

تحلیل تجربی تأثیر نرخ آتش بر راندمان تابشی مشعل متخلخل سرامیکی

سید عبدالمهدی هاشمی^{۱*}، مجید نیکفر^۲، رضا اشرفی^۳

کاشان، کیلومتر ۵ بلوار قطب راوندی، دانشگاه کاشان، پژوهشکده انرژی

(Hashemi@kashanu.ac.ir*)

چکیده

در مقاله حاضر یک مشعل متخلخل تابشی از نوع سرامیکی (Sic) مورد تحلیل تجربی قرار گرفته است. در این مطالعه دمای سطوح مبنا و جانبی مشعل به همراه بازده تابشی آن در نسبت‌های هم‌ارزی و نرخ‌های آتش مختلف بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که دمای سطح مبنا بیشتر از دمای سطح جانبی مشعل متخلخل می‌باشد. در این مطالعه مشاهده شد که با افزایش نرخ آتش، دمای سطح مبنا و جانبی مشعل ابتدا روندی افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد. البته تعیین نقطه عملکرد بهینه مشعل‌های تابشی علاوه بر نرخ آتش به نسبت هم‌ارزی نیز وابسته است. بیشترین دمای سطح مشعل در نسبت هم‌ارزی ۰/۸۰ و در نرخ آتش $292/6 \text{ KW/m}^2$ رخ می‌دهد. در این حالت دمای سطوح مبنا و جانبی مشعل به ترتیب ۹۷۷ و ۹۴۴ کلوین می‌باشد. همچنین در اکثر موارد مشاهده شد که با افزایش نرخ آتش، بازده تابشی مشعل نیز ابتدا روندی افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که بیشترین بازده تابشی مشعل متخلخل در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ و نرخ آتش $182/9 \text{ KW/m}^2$ رخ می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مشعل متخلخل Sic - نرخ آتش - نسبت هم‌ارزی - دمای سطح مشعل - بازده تابشی

۱- مقدمه

احتراق یکی از قدیمی‌ترین فن‌آوری‌های مورد استفاده بشر است. افزایش تقاضا، کاهش ذخیره سوخت‌های فسیلی و ضرورت کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق، نیاز به بهبود بیشتر را در سیستم‌های احتراقی امری ضروری می‌کند. به دنبال چنین اهدافی، تکنولوژی احتراق در محیط متخلخل طرحی است که مزیت‌های زیادی را در سیستم احتراقی می‌تواند ایفا نماید. تکنولوژی مشعل متخلخل بر پایه احتراق در یک محیط متخلخل جامد می‌باشد. بازده تابشی بالا همراه با کاهش نشر گازهای آلاینده، سرعت شعله بالا، مدولاسیون بهتر (تنظیم نسبت هوا به سوخت در یک مشعل با توجه به تغییر بار حرارتی)، کاهش حجم، افزایش محدوده شعله‌وری، توزیع یکنواخت حرارت و کاهش سر و صدا از ویژگی‌های مشعل‌های متخلخل می‌باشند.

در اکثر سیستم‌های احتراقی که از ساختار شعله آزاد استفاده می‌شود، بخاطر ضریب انتقال گرمای هدایتی پایین مخلوط گاز، ضخامت شعله بسیار باریک است. باریک بودن ضخامت شعله موجب گرادیان شدید دما در منطقه احتراق می‌شود. به منظور افزایش توان حرارتی و افزایش سرعت شعله در شعله‌های آزاد، از روش ایجاد اغتشاش در بالادست جریان گاز استفاده می‌شود. این امر اگرچه موجب ضخیم‌تر شدن جبهه شعله و افزایش انتقال گرما می‌شود، اما افزایش ناپایداری، سر و صدا و افت

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۲- دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۴- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

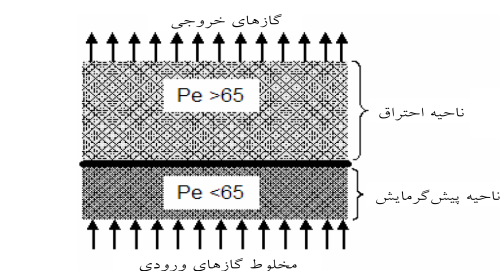
فشار را نیز به همراه خواهد داشت. برای رفع این مشکل، پیشنهاد شد که با استفاده از ویژگی‌های حرارتی مناسب مواد جامد که توان عبور سیال را از خود دارند، می‌توان نرخ انتقال حرارت را افزایش داد.

در سال ۱۹۷۱ وینبرگ ایده گرفتن انرژی از شعله پیش‌مخلوط را به منظور ایجاد تبادل گرمایی درونی برای پیش‌گرمایش مخلوط سوخت و هوا مطرح کرد [۱]. 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 گسترده در این زمینه شد [۲]. در مواد متخلخل انتقال گرما توسط هدایت و تابش بیش از گازها می‌باشد. لذا مخلوط نسوخته در بالادست ناحیه احتراق بواسطه تابش صادر شده از منطقه احتراق و انتقال گرمای هدایتی ماده متخلخل پیش‌گرم می‌شود.

آزمایش‌های انجام شده توسط بابکین و همکارانش نشان می‌داد که برای ایجاد احتراق در ماده متخلخل عدد پکلت باید بزرگتر از ۶۵ باشد. عدد پکلت از رابطه (۱) بدست می‌آید [۳]:

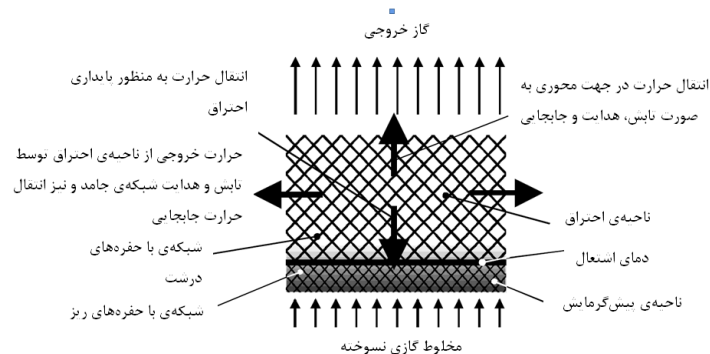
$$Pe = \frac{S_l d_m C_{p,f} \rho}{\lambda_f} \geq 65 \quad (1)$$

