

بررسی عددی اثر چگالی حفره بر توان حرارتی یک مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد

سید عبدالمهدی هاشمی^{۱*}، مجید نیکفر^۲، مصطفی خسروی الحسینی^۳

دانشگاه کاشان، ساختمان مهندسی، گروه مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی

* (hashemi@kashanu.ac.ir)

چکیده

امروزه استفاده از مشعل‌های متخلخل به عنوان یکی از تجهیزات احتراقی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تکنولوژی مشعل متخلخل بر پایه احتراق در داخل محیط متخلخل است. حوزه کارکرد وسیع همراه با توان حرارتی بالا، ابعاد کوچک و نشر کم گازهای آلودگی کننده این تکنولوژی را در صنایعی همچون نیروگاه‌ها و صنعت خودرو و همچنین کاربردهای خانگی گسترش داده است. برای افزایش توان حرارتی مشعل متخلخل، تغییری در ساختار آن ایجاد شده و مورد آزمون تجربی و شبیه سازی عددی قرار گرفته است. محیط متخلخل که به شکل استوانه است به گونه‌ای در امتداد محور سوراخ شده است که ترکیبی از مشعل متخلخل و شعله آزاد را بوجود می‌آورد. در این مطالعه به بررسی اثر پارامتر چگالی حفره محیط متخلخل بر روی حدود پایداری مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد پرداخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش چگالی حفره محیط متخلخل محدوده پایداری شعله افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که تولید آلاینده NO وابسته به چگالی حفره محیط متخلخل است. نتایج مدل سازی عددی مطابقت خوبی با داده‌های تجربی دارند.

واژه‌های کلیدی: احتراق، چگالی حفره، محیط متخلخل، مشعل ترکیبی، شعله آزاد، آزمون تجربی

۱- مقدمه

پایداری احتراق پیش‌آمیخته و افزایش توان حرارتی در مشعل‌ها همواره یکی از نیازهای مهم صنعت است. محققین روش‌های مختلفی را برای افزایش توان حرارتی مشعل با پایداری شعله استفاده کرده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به شعله چرخشی، استفاده از جسم مانع در احتراق و مشعل‌های متخلخل اشاره کرد. مشعل متخلخل نقش قابل ملاحظه‌ای در کاهش آلاینده‌ها می‌تواند داشته باشد. تکنولوژی مشعل متخلخل بر پایه احتراق در داخل محیط متخلخل است. حوزه کارکرد وسیع همراه با توان حرارتی بالا، ابعاد کوچک و نشر کم گازهای آلودگی کننده این تکنولوژی را در صنایعی همچون نیروگاه‌ها و صنعت خودرو و همچنین کاربردهای خانگی گسترش داده است. به علت هدایت گرمایی بالا، دمای احتراق در مقایسه با شعله آزاد به طور قابل توجهی می‌تواند کاهش یابد. تقریباً در تمامی تکنیک‌های احتراق از ساختار شعله آزاد^۴ که ضخامت شعله (خصوصاً در حالت پیش مخلوط) بسیار باریک است، استفاده می‌شود. به عنوان نمونه در مشعل بانسن^۵ حداکثر ضخامت جبهه شعله یک میلی‌متر است. دلیل این ضخامت نازک ضریب انتقال حرارت هدایتی پایین مخلوط گاز است. گرادیان دمای بالا در

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۲- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

۳- استادیار، پژوهشگاه صنعت نفت

⁴ Free Flame

⁵ Bunsen Burner

این منطقه باریک احتراق باعث انتقال حرارت در خلاف جهت حرکت جریان و در نتیجه رساندن مخلوط احتراق به دمای شعله وری می گردد. به منظور افزایش توان حرارتی و افزایش سرعت شعله در شعله آزاد از روش ایجاد اغتشاش در بالا دست جریان گاز استفاده می شود. این امر باعث ضخیمتر شدن جبهه شعله و افزایش انتقال حرارت می گردد. اما در کنار این بهبود، افزایش اغتشاش باعث چند شاخه ای شدن، افزایش ناپایداری، تولید سر و صدا و افزایش افت فشار می گردد. در مواد متخلخل انتقال حرارت توسط هدایت و تشعشع صورت می پذیرد. بالا دست ناحیه احتراق توسط تشعشع صادر شده از ناحیه پایین دست احتراق و همچنین انتقال حرارت هدایتی داخل ماده متخلخل پیش گرم می شود. حرارت تشعشعی ابتدا باعث گرم شدن جسم جامد و سپس بواسطه انتقال حرارت جابجایی باعث گرم شدن مخلوط گاز می گردد. همچنین بخش ناچیزی از این تشعشع (به دلیل ضریب جذب پایین گاز) مستقیماً سبب گرمایش مخلوط می شود. از آنجا که در شعله آزاد مقاومت در مقابل جریان نسبت به محیط متخلخل کمتر است لذا اگر از ترکیب شعله آزاد و محیط متخلخل استفاده شود در یک شرایط بهینه، به احتراقی که شامل ویژگی‌های مثبت احتراقی هر دو مشعل (متخلخل و شعله آزاد) باشد خواهیم رسید.

