برای این منظور مناسب‌اند. در سال ۱۹۷۱ واینبرگ ایده گرفتن انرژی از شعله پیش‌مخلوط به منظور ایجاد تبادل گرمای درونی برای پیش‌گرمایش مخلوط هوا و سوخت را مطرح کرد [۱]. حدود شعله‌وری در این حالت از شعله‌های معمولی گسترده‌تر است. در حدود سال‌های ۱۹۷۹ تا ۱۹۸۱ تاکنو و ساتو نشان دادند که این ایده را می‌توان توسط هدایت گرمایی درون یک مشعل متخلخل برآورده کرد که این موجب آغاز تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه شد [۲]. در مواد متخلخل انتقال گرما توسط هدایت و تابش به میزان قابل ملاحظه‌ای بیش از گازهاست. به همین دلیل مخلوط ورودی در بالادست ناحیه احتراق توسط

\* استادیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: Hashemi@kashanu.ac.ir)

\*\* دانشجوی کارشناسی ارشد (ایمیل: atoof@grad.kashanu.ac.ir)

تابش صادر شده از ناحیه پایین دست احتراق و انتقال گرمای هدایتی داخل ماده متخلخل پیش گرم می شود. تابش صادر شده از ناحیه احتراق عمدتاً باعث گرم شدن قسمت جامد محیط متخلخل در بالادست جریان می شود و سپس قسمت جامد به واسطه انتقال گرمای جابجایی باعث گرم شدن مخلوط گاز می شود. بخش ناچیزی از این تابش (به دلیل ضریب جذب پایین گاز) مستقیماً سبب گرمایش مخلوط می شود. نشان داده شده است که سرعت شعله در محیط متخلخل می تواند تا ۱۸ برابر بیشتر از سرعت شعله آزاد جریان آرام باشد [۳].

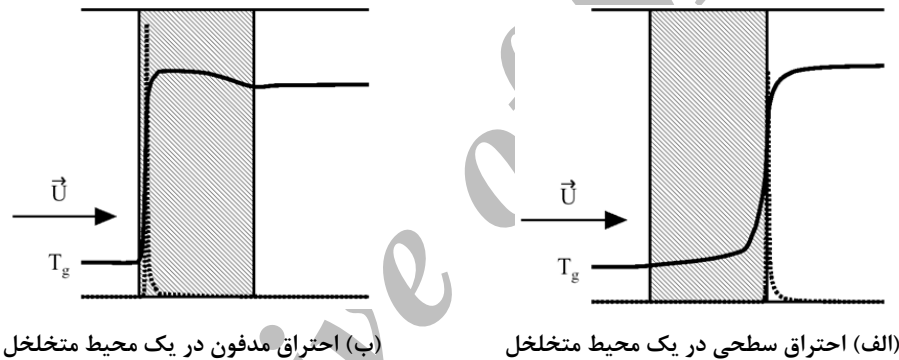
عمده مواد و ترکیبات تشکیل دهنده محیط متخلخل در این مشعل ها، سرامیک های پایدار شده و یا الیاف فلزی هستند. مواد پایه سرامیک ها عمدتاً شامل سلیکون کرباید (SiC)، آلومینا ( $Al_2O_3$ ) و زیرکونیا ( $ZrO_2$ ) است. جنس الیاف فلزی نیز از آلیاژهایی استفاده می شود که مقاومت زیادی در مقابل اکسایش در دماهای بالا داشته باشند [۴].

از نظر موقعیت ناحیه احتراق می توان طبقه بندی زیر را عنوان کرد:

- احتراق درون ماده متخلخل (Submerged Combustion)

- احتراق در نزدیکی سطح (Surface Combustion)

در شکل (۱) این دو نمونه احتراق نشان داده شده است. نوع اول برای مبدل های گرمایی و نوع دوم برای مشعل های تابشی مناسب هستند [۲].



شکل ۱- دو نمونه متداول احتراق در مشعل های متخلخل

آزمایش های انجام گرفته توسط بابکین و همکارانش در سال ۱۹۹۱ نشان می داد که برای ایجاد احتراق در ماده متخلخل عدد پکلت ( $Pe$ ) باید بزرگ تر از ۶۵ باشد. عدد پکلت از رابطه ی (۱) به دست می آید:

$$\left( Pe = \frac{S_l d_m C_p \rho}{\lambda} \right), \quad Pe \geq 65 \quad (1)$$

که در آن  $S_l$  سرعت شعله آرام،  $d_m$  قطر معادل حفره های ماده متخلخل،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $\rho$  دانسیته و  $\lambda$  ضریب هدایت گرمایی مخلوط گاز است. چنانچه عدد پکلت کوچکتر از ۶۵ باشد شعله خاموش می شود [۵]. در بیشتر مشعل های متخلخل سرامیکی با پیش مخلوط سوخت و هوا، جهت پیش گرمایش مخلوط از محیط متخلخلی با قطر حفره های کوچک استفاده می شود، به گونه ای که عدد پکلت در آن کمتر از حالت بحرانی ( $Pe < 65$ ) باشد. این منطقه علاوه بر پیش گرمایش مخلوط، باعث جلوگیری از برگشت شعله نیز می شود. پس از این ناحیه، ناحیه متخلخل دیگری با قطر حفره های بزرگ تر قرار دارد که اجازه ایجاد فرایند احتراق را می دهد. زمانی که از محیط متخلخل برای ایجاد تابش استفاده می شود، معمولاً ضخامت ناحیه کم بوده و از چینش دوناحیه مجزا برای پیش گرم کردن و احتراق استفاده نمی شود [۶ و ۷].

کریستو و همکاران در سال ۲۰۰۱ به مطالعه تجربی و عددی احتراق در مشعل های تابشی از نوع متخلخل فلزی پرداختند [۶]. محیط متخلخل فلزی از قرار دادن تعدادی توری سیمی به مجموع ضخامت ۳ میلی متر تشکیل می شد. سوخت مورد استفاده در این آزمون ها گاز مایع (LPG) بود که با درصد مورد نظر با هوا مخلوط شده و آزمایش شده بود. این

تحقیق نشان می‌دهد که دمای سطح (به عنوان متغیر مهم کنترل‌کننده نرخ تابش) تابع نسبت هم‌ارزی (Equivalence ratio) و نرخ آتش<sup>۱</sup> (Firing rate) است. در این تحقیق نرخ آتش بین  $130 \text{ kW/m}^2$  تا  $400 \text{ kW/m}^2$  مورد آزمون قرار دارد. این تحقیق نشان می‌دهد که بیشترین دمای سطح در نسبت تعادل‌های کمتر از یک (مخلوط رقیق) به دست می‌آید. همچنین در مخلوط‌های غنی شعله روی سطح متخلخل تشکیل می‌شود، در حالی که در مخلوط‌های رقیق یا نزدیک به استوکیومتری شعله در داخل محیط یا نزدیک سطح تشکیل خواهد شد.