که در آن S_l سرعت شعله آرام، d_m مقیاسی از قطر حفره ماده متخلخل، $C_{p,f}$ و ρ_f به ترتیب حرارت مخصوص، چگالی و هدایت حرارتی از مخلوط گاز می‌باشد. عدد پکلت، از سرعت شعله آرام به جای سرعت جریان تشکیل و بصورت نسبت حرارت آزاد شده ناشی از احتراق در یک حفره و حرارت انتقال یافته از دیواره‌های حفره، توصیف می‌شود. تصمیم در مورد اینکه آیا شعله در داخل محیط متخلخل تشکیل می‌شود یا نه، می‌تواند توسط انتخاب اندازه حفره‌های شبکه جامد اتخاذ شود. اگر $Pe \leq 65$ باشد، خاموشی شعله رخ خواهد داد، چرا که حرارت انتقال داده شده به شبکه‌ی متخلخل با نرخ بالاتر از حرارت تولید شده بر اثر واکنش‌های شیمیایی خواهد بود. در بیشتر مشعل‌های متخلخل سرامیکی، جهت پیش‌گرمایش مخلوط و جلوگیری از برگشت شعله از محیط متخلخل با قطر حفره‌های کوچک ($Pe \leq 65$) استفاده می‌شود. پس از این ناحیه، ناحیه متخلخل دیگری با قطر حفره‌های بزرگ قرار گرفته ($Pe \geq 65$)، که اجازه ایجاد فرآیند احتراق را می‌دهد. شکل (۱) شماتیکی از یک مشعل متخلخل دو لایه‌ای را با عدد پکلت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایش یک مشعل متخلخل دو لایه‌ای [۴]

انرژی آزاد شده در زمان انجام واکنش‌های شیمیایی در محیط‌های متخلخل به انتقال حرارت خارج شده از شعله، محدوده اشتعال‌پذیری و نیز محدوده‌ی پایداری وابسته است. به طور خلاصه اشتعال در محیط متخلخل بسیار پیچیده‌تر از مشعل‌های معمولی است. شکل ۲ شماتیکی از انواع انتقال حرارت در یک مشعل متخلخل پیش‌مخلوط را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مکانیزم انتقال حرارت در داخل یک محیط متخلخل [۵]

شبکه متخلخل در ناحیه پیش‌گرمایش، بعلاوه انتقال حرارت تابشی و هدایتی با ناحیه احتراق، دمای بالاتری نسبت به مخلوط هوا و سوخت ورودی دارد. گرما از ناحیه متخلخل پیش‌گرمایش عمدتاً از طریق انتقال حرارت همرفت به مخلوط گاز انتقال داده می‌شود. وقتی مخلوط گاز به اندازه کافی گرم شد و به دمای آغازش احتراق رسید، در محل ناحیه احتراق واکنش شیمیایی انجام شده و گرما در یک فرآیند گرمازا آزاد می‌شود. در قسمت بزرگی از ناحیه احتراق، گاز در دمای بالاتری نسبت به شبکه جامد قرار دارد و این در حالی است که گرما از طریق انتقال حرارت همرفت به شبکه جامد متخلخل انتقال داده می‌شود. احتراق در داخل ناحیه متخلخل توسط سرعت جریان مخلوط هوا و سوخت کنترل شده و در حالت پایدار سرعت شعله بگونه‌ای است که از برگشت یا پریدن شعله جلوگیری می‌کند [۵].

کریستو و همکاران [۶] به مطالعه تجربی و عددی احتراق در مشعل‌های تابشی از نوع محیط متخلخل فلزی پرداختند. در این آزمایش از تعدادی تور سیمی به عنوان محیط متخلخل استفاده شده است. در این مطالعه نشان داده شد که دمای سطح تابع نسبت هم‌ارزی (Equivalence Ratio) و نرخ آتش (Firing Rate) است. آنها بیان داشتند که حداکثر دمای سطح در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر از یک حاصل می‌شود. همچنین در مخلوط‌های غنی شعله روی سطح تشکیل می‌شود در صورتی که در مخلوط‌های رقیق شعله در داخل یا نزدیک به سطح تشکیل خواهد شد.

لئوناردی و همکارانش [۷] بصورت تجربی عملکرد یک مشعل متخلخل از جنس الیاف فلزی را بررسی کردند. در این مطالعه اثر نرخ آتش بر روی دمای سطح دو محیط متخلخل، یک لایه‌ای به ضخامت ۲mm و دو لایه‌ای به ضخامت ۴mm در نرخ آتش‌های مختلف بررسی شد. آنها بیان داشتند که با افزایش نرخ آتش دمای سطح افزایش یافته، بگونه‌ای که دمای سطح محیط متخلخل دو لایه‌ای بیشتر از یک لایه‌ای است.

ساث و همکارانش [۸] بر روی احتراق پایدار و تابش حرارت خروجی در محیط متخلخل سرامیکی برای مخلوط‌های رقیق تحقیق کردند. آنها سرعت شعله و تابش خروجی را در مکان‌ها و نسبت تعادل‌های مختلف محیط بدست آوردند. آنها بیان داشتند که تابش خروجی از محیط متخلخل می‌تواند بواسطه تغییر دادن شعله به انتهای ناحیه پیش‌گرمایش ماکزیمم شود. ساث و همکارانش [۹] شدت تابش از یک مشعل سرامیکی از جنس آلومینا سیلیکات لیتیم (LAS) اندازه‌گیری نمودند. آنها اظهار داشتند که بازده تابشی در محدوده ۲۶ الی ۴۰ درصد می‌باشد. آنها نشان دادند که احتراق می‌تواند در دو ناحیه متفاوت از محیط متخلخل پایدار گردد، یکی نیمه بالادست محیط متخلخل و دیگری ناحیه مقابل آن که در نیمه پایین دست می‌باشد. کواگوچی و همکارانش [۱۰] اثر سرعت جریان را بر روی بازده تابشی در محیط متخلخل بررسی نمودند. آنها با بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت جریان از ۱۰ به ۲۵ سانتیمتر بر ثانیه، بازده تابشی به میزان ۱۵ درصد (یعنی از ۲۰ به ۵ درصد) کاهش می‌یابد.

تیپال و همکاران [۱۱] نرخ تابش حرارت خروجی از یک مشعل متخلخل سرامیکی لانه زنبوری را به کمک یک تابش‌سنج

دقیق لیزری بررسی نمودند. آنها بیان داشتند که برای نرخ اشتعال 315 KW/m^2 و در نسبت هوای اضافی ۵ الی ۳۰ درصد، بازده تابشی در محدوده ۱۲ الی ۲۶ درصد به دست می آید.