ایجاد اغتشاش در جریان احتراقی، اختلاط بهتر سوخت و هوا و بهبود مکانیزم احتراق در شعله‌های پیش مخلوط از اهداف اولیه بکارگیری محیط متخلخل در احتراق است. البته بعدها مزایای فراوان آنها باعث شد تا تحقیقات وسیعتر و بیشتری در این زمینه انجام شود. دسوت و همکاران [۱] در سال ۱۹۶۶ جز اولین کسانی بودند که احتراق در محیط متخلخل را آزمایش کرده‌اند. محیط متخلخل مورد استفاده آنها مخلوط شن بوده و مدلی نیمه تجربی برای محاسبه سرعت شعله ارائه کردند و تاثیر پیش گرمایش به وسیله هدایت حرارتی را روی سرعت شعله را بررسی نمودند.

برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ یاشیزاوا و همکاران [۲] مدل یک بعدی از احتراق درون ماده متخلخل ارائه دادند که در آن مطالعه تشعشع هدف اصلی بود. او فرض کرده است که گاز عامل غیر تشعشعی است، خواص فیزیکی و ترمودینامیکی ثابت اند، حرکت گاز به اندازه ای آرام است که می‌توان از افت فشار درون ماده متخلخل صرف‌نظر نمود، واکنش احتراق به صورت تک مرحله‌ای است، گاز محترق شده با جسم جامد متخلخل به تعادل گرمایی رسیده و از یک معادله انرژی برای هر دو استفاده گردیده است. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که انتقال حرارت هدایت در جهت خلاف حرکت جریان باعث افزایش آنتالپی احتراق می گردد و بالانس محلی و کلی انرژی نمایانگر اهمیت انتقال حرارت تشعشع در رفتار سیستم می باشد.

واینبرگ [۳] نشان داد که می‌توان از حرارت محصولات احتراق برای پیش گرمایش مخلوط سوخت و هوا استفاده نمود و در نتیجه دمای آدیاباتیک شعله را افزایش داد. تاکنو و ساتو [۴] نشان دادند که این ایده را می‌توان توسط هدایت حرارتی درون یک مشعل متخلخل برآورده نمود و از آن به بعد تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه آغاز گردید.

در یک تحقیق آزمایشگاهی، بابکین و همکارانش [۵] سرعت شعله پیش مخلوط متان-هوا و پروپان-هوا را در چهار نوع ماده متخلخل اندازه‌گیری نمودند. همچنین اثر پارامترهای فشار، درصد هوای اضافی و قطر حفره‌های ماده متخلخل مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایشات انجام گرفته توسط بابکین^۱ و همکاران مشخص ساخت که برای ایجاد احتراق در ماده متخلخل عدد پکلت باید بزرگتر از ۶۵ باشد:

$$Pe = \frac{S_l d_m c_p \rho}{k} \quad (1)$$

S_l سرعت شعله آرام، d_m قطر معادل ماده متخلخل، c_p ظرفیت حرارتی ویژه، ρ دانسیته و k ضریب هدایت حرارتی مخلوط گاز است. در اکثر مشعل‌های متخلخل با پیش مخلوط سوخت و هوا، منطقه پیش گرمایش از مواد متخلخلی با قطر حفره های کوچک ساخته می شود، به گونه‌ای که عدد پکلت کمتر از حالت بحرانی ($Pe < 65$) باشد. این منطقه علاوه بر پیش گرمایش مخلوط، باعث جلوگیری از برگشت شعله نیز می‌شود. پس از این ناحیه، ماده متخلخل دیگری با قطر حفره های بزرگتر قرار دارد که اجازه ایجاد فرایند احتراق را می دهد.