عملکرد مشعل متخلخل ساخته شده از الیاف فلزی توسط لئوناردی و همکارانش به صورت تجربی بررسی شد [۷]. در این تحقیق آن‌ها یک محیط یک‌لایه‌ای (به ضخامت ۲mm) و یک محیط دولایه‌ای (به ضخامت ۴mm) را در نرخ آتش بین  $170 \text{ kW/m}^2$  تا  $350 \text{ kW/m}^2$  مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نرخ آتش دمای سطح افزایش می‌یابد و دمای سطح برای سطح دولایه بیش از سطح تک‌لایه است. همچنین بازده تابشی مشعل دولایه حدود ۵ درصد بیشتر از مشعل تک‌لایه‌ای است.

میتال و همکاران مطالعه‌ای تجربی بر روی احتراق مدفون داخل محیط متخلخل انجام دادند [۸]. آن‌ها پایداری شعله را در حالت مدفون داخل محیط‌های سرامیکی از جنس سیلیکون کرباید (SiC) و کوردريت  $(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$  از طریق تابش خروجی و دمای حاصل بررسی کردند. آن‌ها در آزمایش‌های خود مشاهده کردند بین نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۶ تا ۰/۷ پرش شعله اتفاق می‌افتد و از یک نرخ آتش به بعد شعله به بالادست نفوذ می‌کند و افزایش بیشتر آن باعث برگشت شعله می‌شود. آن‌ها بازده تابشی را به دست آوردند و بیان نمودند که این متغیر به نرخ آتش، نسبت هم‌ارزی و لایه نگه‌دارنده شعله بستگی دارد.

برنر و همکاران یک بررسی عددی و آزمایشگاهی روی شعله پایدار داخل محیط متخلخل انجام دادند [۹]. در مدل عددی آن‌ها، انتقال گرما و الگوی جریانی نسبتاً همگن برای محیط متخلخل ایجاد شده است. دستگاه آزمایشگاهی آن‌ها شامل یک مشعل  $10 \text{ kW}$  با مقطع مستطیلی است که مبدل گرمایی در دیواره آن به کار رفته است و توسط آن شعله را در محلی خاص پایدار می‌کنند. محیط متخلخل دولایه‌ای بوده و جنس محیط متخلخل پایین دست از ساختار لایه‌ای  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و SiC است. آن‌ها شکل مقطع (Profile) دما و میزان آلاینده‌ها را در مبدل به دست آوردند و با نتایج به دست آمده از کد مقایسه کردند و متوجه شدند تطابق خوبی بین مدل و کد وجود دارد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با کاهش نسبت هم‌ارزی رقیق، هم دمای گاز و هم دمای جامد کاهش می‌یابد و شعله بین دو لایه و در فصل مشترک آن پایدار می‌شود.

بارا و همکاران مطالعه‌ای عددی بر روی تأثیر ویژگی‌های مواد متخلخل بر روی پایداری شعله انجام دادند [۱۰]. این مدل یک‌بعدی وابسته به زمان (ناپایا) اثرات هدایت جامد، تابش جامد به جامد، همرفت میان جامد و گاز و اثرات پخش را شامل می‌شد. این مطالعه در زمینه پایداری شعله در یک مشعل دو قسمتی است. در این مطالعه مشخص شد که پایداری شعله شدیداً به جنس محیط متخلخل بستگی دارد به طوری که برای داشتن حدود شعله‌وری زیاد باید ماده متخلخل بالادست هدایت گرمایی و ضریب انتقال گرمای حجمی پایین و ضریب خاموشی تابشی بالا داشته باشد. برعکس ماده متخلخل پایین دست باید هدایت گرمایی و ضریب انتقال گرمای حجمی بالا و ضریب خاموشی تابشی متوسط داشته باشد.

وگل و الزی پایداری شعله را در حالت زیر بی‌دررو (Sub adiabatic) و فوق بی‌دررو (Super adiabatic)، 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 کردند [۱۱]. آن‌ها در نسبت هم‌ارزی ۰/۷ هر دو نوع احتراق را مشاهده کردند. در هر دو نوع، شعله در نزدیکی و یا بر روی فصل مشترک دو محیط تشکیل شده است. در نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر از ۰/۷ تنها عملکرد زیر بی‌دررو مشاهده می‌شود. همچنین حالت فوق بی‌دررو را تنها در نسبت هم‌ارزی کمتر از ۰/۶۵ مشاهده نمودند.

کیو و هایدن ساختار شعله و سازوکار پایداری احتراق را در محیط متخلخل سرامیکی فیبری در یک مشعل با کاربرد خاص بررسی کردند [۱۲]. این محیط از جنس  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  (۹۳/۵ درصد وزنی)،  $\text{CeO}_2$  (۳ درصد وزنی) و دیگر ترکیبات (۳/۵

<sup>۱</sup> نرخ آتش در بخش ۳ تعریف می‌شود.

درصد) بوده و دارای ضریب هدایتی پایین و تخلخل بالاست. در این پژوهش کارکرد احتراقی مشعل و بازگردش گرمایی با شرایط کارکردی مختلف بررسی شد. در این مشعل شعله در نزدیکی پایین دست پایدار شده و دارای تابش گرمایی بالایی است. همچنین این کار تجربی نشان می دهد که با افزایش هوای ورودی بازده تابشی افزایش می یابد.

در مقاله حاضر اثر میزان تخلخل و ضخامت محیط بر دمای سطح یک محیط متخلخل فلزی مطالعه شده است. بدین منظور دو محیط با تخلخل متفاوت به طور ساده و ترکیبی مورد آزمون قرار می گیرند. این آزمایش ها با سوخت گاز طبیعی انجام می شوند و نرخ آتش در محدوده  $800 \text{ kW/m}^2$  تا  $1000 \text{ kW/m}^2$  قرار می گیرد. ضخامت محیط متخلخل فلزی نسبت به مطالعات قبلی بیشتر بوده و در محدوده ۱۰ تا ۵۰ میلی متر قرار می گیرد. ضخامت بیشتر محیط موجب پایداری بیشتر شعله در محدوده نرخ آتش بزرگتری خواهد شد، اما ممکن است موجب شود که احتراق در فاصله بیشتری از سطح تشکیل شود. این امر موجب کاهش دمای سطح و میزان تابش صادره از سطح خواهد شد. با توجه به تابشی بودن مشعل، دمای سطح مشعل متغیر اصلی در مطالعات خواهد بود.

### شرح دستگاه آزمایش

دستگاه ساخته شده برای این منظور از قسمت های مختلفی تشکیل شده است. برای اختلاط بهتر گاز و هوا یک پیش مخلوط در نظر گرفته شده است که قابلیت تنظیم دبی های گاز و هوا را دارد. شکل (۲) دستگاه ساخته شده را به همراه پیش مخلوط کن نمایش می دهد.