میتال و همکاران [۱۲] مطالعه‌ای تجربی در مورد احتراق مدفون در داخل محیط متخلخل از جنس کربید سیلیکون (Sic) و کردیت انجام دادند. در این آزمایش احتراق مدفون از طریق تابش خروجی و دمای مشعل بررسی شده است. آنها بازده تابشی را بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بدست آورده و بیان نمودند که این پارامتر به نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی شعله بستگی دارد. هاشمی و همکاران [۱۳] راندمان تابشی و شعله پایدار در داخل محیط متخلخل لایه‌ای از جنس فلزی را بررسی کردند. آنها از فشردن لایه‌های فلزی، ۳ محیط با ضخامت و تخلخل‌های متفاوت ایجاد کردند و دمای سطح و راندمان تابشی محیط متخلخل را اندازه‌گیری نمودند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش ضخامت محیط، دمای سطح کاهش و با افزایش دبی سوخت، دمای سطح افزایش می‌یابد.

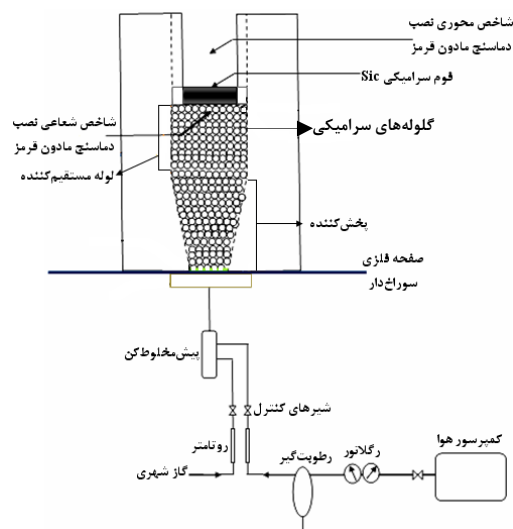
هاشمی و همکاران [۱۴] با تحقیق تجربی بر روی دو محیط متخلخل از جنس کربید سیلیکون و آلومینا، توزیع دمای جانبی دو محیط را در حالات مختلف بررسی و مقایسه کردند. آنها بیان کردند که با افزایش نرخ آتش، کلیه دماها در راستای محیط افزایش می‌یابند. اما به دلیل اتلاف بیشتر حرارت در محیط Sic که بدلیل ضریب هدایت و ضریب صدور بالاتر آن محیط نسبت به آلومینا است، دما در محیط Sic کمتر است. همچنین آنها نتیجه گرفتند که با افزایش نسبت هم‌ارزی، ابتدا دمای هر دو محیط روندی افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد. البته این تغییرات در آلومینا نسبت به Sic شدیدتر است.

هاشمی و همکاران [۱۵] مطالعه‌ای تجربی در زمینه راندمان تابشی مشعل‌های متخلخل از نوع توری سیمی و جنس فولاد ضدزنگ انجام دادند. آنها در آزمایش‌های خود از توری‌های سیمی با تخلخل $2/5 \text{ ppc}$ و 6 ppc با ضخامت $0/5 \text{ mm}$ و $0/7 \text{ mm}$ استفاده کرده و محیط‌های متخلخل ۳ تا ۷ لایه و نیز ترکیبی از آنها را ایجاد کردند. آنها بیان داشتند که ضخامت ناحیه متخلخل در نتایج آزمایش‌ها تأثیر مهمی داشته بگونه‌ای که حداکثر دمای سطح در محیط ۳ لایه با مش‌بندی ریز و در نسبت هم‌ارزی $0/75$ رخ می‌دهد. همچنین آنها مشاهده کردند که افزایش نرخ آتش برای یک محیط مشخص در اکثر آزمایش‌ها موجب کاهش راندمان تابشی خواهد شد. آنها نتیجه گرفتند که نسبت هم‌ارزی که در آن بیشترین راندمان تابشی روی می‌دهد به نرخ آتش وابسته است.

در مقاله حاضر اثر نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی بر دمای سطح و راندمان تابشی یک مشعل متخلخل سرامیکی بصورت تجربی بررسی شده است. این آزمایش‌ها با سوخت گاز طبیعی و در نرخ آتش‌های $182/9 \text{ KW/m}^2$ تا $402/3 \text{ KW/m}^2$ و نسبت هم‌ارزی‌های $0/70$ تا $1/0$ انجام شده است. در این مطالعه از یک نمونه دماسنج مادون قرمز که بر مبنای اندازه‌گیری میزان تابش خروجی از سطح، دما را اندازه‌گیری می‌کند، دمای سطوح مبنا و جانبی مشعل اندازه‌گیری می‌شود. به منظور جلوگیری از برگشت شعله و همچنین اختلاط بهتر سوخت و هوا، از گلوله‌های سرامیکی Sic به قطر 3 mm در یک مجرای واگرا و مستقیم در زیر محیط متخلخل استفاده شده است. محیط متخلخل مورد استفاده در این آزمایش، یک فوم سرامیکی Sic با تخلخل 10 ppi به قطر 90 mm و ضخامت 22 mm است. در این مطالعه، دمای سطح مشعل متغیر اصلی در تحقیقات انجام شده خواهد بود.

۲- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه ساخته شده در این آزمایش بطور کلی از دو بخش اصلی تشکیل شده است. بخش‌های اصلی دستگاه شامل پایه و پیش‌مخلوط‌کن و مشعل متخلخل است. مشعل متخلخل خود از قسمت‌های مختلفی چون فوم سرامیکی Sic، گلوله‌های سرامیکی Sic، قالب سرامیکی شامل پخش کننده و لوله مستقیم کننده و ... تشکیل شده است. شکل (۳) بطور شماتیک قسمت‌های مختلف دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تصویر دستگاه آزمایش

در این آزمایش به منظور قابلیت تنظیم دبی‌های گاز و هوا و همچنین اختلاط بهتر، از یک پیش مخلوط کن استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دبی هوا و گاز با توجه به دامنه دبی‌های مورد استفاده از دو عدد روتامتر متناسب با دبی‌ها، استفاده شده است که در شکل (۴) نمایش داده شده است. روتامترهای استفاده شده دقیقاً برای هوا و گاز در شرایط آزمون طراحی گردیده و نیازی به تصحیح مقادیر با استفاده از روابط روتامتر نخواهد بود.



شکل ۴- تصویر روتامترهای اندازه‌گیر دبی گاز و هوا

هوای مورد نیاز توسط کمپرسور تأمین شده و گاز مصرفی، گاز شهری می‌باشد. در این مطالعه دمای سطح مشعل توسط یک دماسنج مادون قرمز اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری دمای سطح مشعل، استفاده از ترموکوپل به دلیل اثر عبور گازهای داغ و ایجاد خطا توصیه نمی‌شود [۷]. اندازه‌گیری دمای سطح با استفاده از دماسنج مادون قرمز مستلزم داشتن مقدار ضریب صدور سطح مورد نظر است. با توجه به مرجع [۱۶]، ضریب صدور محیط متخلخل Sic برابر ۰/۹ می‌باشد. در این آزمایش نتایج به صورت پروفیل‌های دمای سطح مبنا (مرکز محیط متخلخل)، دمای سطح جانبی و بازده تابشی مشعل ارائه شده است.

۳- نتایج آزمایش

متغیرهایی که در این آزمون‌ها تغییر می‌کنند، دبی گاز و هوای ورودی به مشعل بوده که برای بدست آوردن تأثیر

پارامترهایی چون نسبت هم‌ارزی و نرخ آتش بر دمای سطح، بازده تابشی مشعل و شرایط مناسب ارزیابی می‌شوند. لذا در مجموع می‌توان گفت که در این آزمایش اثر تغییر مقادیری از دبی‌های گاز و هوای ورودی بر روی پارامترهایی چون دمای مشعل بررسی شده است. نتایج مربوط به چنین آزمایش‌هایی در منابع مختلف به دو صورت برحسب نرخ آتش [۷] یا برحسب نسبت هم‌ارزی [۶] ارائه می‌شوند. نرخ آتش بیانگر میزان انرژی شیمیایی سوخت بر واحد سطح بوده و از رابطه (۲) بدست می‌آید.

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

در این رابطه LHV ارزش حرارتی پایین سوخت، $\dot{m}_f$ دبی جرمی سوخت و A سطح مقطع مشعل است. مقدار ارزش حرارتی پایین سوخت با استفاده از داده‌های شرجت گاز ناحیه برابر 8400 Kcal/m^3 در نظر گرفته شده است.

در این مطالعه نرخ آتش اولیه با توجه به تشکیل شعله در فصل مشترک فوم و گلوله‌های سرامیکی انتخاب شده است ($182/9 \text{ kw/m}^2$). دومین نرخ آتش براساس اولین گام نفوذ شعله به داخل فوم می‌باشد ($219/5 \text{ kw/m}^2$). در این حالت شعله از فصل مشترک فوم و گلوله‌های سرامیکی جدا شده و شروع به نفوذ در داخل فوم می‌نماید. مشاهده می‌شود که اختلاف میان اولین نرخ آتش و نرخ آتش بعدی $36/6 \text{ kw/m}^2$ می‌باشد. گام‌های بعدی نرخ آتش براساس همین اختلاف در نظر گرفته شده است. به طور کلی این روند تا زمانی ادامه خواهد داشت که شعله به بالاترین موقعیت خود در فوم رسیده و دوباره به فصل مشترک فوم و گلوله‌های سرامیکی برگردد. جدول (۱) نرخ آتش‌های انتخاب شده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- نرخ آتش‌های انتخاب شده در آزمایش

	اولین نرخ آتش	دومین نرخ آتش	سومین نرخ آتش	چهارمین نرخ آتش	پنجمین نرخ آتش	ششمین نرخ آتش	هفتمین نرخ آتش
نرخ آتش‌های انتخاب شده (kw/m^2)	۱۸۲/۹	۲۱۹/۵	۲۵۶	۲۹۲/۶	۳۹۲/۲	۳۶۵/۸	۴۰۲/۳

مقدار بازده تابشی از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. در این رابطه، $\dot{Q}_{rad}$ نرخ شار انتقال حرارت تابشی از سطح مشعل بوده که از طریق رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$\eta_{rad} = \frac{\dot{Q}_{rad}}{FR} \times 100 \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \varepsilon [A_c (T_c^4) + A_s (T_s^4)] \quad (4)$$

در این رابطه ε ضریب صدور سطح فوم سرامیکی، σ ضریب استفان بولتزمن، T_c و T_s به ترتیب دمای سطوح مبنا و جانبی فوم و A_c و A_s نیز به ترتیب مساحت سطح مبنا و جانبی فوم می‌باشند.

۴- دمای سطح مشعل

شکل (۵) دمای سطح مشعل را برحسب نرخ آتش در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، صرف‌نظر از مقدار نسبت هم‌ارزی با افزایش نرخ آتش، دمای سطوح مشعل ابتدا روندی افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد. در تمامی موارد مطالعه شده، دمای سطح مبنای مشعل از دمای سطح جانبی آن بیشتر است. زیرا جهت جریان مخلوط داغ سوخت و هوا در جهت محوری فوم بوده که این امر موجب افزایش درجه حرارت محوری فوم (دمای سطح مبنا) نسبت به درجه حرارت شعاعی (دمای سطح جانبی) آن می‌شود. بیشترین دمای سطح بدست آمده در این مطالعه در نسبت هم‌ارزی

۰/۸۰ و در نرخ آتش $292/6 \text{ kw/m}^2$ است. در این حالت دمای اندازه‌گیری شده سطوح مینا و جانبی مشعل به ترتیب ۹۷۷ و ۹۴۴ کلوین می‌باشد.

با توجه به نمودارهای شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت هم‌ارزی، دمای آخرین نرخ آتش ابتدا روندی افزایشی داشته (تا نسبت هم‌ارزی ۰/۸۰) و بعد از آن روند کاهشی دما رخ می‌دهد. همچنین این روند برای اولین نرخ آتش نیز مشاهده می‌شود. بگونه‌ای که با افزایش نسبت هم‌ارزی دمای اولین نرخ آتش نیز ابتدا روندی افزایشی داشته (تا نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵) و بعد از آن روند کاهشی دما (به جزء نسبت هم‌ارزی ۰/۹۰) صورت می‌گیرد.