شکل ۲- تصویر دستگاه آزمایش

برای اندازه گیری دبی هوا و گاز با توجه به دامنه دبی های مورد استفاده از دو عدد رواتر متناسب با دبی ها استفاده شده است که در شکل (۳) نمایش داده شده است. رواترهای استفاده شده دقیقاً برای هوا و گاز طبیعی در شرایط آزمون طراحی شده اند و نیازی به تصحیح مقادیر با استفاده از روابط رواتر نخواهد بود، لذا خطای اندازه گیری حداقل مقدار است. خطای اندازه گیری طبق اعلام شرکت سازنده  $\pm 0.02$  حداکثر دبی عبوری است.



شکل ۳- تصویر رواترهای اندازه گیر دبی سوخت و هوا

هوای مورد نیاز توسط کمپرسور تأمین می‌شود و گاز مصرفی نیز گاز طبیعی است. دمای سطح مشعل به کمک یک دماسنج مادون قرمز اندازه‌گیری می‌شود. استفاده از ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای سطح داغ به دلیل اثر عبور گازهای داغ احتراق خطای زیادی را در بر دارد و قابل اعتماد نیست. لذا برای اندازه‌گیری دمای سطح استفاده از روش‌های تابشی توصیه می‌شود [۷]. در این سری آزمایش‌ها از یک نمونه دماسنج مادون قرمز که بر مبنای اندازه‌گیری میزان تابش خروجی از سطح دما را اندازه‌گیری می‌کند، استفاده شده است. اندازه‌گیری دمای سطح با استفاده از دماسنج مادون قرمز مستلزم داشتن مقدار ضریب صدور سطح مورد نظر است. اساساً محیط‌های متخلخل به دلیل داشتن حفره‌های متعدد در سطح، رفتاری نزدیک به یک جسم سیاه داشته و مقدار ضریب صدور آن به عدد یک نزدیک است [۱۳]. البته باید توجه داشت که با توجه به اینکه هدف نهایی بررسی تابش سطح است و دماسنج مادون قرمز دما را به کمک نرخ تابش سطح محاسبه می‌کند، نهایتاً برای هر مقدار ضریب صدور داده شده به دستگاه میزان تابش نهایی سطح یکسان خواهد بود. به منظور تعیین تجربی ضریب صدور با توجه به وابستگی کم آن به دما [۱۴]، می‌توان آزمون ساده‌ای در دمای محیط، بدون اثر خطای گازهای داغ انجام داد. در این آزمون میزان ضریب صدور به گونه‌ای برای دماسنج مادون قرمز تنظیم می‌شود که مقدار دمای به دست آمده از آن با دمای به دست آمده از یک ترموکوپل برابر باشد. با این توصیف مقدار ضریب صدور برابر  $0/8$  در نظر گرفته شده است که البته برابر مقدار پیشنهادی توسط کریستو و همکارش [۶] است. در هر آزمایش برای یک دبی سوخت مشخص میزان دبی هوا به گونه‌ای تنظیم شده است که بیشترین دمای سطح به دست آید. دمای به دست آمده برای سطوح مختلفی مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفته است. نمونه‌ای از سطح تابشی به دست آمده در یک آزمایش در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل ۴- تصویر سطح تابشی در یک نمونه آزمون

## نتایج آزمایش

متغیرهایی که در این مجموعه آزمون‌ها تغییر می‌کنند دبی گاز طبیعی و هوای ورودی و ضخامت و تخلخل بستر متخلخل فلزی هستند که برای به دست آوردن شرایط مناسب ارزیابی می‌شوند. به منظور بررسی اثر تخلخل محیط و ضخامت آن، دو محیط با اندازه حفره‌های متفاوت به طور تک و به طور ترکیبی مطالعه می‌شوند. در این مقاله میزان تخلخل در محیط با ppc (حفره در سانتیمتر) مشخص می‌شود. میزان تخلخل در محیط با حفره‌های بزرگ‌تر برابر ۳ ppc و در محیط با حفره‌های کوچک‌تر برابر ۶ ppc است. ذکر این نکته لازم است که میزان تخلخل و ابعاد حفره‌ها در تشکیل شعله تأثیر بسزایی دارند. در محیط با تخلخل بیشتر از ۶ ppc با توجه به معیار بابکین (رابطه (۱)) شعله تشکیل نمی‌شود. در تخلخل‌های کمتر از ۳ ppc نیز پایدارسازی احتراق به سختی صورت می‌گیرد. در ادامه مقاله به منظور خلاصه‌نویسی به جای محیط با تخلخل ۳ ppc، از محیط (الف) و به جای محیط با تخلخل ۶ ppc، از محیط (ب) استفاده می‌شود. بررسی بر روی محیط (الف) برای دو ضخامت ۲۰ mm و ۳۰ mm و بر روی محیط (ب) برای دو ضخامت ۱۰ mm و ۱۹ mm انجام شده است. ساختار محیط ترکیبی بدین گونه است که از محیط (ب) به عنوان ناحیه پیش‌گرم و از محیط (الف) به عنوان ناحیه احتراق استفاده شده است. نسبت ضخامت دو محیط در حالات مختلف تقریباً یکی است ولی ضخامت آن‌ها تغییر کرده است. اعداد صورت و مخرج در نسبت ضخامت ارائه شده برای محیط‌های ترکیبی بیانگر ضخامت هر محیط بر حسب میلی‌متر است.

در ضخامت‌های زیاد به دلیل اینکه شعله داخل محیط متخلخل فلزی و پایین‌تر از سطح تشکیل می‌شود دمای سطح مشعل پایین بوده و تابش مناسبی صورت نمی‌گیرد. در ضخامت‌های کم نیز به دلیل نبود تبادل گرمای کافی در ناحیه پیش‌گرم، شعله داخل محیط پایدار نمی‌شود. لذا در مجموع، آنچه می‌توان گفت این است که تنها مقادیر خاصی از دبی‌ها و ضخامت‌های محیط متخلخل، سطح تابشی مورد نظر را ایجاد می‌کنند. نتایج مربوط به چنین آزمایش‌هایی در منابع مختلف به دو صورت بر حسب نرخ آتش [۷] (Firing Rate) یا بر حسب نسبت هم‌ارزی [۶] (Equivalence Ratio) 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 به گونه‌ای که سطح بیشترین تابش را داشته باشد تنظیم شده است، لذا نتایج بر حسب نرخ آتش بیان می‌شوند. نرخ آتش بیانگر میزان انرژی شیمیایی سوخت بر واحد سطح بوده و از رابطه (۲) به دست می‌آید.