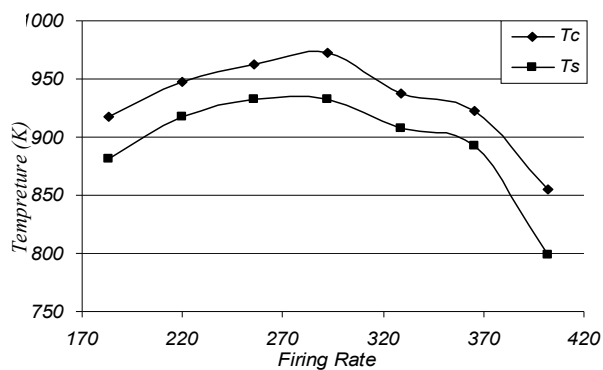
در اکثر آزمایش‌های انجام شده و در نرخ آتش اولیه ($182/9 \text{ kw/m}^2$)، شعله در فصل مشترک فوم و گلوله‌های سرامیکی تشکیل می‌شود. با افزایش تدریجی نرخ آتش، شعله شروع به نفوذ در داخل فوم می‌نماید که این حالت موجب افزایش تدریجی دمای سطوح مینا و جانبی فوم می‌شود. این روند بطور تقریبی در محدوده نرخ آتش $219/5 \text{ kw/m}^2$ تا 30 kw/m^2 صورت می‌گیرد. در تمامی آزمایش‌ها (به جزء در نسبت هم‌ارزی ۱) بیشترین گداختگی فوم و در نتیجه بیشترین دمای سطوح مینا و جانبی در نرخ آتش $292/6 \text{ kw/m}^2$ مشاهده می‌شود. پس از نرخ آتش $292/6 \text{ kw/m}^2$ ، حرکت تدریجی رو به پایین شعله در داخل فوم اتفاق افتاده که موجب کاهش تدریجی دمای سطوح مینا و جانبی آن می‌شود. این روند تا زمانی ادامه دارد تا اینکه شعله به داخل بستر گلوله‌های سرامیکی نفوذ کند. این پدیده باعث تاریک شدن کامل فوم و افت شدید دمایی (شیب تند در نمودارها) خواهد شد.

جدول (۲) حداکثر دما و دمای متوسط سطح مشعل را در نسبت هم‌ارزی مورد نظر به همراه نرخ آتش بهینه نشان می‌دهد. همانگونه که از جدول (۲) مشاهده می‌شود، حداکثر دمای سطوح در نسبت هم‌ارزی‌های پایین (بین ۰/۷۰ تا ۰/۸۰) رخ می‌دهد. اما نکته جالب توجه آن است که با افزایش نسبت هم‌ارزی، دمای متوسط سطح مشعل ابتدا روندی افزایشی داشته (تا نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵) و بعد از آن روند کاهشی دما رخ می‌دهد (شکل ۶).

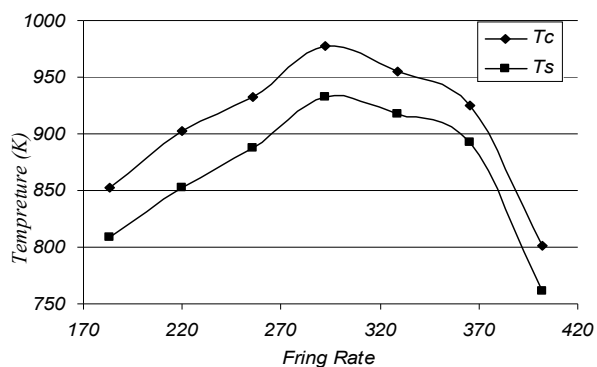
در آزمایش‌های صورت گرفته مشاهده شد که محل استقرار شعله و پایداری آن، تأثیر بسزایی را بر نمودارهای دمایی مشعل دارد. به گونه‌ای که با افزایش نفوذ شعله در داخل فوم، دمای سطوح مینا و جانبی مشعل افزایش یافته و هرچه نفوذ شعله به داخل فوم کمتر شود، دماهای مذکور کاهش می‌یابد. این در حالی است که با نفوذ شعله به داخل بستر گلوله‌های سرامیکی، دمای مشعل به شدت افت می‌نماید. از طرف دیگر مشاهده شد که ثبات شعله در نرخ آتش‌های کم سریع‌تر از نرخ آتش‌های زیاد می‌باشد. علت ثبات سریع شعله در نرخ آتش‌های کم، بالا بودن درجه حرارت مشعل می‌باشد.

جدول ۲- حداکثر دمای بدست آمده از مشعل به همراه نرخ آتش بهینه در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

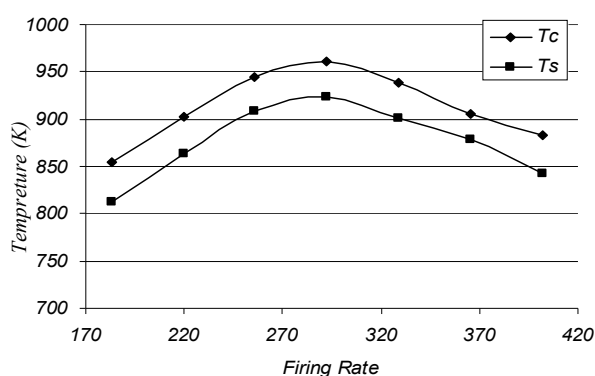
نسبت هم‌ارزی	نرخ آتش بهینه (kw/m^2)	حداکثر دمای سطح مشعل		دمای متوسط سطح مشعل در نسبت هم‌ارزی مورد نظر	
		دمای سطح جانبی (K)	دمای سطح مینا (K)	دمای سطح جانبی (K)	دمای سطح مینا (K)
۰/۷۰	۲۹۲/۶	۹۷۷	۹۳۳	۹۰۷	۸۶۵
۰/۷۵	۲۹۲/۶	۹۷۳	۹۳۳	۹۳۲	۸۹۵
۰/۸۰	۲۹۲/۶	۹۷۷	۹۴۴	۹۲۵	۸۸۱
۰/۸۵	۲۹۲/۶	۹۶۱	۹۲۳	۹۱۳	۸۷۶
۰/۹۰	۲۹۲/۶	۹۶۵	۹۳۵	۹۰۶	۸۷۸
۱/۰۰	۳۳۹/۲	۹۵۸	۹۳۸	۹۰۲	۸۷۶



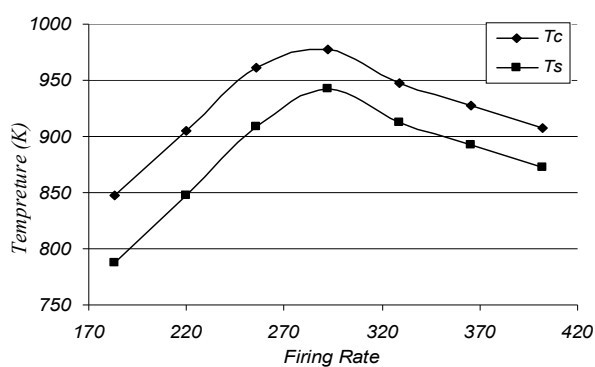
(ب) نسبت هم ارزی ۰/۷۵



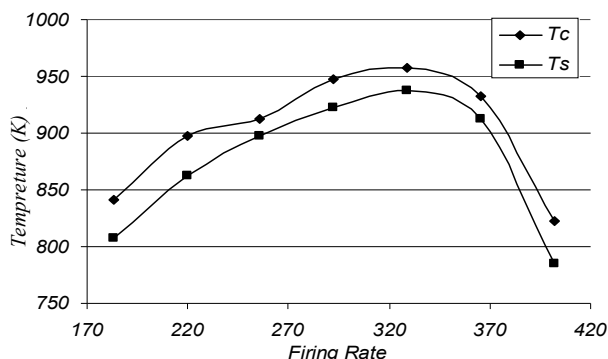
(الف) نسبت هم ارزی ۰/۷



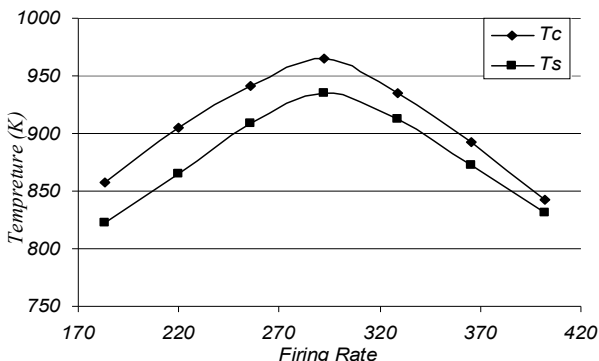
(د) نسبت هم ارزی ۰/۸۵



(ج) نسبت هم ارزی ۰/۸

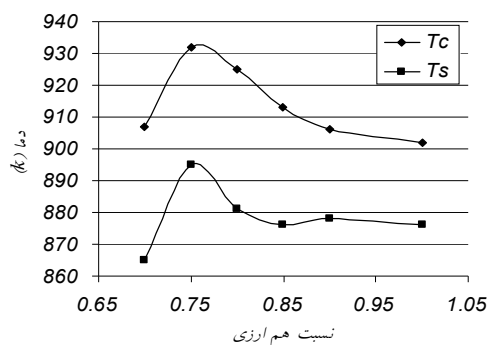


(و) نسبت هم ارزی ۱/۰



(ه) نسبت هم ارزی ۰/۹۰

شکل ۵- دمای سطوح مشعل بر حسب نرخ آتش در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف



شکل ۶- دمای متوسط سطوح مشعل در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

۵- بازده تابشی مشعل

مهمترین متغیر در بررسی مشعل‌های تابشی، بازده تابشی است که بر اساس رابطه (۳) و با استفاده از دمای سطوح مشعل، رابطه (۴) محاسبه می‌شود. مقدار بازده تابشی برای مشعل مورد مطالعه در شکل (۷) نشان داده شده است. طبق رابطه (۳) در یک نرخ آتش معین، هر چه دمای سطح افزایش یابد، بازده تابشی نیز افزایش خواهد یافت. اما این امر دلیلی بر آن ندارد که بالاترین بازده تابشی مربوط به بیشترین دمای سطح در مطالعات انجام شده است. زیرا نرخ آتش یکی از پارامترهای مهم در تعیین مقدار بازده تابشی می‌باشد.

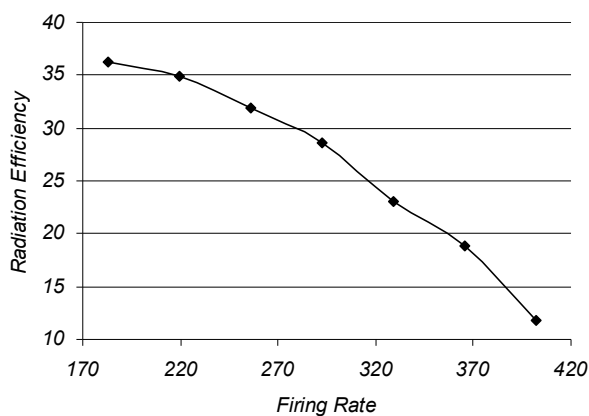
در شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ آتش، بازده تابشی ابتدا روندی افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد (به استثناء نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵). با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که تنها در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ است که دمای سطوح مبنا و جانبی مشعل در نرخ آتش‌های پایین، بیشتر از دمای سطوح مشعل در نسبت هم‌ارزی‌های دیگر می‌باشد. از طرف دیگر همانگونه که قبلاً بیان شد در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ حداکثر دما نسبت به نسبت هم‌ارزی‌های دیگر در نرخ آتش‌های اولیه رخ می‌دهد. بنابراین در شکل (۷-ب) ملاحظه می‌شود که بازده تابشی بطور کلی با افزایش نرخ آتش روند کاهشی را طی می‌کند. بیشترین بازده تابشی در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ و در نرخ آتش $182/9 \text{ kW/m}^2$ رخ می‌دهد. در این حالت دمای سطوح مبنا و جانبی مشعل به ترتیب 918 K و 881 K بوده که نسبت به حداکثر دمای مشعل در مطالعات انجام شده به ترتیب ۵۹ و ۵۲ درجه کمتر است.

همچنین در این شکل مشاهده می‌شود که شیب صعودی نمودارها در نرخ آتش‌های پایین کمتر از شیب نزولی آنها در نرخ آتش‌های بالاتر است (به استثناء نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بازده تابشی به نرخ آتش‌های بالاتر نسبت به نرخ آتش‌های پایین‌تر حساس‌تر می‌باشد.

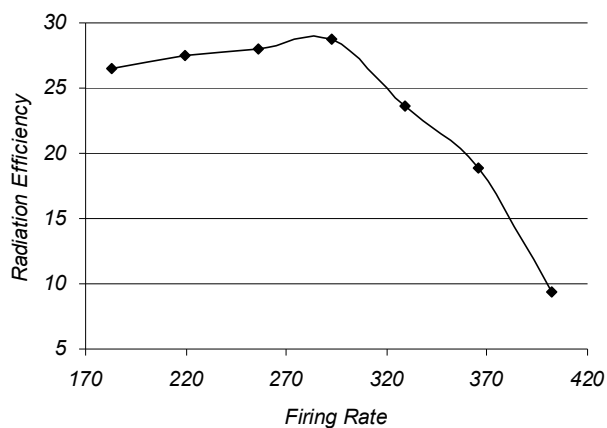
جدول (۳) حداکثر بازده تابشی بدست آمده از مشعل را به همراه نرخ آتش بهینه در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که از این جدول مشاهده می‌شود، روند خاصی برای نرخ آتش بهینه در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف استنباط نمی‌شود. اما مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت هم‌ارزی (تا نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵) بازده تابشی روندی افزایشی داشته و از آن به بعد این روند کاهشی است. این روند همچنین در بازده تابشی متوسط که از میانگین بازده‌های تابشی در نسبت هم‌ارزی‌های مورد نظر بدست آمده است، در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود.