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

در رابطه (۲)،  $LHV$  ارزش گرمایی پایین سوخت،  $\dot{m}_f$  دبی جرمی سوخت و  $A$  سطح مقطع مشعل است. سطح مقطع مشعل دستگاه مورد آزمایش  $50 \text{ cm}^2$  است. مقدار ارزش گرمایی پایین سوخت (در حالت معمولی) با استفاده از داده‌های استعلامی از شرکت گاز منطقه برابر  $8400 \text{ kcal/m}^3$  در نظر گرفته شده است. مقدار بازده تشعشی از رابطه (۳) به دست می‌آید. در این رابطه،  $\varepsilon$  ضریب صدور سطح،  $\sigma$  ضریب استفان بولتزمن و  $T$  دمای سطح مشعل است.

$$\eta_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma T^4}{FR} \times 100 \quad (3)$$

### دمای سطح مشعل

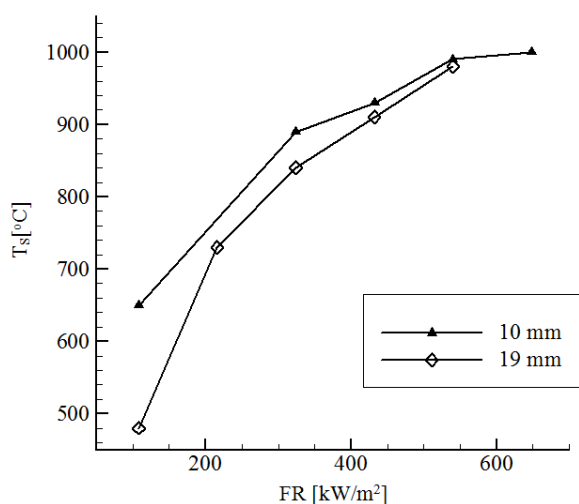
در شکل (۵) دمای سطح مشعل، مربوط به آزمایش محیط (الف) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش ضخامت محیط دمای سطح کاهش می‌یابد. این نتیجه به دو دلیل می‌تواند رخ دهد: ۱- افزایش اتلاف گرمای جانبی به دلیل افزایش ضخامت محیط و ۲- ایجاد شعله در لایه‌های زیرین که با افزایش ضخامت موجب دور شدن سطح بیرونی از ناحیه شعله می‌شود.

مطالعات مختلف نشان می‌دهند که در یک محیط متخلخل با ضخامت کم موقعیت شعله عمدتاً در دو ناحیه پایدار می‌شود: یا زیر سطح متخلخل و یا روی آن [۹ و ۱۱]. مشاهدات در این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که شعله در قسمت زیرین محیط متخلخل پایدار شده است. به همین جهت با افزایش ضخامت محیط متخلخل فاصله ناحیه شعله از سطح افزایش می‌یابد و موجب کاهش دمای سطح می‌شود. همچنین با توجه به این شکل، با افزایش نرخ آتش دمای سطح افزایش می‌یابد. این نتیجه مطابق انتظار و مشابه نتایج دیگر است. با افزایش نرخ آتش در واقع انرژی بیشتری در فرایند احتراق آزاد می‌شود و موجب افزایش دما نسبت به نرخ آتش‌های کمتر می‌شود.

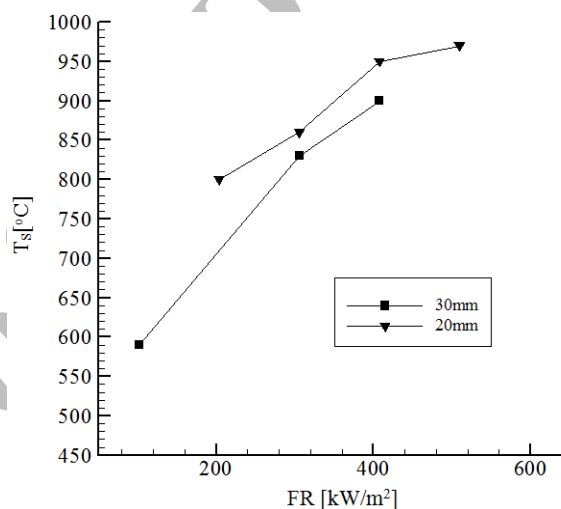
بیشترین دمای سطح به دست آمده در این حالت در محیط با ضخامت  $20 \text{ mm}$  حدود  $1000^\circ \text{C}$  است. همچنین روند افزایش دما در هر دو ضخامت، با افزایش نرخ آتش کاهش می‌یابد. با افزایش نرخ آتش دمای محیط متخلخل افزایش می‌یابد و موجب افزایش نرخ انتقال گرمای اتلافی می‌شود. به همین دلیل روند افزایش دمای سطح در نرخ آتش‌های بالاتر کندتر است. لازم به ذکر است که نرخ گرمای اتلافی به شکل نگهدارنده محیط و عایق‌بندی آن بستگی دارد. لذا نتایج از این جهت قدری وابسته به دستگاه آزمایش خواهد بود.

شکل (۶) دمای سطح مشعل، مربوط به آزمایش محیط (ب) را نمایش می‌دهد. در این حالت نیز دمای بیشتر مربوط به محیط با ضخامت کمتر است. در این شکل نیز همانند شکل (۵) روند افزایش دما با افزایش نرخ آتش کاهش می‌یابد. این روند در ضخامت بیشتر سرعت بیشتری دارد به طوری که در نرخ آتش حدود  $550 \text{ kW/m}^2$  دمای سطح مشعل در دو ضخامت تقریباً برابر شده است. مقایسه بین دمای سطح مشعل در ضخامت  $20$  میلی‌متر در محیط (الف) و ضخامت‌های  $10$  و  $19$  میلی‌متر در محیط (ب) در شکل (۷) نشان داده شده است. ضخامت دو محیط  $20$  و  $19$  میلی‌متر تقریباً برابر است، اما دمای سطح در

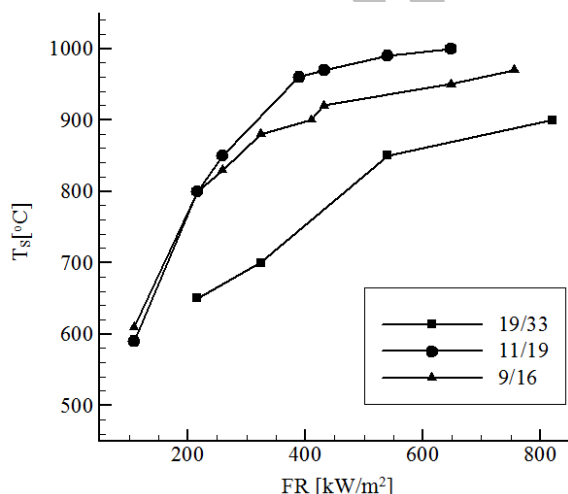
محیط (الف) بیش از دمای سطح در محیط (ب) است. با این وجود تأثیر ضخامت از تأثیر تخلخل در افزایش دما بیشتر است، زیرا حتی با نصف شدن میزان ضخامت و دو برابر شدن میزان تخلخل، دمای متوسط سطح در ضخامت ۱۰ میلی‌متر در بازه نرخ آتش بین  $200 \text{ kW/m}^2$  تا  $600 \text{ kW/m}^2$  بیش از دو ضخامت دیگر است. همان‌طور که اشاره شد افزایش دما در اثر کاهش ضخامت به این دلیل است که شعله در قسمت تحتانی است و کاهش ضخامت موجب نزدیکی سطح به شعله و در نتیجه افزایش دما می‌شود. با توجه به استقرار شعله در قسمت زیرین محیط متخلخل دما در نواحی زیرین و نزدیک به شعله بالاتر است. با کاهش تخلخل اندازه حفره‌ها و فضای خالی افزایش یافته و سهم تابش لایه‌های زیرین افزایش می‌یابد. با توجه به اندازه‌گیری دما با استفاده از تابش، با افزایش تابش صادره از سطح دمای اندازه‌گیری شده نیز بالاتر خواهد بود و موجب افزایش دمایی می‌شود که از محاسبه نرخ تابش به دست می‌آید. این دو متغیر اثری مشابه در تابش خروجی و دمای سطح اندازه‌گیری شده دارند که برای مقادیر در نظر گرفته شده در این آزمون اثر ضخامت از تخلخل قدری بیشتر است.



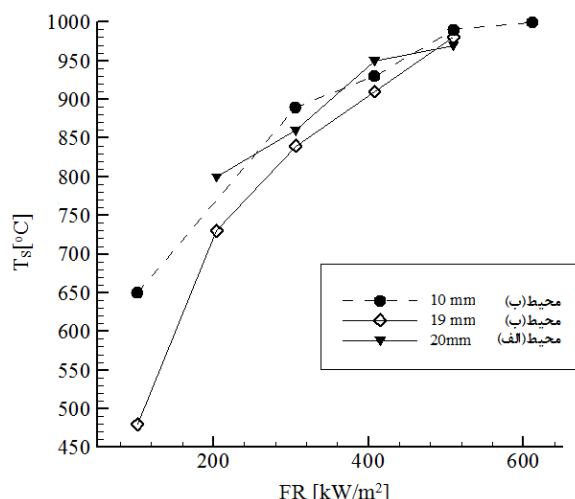
شکل ۶- دمای سطح بر حسب نرخ آتش برای محیط (ب)



شکل ۵- دمای سطح بر حسب نرخ آتش برای محیط (الف)



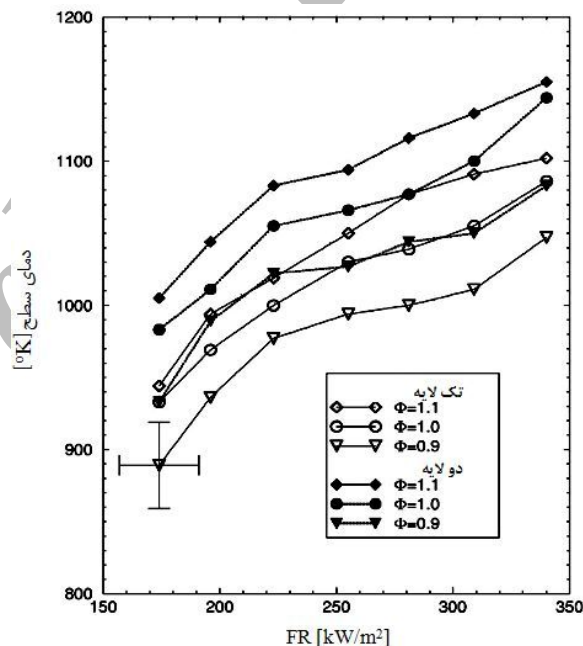
شکل ۸- دمای سطح بر حسب نرخ آتش برای محیط ترکیبی (برچسب مربوط به هر محیط در شکل، بیانگر نسبت ضخامت محیط (ب) به ضخامت محیط (الف) است).



شکل ۷- دمای سطح بر حسب نرخ آتش برای محیط (الف) در ضخامت ۲۰ میلی‌متر و برای محیط (ب) در ضخامت‌های ۱۹ و ۱۰ میلی‌متر

در شکل (۸) ترکیب‌های مختلف از دو محیط مورد آزمون قرار گرفته‌اند. با توجه به این شکل می‌توان دید که مشابه نتایج قبل با افزایش نرخ آتش دمای سطح افزایش می‌یابد و نرخ افزایش دما در نرخ آتش‌های بالا کاهش می‌یابد. تفاوتی که در این حالت نسبت به قبل دیده می‌شود این است که از نرخ آتش  $200 \text{ kW/m}^2$  به بعد افزایش ضخامت محیط از  $9/16$  به ضخامت  $11/19$ ، موجب افزایش دمای سطح مشعل شده است. با این وجود افزایش بیشتر ضخامت به  $19/33$  همانند حالات قبل موجب کاهش دما شده است. اما در هر صورت با افزایش نرخ آتش روند افزایشی دما کاهش می‌یابد.

در محیط‌های ترکیبی شعله عمدتاً در فصل مشترک دو محیط تشکیل می‌شود [۱۱ و ۹]. در این حالت محیط اول نقش ناحیه پیش‌گرم و محیط دوم نقش ناحیه احتراق را بازی می‌کند. افزایش ضخامت ناحیه پیش‌گرم می‌تواند موجب پیش‌گرمایش بیشتر مخلوط شده و باعث افزایش دما در ناحیه احتراق شود. به همین دلیل با افزایش ضخامت از  $9/16$  به  $11/19$  دمای سطح علی‌رغم افزایش ضخامت ناحیه احتراق و فاصله گرفتن شعله از سطح، افزایش نسبی داشته است. اما با افزایش بیشتر ضخامت محیط ترکیبی، فاصله گرفتن شعله از سطح اثر غالب را نسبت به بزرگ شدن ناحیه پیش‌گرمایش داشته و مشابه حالات قبل موجب کاهش دمای سطح شده است. در مطالعه لئوناردی و همکاران [۷] نیز که برای نرخ آتش‌های  $175$  تا  $350 \text{ kW/m}^2$  انجام شده است، روند افزایش دمای سطح نسبت به نرخ آتش دیده می‌شود (شکل (۹)). همان‌طور که در مرجع [۷] ذکر شده است عامل کمتر بودن دمای سطح در نرخ آتش‌های کمتر به دلیل اتلاف گرما از قسمت‌های جانبی نگهدارنده محیط متخلخل است. با افزایش نرخ آتش میزان تولید گرما توسط مشعل افزایش یافته و سهم بیشتری از انرژی احتراق صرف افزایش دمای محیط متخلخل می‌شود. بررسی دقیق‌تر انتقال گرمایی این موضوع نیاز به محاسبات نرخ انتقال گرما دارد که از بحث این مقاله خارج است. از سوی دیگر در تحقیق لئوناردی افزایش ضخامت موجب افزایش دمای سطح در یک نرخ آتش شده است. دلیل این تفاوت را باید در اختلاف زیاد ضخامت محیط‌ها در این تحقیق و تحقیق لئوناردی و همچنین نوع محیط مورد استفاده در آزمون‌ها دانست.