جدول ۳- حداکثر بازده تابشی بدست آمده از مشعل به همراه نرخ آتش بهینه در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

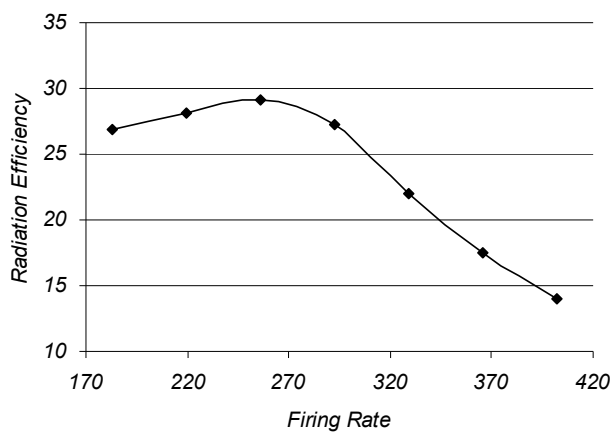
نسبت هم‌ارزی	نرخ آتش بهینه (kw/m^2)	حداکثر بازده تابشی	بازده تابشی متوسط در نسبت هم‌ارزی مورد نظر
۰/۷۰	۲۹۲/۶	۲۸/۸۱	۲۳/۲۴
۰/۷۵	۱۸۲/۹	۳۶/۲۵	۲۶/۴۶
۰/۸۰	۲۵۶	۳۰/۳۰	۲۴/۲۶
۰/۸۵	۲۵۶	۲۹/۱۵	۲۳/۵۴
۰/۹۰	۲۵۶	۲۸/۹۴	۲۳/۵۰
۱/۰۰	۲۱۹/۵	۲۷/۷۳	۲۳/۲۳



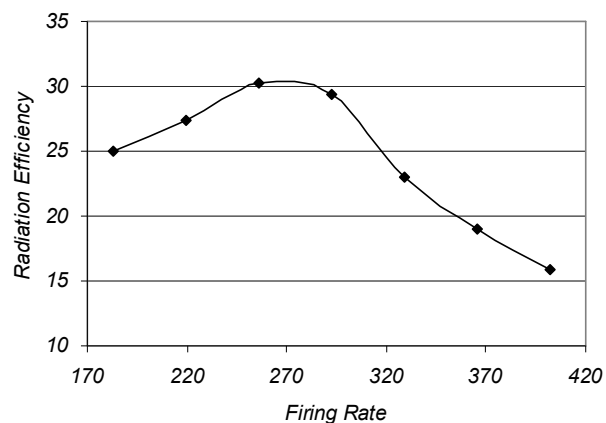
(ب) نسبت هم ارزی ۰/۷۵



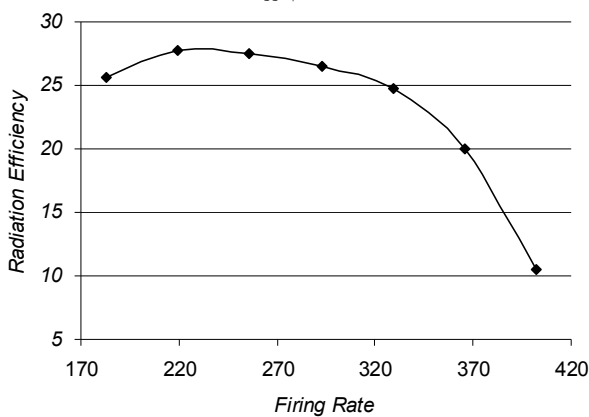
(الف) نسبت هم ارزی ۰/۷



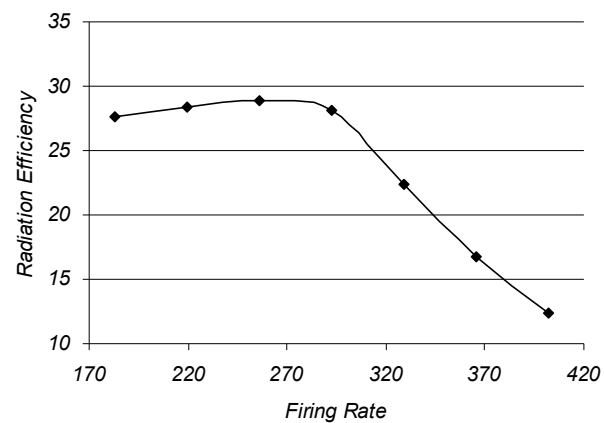
(د) نسبت هم ارزی ۰/۸۵



(ج) نسبت هم ارزی ۰/۸

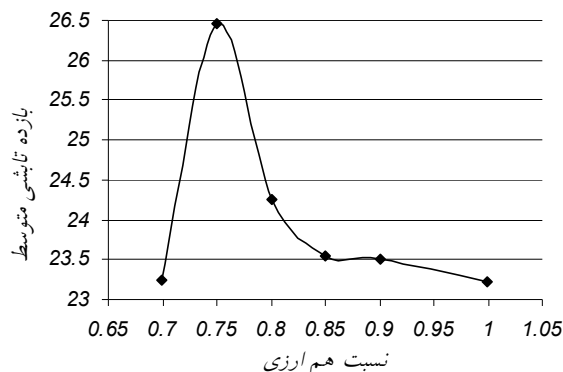


(و) نسبت هم ارزی ۱/۰



(ه) نسبت هم ارزی ۰/۹

شکل ۷- بازده تابشی مشعل بر حسب نرخ آتش در نسبت هم ارزی های مختلف



شکل ۸- بازده تابشی متوسط مشعل در نسبت هم ارزی‌های مورد مطالعه

با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود حداکثر بازده تابشی متوسط در نسبت هم ارزی ۰/۷۵ رخ می‌دهد. البته نمودار شکل (۸) با توجه به نمودار دمای متوسط سطوح مشعل که در شکل (۶) نشان داده شده است، قابل پیش‌بینی بود. همچنین در شکل بالا مشاهده می‌شود که بازده تابشی متوسط در نسبت هم ارزی‌های ۰/۷۰ و ۱ با یکدیگر برابر هستند. از طرف دیگر با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌شود که حداکثر اختلاف میان بالاترین و پایین‌ترین بازده تابشی متوسط در آزمایش‌های انجام شده، حدود ۳/۳ می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر نسبت هم ارزی و نرخ آتش بر راندمان تابشی مشعل متخلخل سرامیکی بررسی شد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها بطور خلاصه عبارتند از:

۱- در تمامی آزمایش‌های انجام شده، با افزایش نرخ آتش، دمای سطوح مشعل ابتدا روندی افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد.