شکل ۹- دمای سطح بر حسب نرخ آتش در مرجع [۷] مربوط به حالت تک‌لایه (ضخامت ۲ mm) و دو‌لایه (ضخامت ۴ mm)

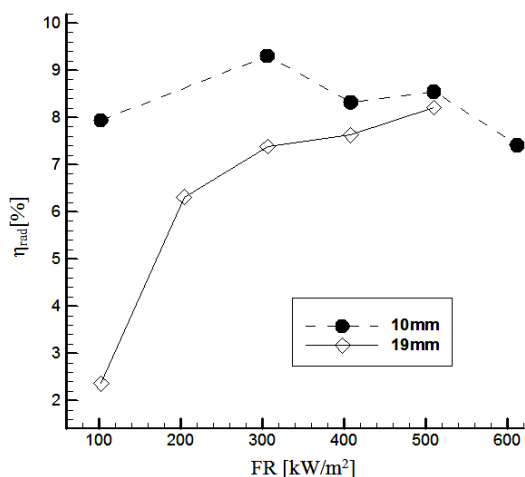
### بازده تابشی مشعل

مهم‌ترین متغیر در بررسی عملکرد مشعل‌های تابشی بازده تابشی است که بر اساس رابطه (۳) با استفاده از دمای سطح محاسبه می‌شود. مقدار بازده تابشی برای محیط‌های (الف)، (ب) و ترکیبی بر حسب نرخ آتش در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) نشان

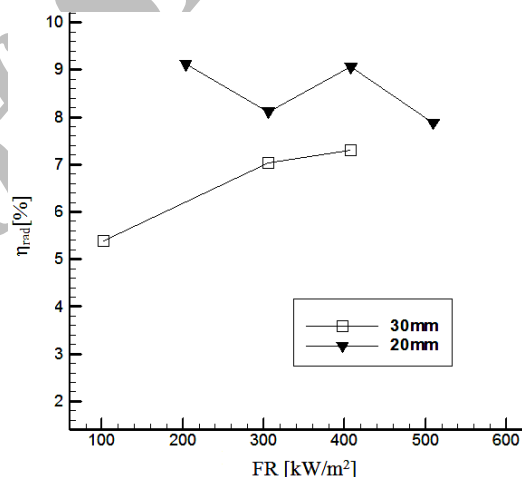


داده شده‌اند. در شکل (۱۰) بازده تابشی برای محیط (الف) در دو ضخامت ۲۰mm و ۳۰mm نمایش داده شده است. در ضخامت ۳۰mm بازده تابشی با افزایش نرخ آتش افزایش می‌یابد. در این ضخامت مقدار بیشینه بازده تابشی در نرخ آتش  $407 \text{ kW/m}^2$  اتفاق می‌افتد که برابر  $7/3$  درصد است. بازده تابشی در ضخامت ۲۰ میلی‌متر روند مشخصی ندارد اما به طور متوسط از بازده تابشی در ضخامت ۳۰mm بیشتر است. مقدار بیشینه بازده تابشی در ضخامت ۲۰ میلی‌متر در نرخ آتش  $407 \text{ kW/m}^2$  و  $204 \text{ kW/m}^2$  است که برابر  $9/1$  درصد است. بنابراین با کمتر شدن ضخامت بازده تابشی افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش دمای سطح در ضخامت کمتر است (شکل (۵)). طبق رابطه (۳) در یک نرخ آتش معین هر چه دمای سطح افزایش یابد، بازده تابشی نیز افزایش خواهد یافت.

در شکل (۱۱) بازده تابشی برای محیط (ب) در دو ضخامت مختلف نمایش داده شده است. مشابه قسمت قبل با کاهش ضخامت محیط بر بازده تابشی افزوده می‌شود. در ضخامت ۱۹ میلی‌متر با افزایش نرخ آتش بازده افزایش می‌یابد. در نرخ آتش‌های کم، افزایش بازده سریع و در نرخ آتش‌های زیاد، افزایش بازده کند می‌شود. با توجه به تغییرات دمای سطح نسبت به نرخ آتش در شکل (۶) و رابطه (۳) این رفتار بازده تابشی قابل پیش‌بینی است. ضخامت ۱۰ میلی‌متر در محیط (ب) رفتار مشخصی ندارد (همانند ضخامت ۲۰ میلی‌متر در شکل (۱۰)). مقدار بیشینه بازده در این حالت برابر  $9/3$  درصد است که در نرخ آتش  $305 \text{ kW/m}^2$  رخ می‌دهد.



شکل ۱۱- بازده تابشی بر حسب نرخ آتش برای محیط (ب)

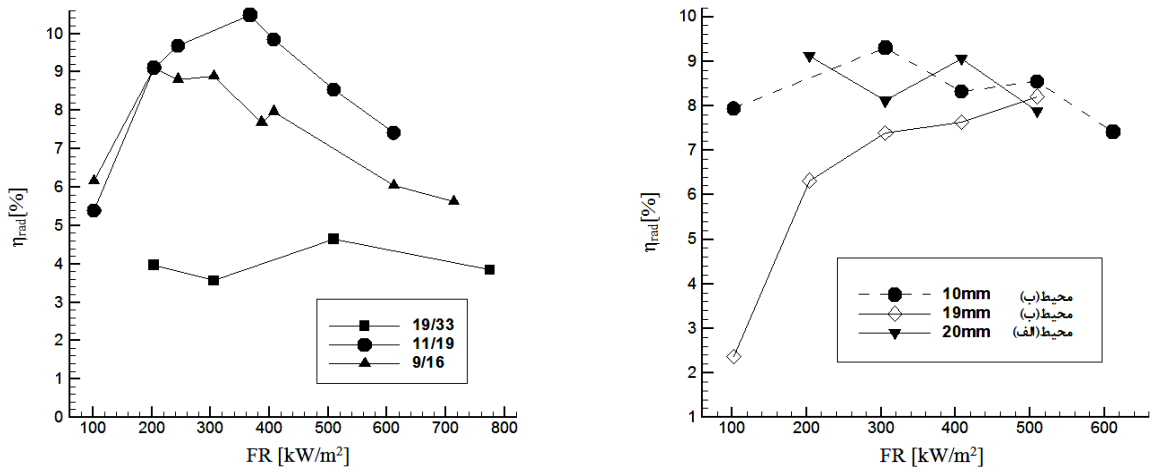


شکل ۱۰- بازده تابشی بر حسب نرخ آتش برای محیط (الف)

مقایسه بین بازده تابشی در ضخامت ۲۰ میلی‌متر در محیط (الف) و ضخامت‌های ۱۰ و ۱۹ میلی‌متر در محیط (ب) در شکل (۱۲) نشان داده شده است که نشان دهنده تاثیر همزمان تخلخل و ضخامت بر بازده تابشی است. ضخامت ۱۹ میلی‌متر و ۲۰ میلی‌متر تقریباً با هم برابرند ولی بازده تابشی در آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. دلیل این امر به رفتار دمای سطح در شکل (۷) بر می‌گردد. مطابق این شکل دمای سطح در محیط (الف) با ضخامت ۲۰ میلی‌متر بیش از دمای سطح در محیط (ب) با ضخامت ۱۹ میلی‌متر است. بنابراین براساس رابطه (۳) بازده این دو محیط با هم تفاوت خواهد داشت. آنچه از این شکل نتیجه گرفته می‌شود این است که با افزایش تخلخل در یک ضخامت ثابت بازده کاهش می‌یابد. مقایسه بین دو محیط ۱۰ میلی‌متر و ۲۰ میلی‌متر در این شکل نشان می‌دهد که متوسط بازده تابشی در بازه نرخ آتش بین  $200 \text{ kW/m}^2$  تا  $500 \text{ kW/m}^2$  در این دو محیط تقریباً با هم برابر است. با توجه به این مطلب می‌توان نتیجه گرفت کرد که نصف شدن ضخامت و نصف شدن تخلخل اثر تقریباً یکسانی بر بازده تابشی دارد.