۲- بیشترین درجه حرارت سطح مینای مشعل در نرخ آتش‌های کمتر از $292/6 \text{ kw/m}^2$ در نسبت هم ارزی ۰/۷۵ و بیشتر از $292/6 \text{ kw/m}^2$ در نسبت هم ارزی ۰/۸۰ ایجاد می‌شود.

۳- بیشترین دمای سطح بدست آمده در نسبت هم ارزی ۰/۸۰ و در نرخ آتش $292/6 \text{ kw/m}^2$ است. در این حالت دمای سطوح مینا و جانبی مشعل به ترتیب ۹۷۷ و ۹۴۴ کلوین می‌باشد.

۴- حداکثر دمای سطوح مشعل در تمامی نسبت‌های هم ارزی (به جزء نسبت هم ارزی ۱/۰) در نرخ آتش $292/6 \text{ kw/m}^2$ رخ می‌دهد.

۵- با افزایش نسبت هم ارزی، دمای متوسط سطح مشعل ابتدا روندی افزایشی داشته (تا نسبت هم ارزی ۰/۷۵) و بعد از آن روند کاهشی دما رخ می‌دهد.

۶- در نرخ آتش‌هایی که درجه حرارت فوم در حال افزایش است، تثبیت شعله راحت‌تر و سریع‌تر از دیگر نرخ آتش‌ها صورت می‌گیرد.

۷- در تمامی آزمایش‌های انجام شده دمای سطح مینا بیشتر از دمای سطح جانبی مشعل می‌باشد. علت این امر حرکت محوری جریان مخلوط داغ هوا و سوخت در فوم است.

۸- به استثناء نسبت هم ارزی ۰/۷۵، در تمامی موارد با افزایش نرخ آتش، بازده تابشی ابتدا روندی افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد.

۹- بیشترین بازده تابشی مشعل در نرخ آتش‌های کمتر از $292/6 \text{ kw/m}^2$ در نسبت هم ارزی ۰/۷۵ و بیشتر از $292/6 \text{ kw/m}^2$

۲۹۲/۶ در نسبت هم‌ارزی ۰/۸۰ ایجاد می‌شود.
۱۰- بیشترین بازده تابشی بدست آمده در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ و در نرخ آتش $182/9 \text{ kw/m}^2$ است. در این حالت بازده تابشی مشعل ۳۶/۲۵ می‌باشد.
۱۱- با افزایش نسبت هم‌ارزی، بازده تابشی متوسط مشعل ابتدا روندی افزایشی داشته (تا نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵) و بعد از آن کاهش می‌باشد.

منابع

- Weinberg, F. J., "Combustion Temperatures: the Future," Nature, 233, pp. 239-241, 1971.
- Takeno, T., and Sato, K., "A Theoretical and Experimental Study on an Excess Enthalpy Flame, Combustion in Reactive System," In Proceeding of the Seventh International Colloquium on Gas Dynamics, Honolulu (Ed. J. P. Boris), 76, pp. 596-610, 1981.
- Babkin, V. S., Korzhavin, A. A., and Bunev, V. A., "Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media," Combustion and Flame, 87, pp. 182-190, 1991.
- Bouma, P. H., Eggels, R. L. G. M., Goey de, L. P. H., Nieuwenhuizen, J. K., Van der Drift, A., "A Numerical and Experimental Study of the NO Emission of Ceramic Foam Surface Burners," Combustion Science and Technology, pp. 108-175, 1995.
- Vafai, Kambiz, Handbook of Porous Media, Second Edition, Published by CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.
- 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.
- Leonardi, A. S., Viskanta, R., and Gore, P. J., "Radiation and Thermal Performance Measurements of a Metal Fibre Burner," Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 73, pp. 491-501, 2002.
- Sathe, S. B., Kulkarni, M. R., Peck, R. E. and Tong, T. W., "An Experimental Study of Combustion and Heat Transfer in Porous Radiant Burners," Western States Section, Combustion Institute, Livermore, pp. 23-24 October, CA, 1989.
- Sathe, S. B., Kulkarni, M. R., Peck, R. E. and Tong, T. W., "An Experimental and Theoretical Study of Porous Radiant Burner Performance," Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, the Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1011-1018, PA, 1990.
- Kawaguchi, I., Otoh, T., Nakamura, S., Todoroki, A. and Murayama, Y., "Premixed Combustion at a Fiber Mat," Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1019-1024, 1990.
- Tidball, R. K., Donaldson, R. J., and Gotterba, J. A., Gas Research Institute Rep. GRI 89/0253, Chicago, 1989.
- 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.
۱۳. هاشمی، س؛ ع؛ عطوف، ح؛ شاهرودیان، ح؛ "بررسی تجربی یک نمونه مشعل تابشی از نوع محیط متخلخل فلزی"، یازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه خواجه نصیرالدین، تهران، ایران، خرداد ماه ۱۳۸۷.
۱۴. هاشمی، س؛ ع؛ ناظمی، م؛ "مقایسه تجربی احتراق در محیط متخلخل کربید سیلیسیم و آلومینا"، سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، دانشگاه امیرکبیر، هتل المپیک، تهران، ایران، اسفند ماه ۱۳۸۸.
۱۵. هاشمی، س؛ ع؛ معتقدی فرد، ر؛ "بررسی تجربی راندمان تابشی مشعل متخلخل فلزی"، نوزدهمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، اردیبهشت ماه ۱۳۹۰.
16. Mobbauer S., Pickenacker O., Pickenacker K. and Trimis D., "Application of the Porous Burner Technology in Energy-and Heat-Engineering," Proceeding of 5th Int. Conf. on Technologies and Combustion for a Clean Enviro. Clean Air. Lisbon, pp. 519-523, 1999.