بازده تابشی مربوط به محیط ترکیبی در ضخامت‌های مختلف در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همچنان که انتظار می‌رود رفتار بازده متناسب با رفتار نمودار دمای سطح است. بازده تابشی در ضخامت  $11/19$  که بین دو ضخامت دیگر قرار

دارد بیشتر از دو ضخامت دیگر است. حداکثر بازده در محیط با ضخامت ۹/۱۶ در نرخ آتش  $200 \text{ kW/m}^2$  و در محیط با ضخامت ۱۱/۱۹ در نرخ آتش حدود  $350 \text{ kW/m}^2$  به دست می‌آید.

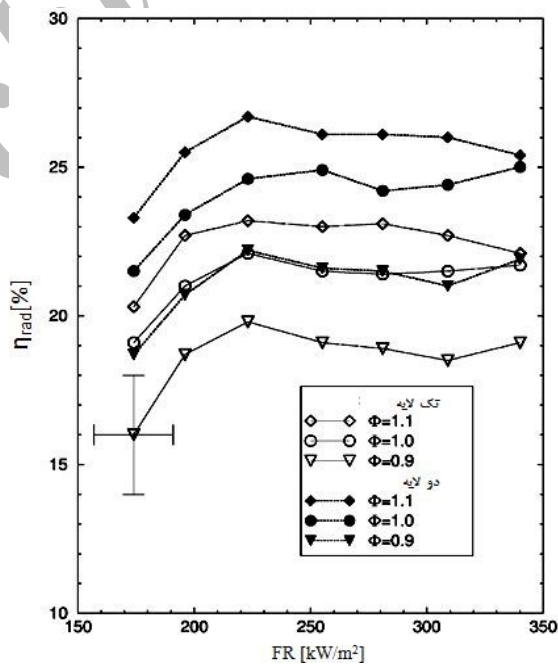


شکل ۱۳- بازده تابشی بر حسب نرخ آتش برای محیط ترکیبی

شکل ۱۲- بازده تابشی بر حسب نرخ آتش برای محیط (الف) در

ضخامت ۲۰ میلی‌متر و برای محیط (ب) در ضخامت‌های ۱۹ و ۱۰ میلی‌متر

شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) نشان می‌دهند بیشترین بازده تابشی در این مشعل حدود ۱۰ درصد است. همچنین در محیط‌های غیر ترکیبی با کاهش ضخامت مشعل، بازده تابشی افزایش یافته است. دلیل این امر افزایش دمای سطح بر اثر کاهش ضخامت محیط است که در قسمت قبل بحث شد. این نتیجه از لحاظ رفتار کلی با نتایج به دست آمده توسط لئوناردی و همکارانش [۷] که تا نرخ آتش حدود  $350 \text{ kW/m}^2$  ارائه شده است، مطابقت دارد. آن‌ها با آزمودن دو لایه ۲ و ۴ میلی‌متری مشاهده کردند که با افزایش میزان نرخ آتش تا حدود  $220 \text{ kW/m}^2$  بازده تابشی سطحی افزوده شده و سپس تقریباً ثابت باقی می‌ماند (شکل (۱۴)).



شکل ۱۴- بازده تابشی بر حسب نرخ آتش در مرجع [۷]

دلیل ثابت ماندن بازده گرمایی در نرخ آتش‌های بالاتر، کند شدن روند افزایش دمای سطح در اثر افزایش نرخ آتش است (رابطه (۳)). از سوی دیگر در مطالعه آن‌ها بازده محیط با ضخامت بیشتر اندکی بیش از محیط با ضخامت کمتر است که این تقریباً مخالف نتایج این تحقیق است. نکته قابل توجه در این مورد این است که ضخامت‌های مورد استفاده در تحقیق لئوناردی به مراتب کوچک‌تر از ضخامت‌های مورد مطالعه در این تحقیق هستند.

## 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. روشی که در این تحقیق از آن بهره گرفته شده است، روشی است که توسط هولمن [۱۵] برای برآورد نتایج تجربی ارائه شده است. در روش مورد نظر میزان عدم قطعیت یک کمیت وابسته از رابطه (۴) به دست می‌آید.

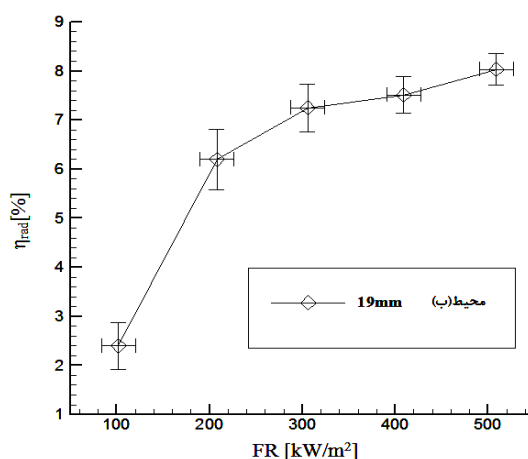
$$W_R = \left( \sum \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} \times w_i \right)^2 \right)^{0.5} \quad (4)$$

در رابطه‌ی فوق  $W_R$  عدم قطعیت کمیت وابسته مورد نظر و  $w_i$  عدم قطعیت کمیت مستقل  $X_i$  است.

به طور کلی خطاهایی که در یک فرایند آزمایشگاهی می‌تواند ظاهر شود، از سه چیز ناشی می‌شود که عبارت‌اند از: خطای موجود در وسایل اندازه‌گیری، خطای اندازه‌گیری که معمولاً ناشی از عدم دقت پژوهشگر است و خطای موجود در محاسبات. با توجه به ساده بودن معادلات به کار رفته و کم بودن حجم محاسبات میزان خطای ناشی از گرد کردن و عملیات محاسباتی بسیار اندک و قابل صرف نظر است. خطاهای موجود در ابزارهای اندازه‌گیری با توجه به مشخصات ارائه شده از سوی سازندگان عبارت است از: ۱- خطای اندازه‌گیری آذرسنج (Pyrometer) برابر ۰/۱ درجه کلوین، ۲- خطای روتامتر گاز برابر ۰/۲ لیتر بر دقیقه ۳- خطای روتامتر هوا برابر ۰/۱۴ مترمکعب بر ساعت. ذکر این نکته ضروری است که آذرسنج دمای سطح را با استفاده از تابش صورت گرفته از سطح محاسبه می‌کند، لذا چنانچه هدف محاسبه تابش سطح باشد 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. توجه به نتایج اصلی موجود در این تحقیق، متغیرهای متأثر از خطا شامل نسبت هم‌ارزی، نرخ آتش، دما و بازده تابشی می‌شود. با استفاده از روابط (۲) تا (۴) عدم قطعیت نرخ آتش برابر  $23/4 \text{ kW/m}^2$  و عدم قطعیت بازده تابشی از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$W_{\eta_{\text{rad}}} = \eta_{\text{rad}} \left( \left( \frac{4}{T} \times w_T \right)^2 + \left( \frac{1}{m_f} \times w_{m_f} \right)^2 \right)^{0.5} \quad (5)$$

عدم قطعیت بازده تابشی برای مقادیر مختلف دبی سوخت و دما و نیز بازده تابشی متفاوت است. شکل (۱۵) میزان تغییر عدم قطعیت این متغیر را بر حسب نرخ آتش برای یک نمونه محیط مورد آزمایش نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- عدم قطعیت بازده تابشی برای محیط (ب) با ضخامت ۱۹mm

## نتیجه گیری

در این مقاله اثر ضخامت و تخلخل بر روی یک مشعل متخلخل فلزی به طور تجربی مطالعه شد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها به طور خلاصه عبارتند از:

- ۱- افزایش نرخ آتش (دبی سوخت) موجب افزایش دمای سطح می‌شود. این افزایش دما در نرخ آتش‌های کم سریع و با افزایش نرخ آتش کند می‌شود.
- ۲- در محدوده ضخامتی محیط متخلخل که در این تحقیق مطالعه شد کاهش ضخامت محیط موجب افزایش دمای سطح می‌شود.
- ۳- دمای سطح به دست آمده از محیط با تخلخل کمتر بیش از دمای سطح به دست آمده از محیط با تخلخل بیشتر در همان شرایط است.
- ۴- در محیط‌های ترکیبی که از دو محیط با تخلخل متفاوت استفاده شده است در یک ضخامت مشخص دمای سطح بیشینه خواهد بود.
- ۵- در محیط‌های متخلخل ساده (غیر ترکیبی) بازده تابشی در نرخ آتش‌های کم افزایش یافته و با افزایش نرخ آتش تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند.
- ۶- در محدوده ضخامتی مورد مطالعه با افزایش ضخامت، بازده تابشی مشعل کاهش می‌یابد.
- ۷- بازده تابشی مشعل با تخلخل کمتر بیش از بازده محیط با تخلخل بیشتر است.
- ۸- در این مجموعه آزمایشی، نصف شدن ضخامت و نصف شدن تخلخل اثر تقریباً یکسانی بر بازده تابشی دارد.
- ۹- بازده تابشی در محیط ترکیبی رابطه مستقیم با ضخامت محیط ندارد و بیشترین بازده در یک ضخامت معین به دست می‌آید.
- ۱۰- نتایج به دست آمده به لحاظ رفتاری با نتایج دیگر مطابقت دارد.

## مراجع

1. Weinberg, F. J., "Combustion Temperatures: the Future," *Nature*, 233, pp. 239-241, 1971.
2. Takeno, T., and Sato, K., "A Theoretical and Experimental Study on an Excess Enthalpy Flame, Combustion in Reactive Systems," In *Proceedings of the Seventh International Colloquium on Gas Dynamics*, Honolulu (Ed. J. P. Boris), 76, pp. 596-610, 1981.
3. J. Howell, M. Hall, and L. Ellzey, "Combustion of Hydrocarbon Fuel within Porous Inert Media," *Prog. Energy Combustion Sci.*, 22, pp. 121-145, 1996
4. S. Mößbauer, O. Pickenacker, K. Pickenacker and D. Trimis, "Application of the Porous Burner Technology in Energy and Heat Engineering," *Fifth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment (Clean Air V)*, Lisbon (Portugal), Volume I, pp. 519-523, July 1999.
5. Babkin, S. V., Korzhavin, A. A., and Bunev, A. V., "Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media," *Combustion and Flame*, 87, pp. 182-190, 1991.
6. Farid, C. C. and Lakshmanan V. K., "An Experimental and Numerical Study of Infrared (IR) Emission from a Porous Radiant Burner," Published by DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Australia, 2001.
7. 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*, 73, pp. 491-501, 2002.
8. Mital, R., Gore, J. P., and Viskanta, R., "A Study of the Structure of Submerged Reaction Zone in Porous Ceramic Radiant Burners," *Combust. Flame*, 111, pp. 175-184, 1997.
9. G. Brenner, K. Pickenacker, O. Pickenacker, D. Trimis, K. Wawrzinek, and T. Weber, *Combust. Flame*, 123, 2000, 201-213.
10. Barra, A. J., and Ellzey, J. L., "Heat Recirculation and Heat Transfer in Porous Burners," *Combust. Flame*, 137, pp. 230-241, 2004.
11. B. J. Vogel, and J. L. Ellzey, "Subadiabatic and Superadiabatic Performance of a Two-Section Porous Burner," *Combust. Sci. and Tech.*, 177, pp. 1323-1338, 2005.
12. K. Qiu, A. C. S. Hayden, "Premixed Gas Combustion Stabilized in Fiber Felt and its Application to a Novel Radiant Burner" *Fuel*, 85, pp. 1094-1100, 2006.
13. Howell, J. R., Communication via email, jhowell@mail.utexas.edu.
14. Modest, M. F., *Radiative Heat Transfer*, Second Edition, McGraw-Hill, 2003
۱۵. هولمن، جی. آر؛ روش‌های اندازه‌گیری در مهندسی، ترجمه ملکی و دیبایی‌نیا، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، صفحات ۹۷-۷۹، ۱۳۶۹.

## English Abstract

# An Experimental Study of the Effect of Thickness and Porosity on the Performance of a Porous Metal Radiation Burner

S. A. Hashemi and H. Atoof

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan

*In this paper, a metal porous radiant burner is studied experimentally. Two porosities are tested both individually and in combination. Surface temperature and radiation efficiency of the burner are considered as assessment criteria. The experiments show that the surface temperature rises with an increasing firing rate. This increase in temperature is fast in low firing rates, and slow in high firing rates. In a uniform porous media (non-combined), with a rise in the thickness of the media, the surface temperature and radiation efficiency both decrease. However, with an increase in porosity, the surface temperature as well as radiation efficiency decreases. In such cases, radiation efficiency initially increases, and then remains almost constant. In a combined (two porosity) medium, the surface temperature is maximum for a specific thickness, and although radiation efficiency initially increases for a rising firing rate, it then decreases again.*

**Keywords:** Metal porous burner, Combustion, Flat radiant burner, Surface Temperature, Radiation efficiency