¹ Babkin

استفاده از سینتیک کامل احتراق در مدلسازی مشعل متخلخل توسط هسو و همکاران [۶] مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق مکانیزم تک مرحله‌ای با مکانیزم چند مرحله‌ای احتراق درون ماده متخلخل بررسی شده است. مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی در خصوص توزیع دما، نرخ آزادسازی انرژی و کل انرژی آزاد شده، نشان داده است که مدل تک مرحله‌ای دارای دقت پایینی است ولی در حالت احتراق رقیق می‌توان به دقت نتایج اعتماد نمود. در تخمین NO توسط مدلسازی عددی انجام گرفته انحراف قابل توجهی مشاهده می‌گردد که برطبق گفتار محققین به دلیل استفاده از ضریب انتقال حرارت جابجایی ثابت و عدم توجه به توربولانس است. آنها همچنین در تحقیق دیگری به بررسی اثر تخلخل و دیگر خصوصیات محیط متخلخل پرداختند [۷]. وجه تمایز این تحقیق نسبت به تحقیقات قبلی استفاده از مکانیزم کامل احتراق و تعیین خواص ترموفیزیکی فاز جامد به صورت دقیق می‌باشد. مشاهده گردیده است که اثر پیش گرمایش با افزایش انتقال حرارت جابجایی و هدایت فاز جامد افزایش می‌یابد. انتقال حرارت جابجایی با افزایش تعداد سلول‌ها به ازای هر واحد طول ماده متخلخل افزایش می‌یابد در حالی که ضریب جذب با افزایش اندازه سلول‌ها و کاهش دانسیته آنها کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده گردیده است که نسبت اختلاط در احتراق رقیق تا میزان ۰/۳۶ می‌تواند پایین آورده شود. دمای آدیاباتیک شعله با توجه به اثر پیش گرمایش بین ۱ تا ۱۰ درصد بیشتر از دمای آدیاباتیک شعله آزاد بدست آمده است. این موضوع تفاوت قابل توجهی با تحقیقات قبلی که از مکانیزم تک مرحله‌ای استفاده می‌کردند، دارد (این تحقیقات دمای آدیاباتیک شعله را بین ۴۰ تا ۵۰ درصد بیشتر از دمای آدیاباتیک شعله آزاد تخمین می‌زدند).

یکی دیگر از مدلسازی‌های عددی انجام شده به منظور تعیین عملکرد احتراق درون ماتریس فلزی توسط لئوناردی انجام شده است [۸]. این مدل یک بعدی از مکانیزم چند مرحله‌ای استفاده می‌کند. ماده متخلخل به صورت جسم خاکستری در نظر گرفته شده است و معادله انتقال حرارت تشعشع توسط روش DOM حل گردیده است. معادلات به صورت کوپل حل شده و موقعیت شعله توسط آنها تعیین می‌گردد. پایداری شعله تحت تاثیر بار حرارتی و همچنین افت حرارت مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصله با مقادیر تجربی مقایسه گردیده است. راندمان تشعشعی هنگامی که شعله به خارج از سطح ماده متخلخل رانده می‌شود افت محسوسی را نشان می‌دهد. یک تست تجربی و عددی توسط زو و همکاران [۹] روی مشعل متخلخل انجام شده است. مدل عددی مورد استفاده آنها دو بعدی بوده که دمای محوری محیط متخلخل را بالاتر از ۲۰۰۰ کلوین پیش‌بینی می‌کند. نتایج آنها نشان می‌دهد که حد پایین شعله‌وری برای سوخت متان و پروپان به ترتیب تا نسبت هم‌ارزی‌های ۰/۴ و ۰/۳۹ می‌رسد.

یکی از پارامترهای مهم در مطالعه مشعل متخلخل نرخ آتش (firing rate) است که بیانگر میزان انرژی شیمیایی سوخت بر واحد سطح بوده و از رابطه (۲) بدست می‌آید.

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

که در آن LHV ارزش حرارتی گاز طبیعی، $\dot{V}_f$ دبی حجمی گاز و A سطح مقطع مشعل است. در این مطالعه احتراق در مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد مورد تست تجربی و شبیه سازی عددی قرار می‌گیرد. محیط متخلخل از جنس سیلیکون کرباید است. محیط متخلخل که به شکل استوانه است به گونه‌ای در امتداد محور سوراخ شده است که ترکیبی از مشعل متخلخل و شعله آزاد را بوجود می‌آورد. در این تحقیق اثر چگالی حفره محیط متخلخل (تعداد حفره در سانتیمتر) بر توان حرارتی مشعل، محل شعله و تولید آلایندة NO بررسی می‌شود.

۲- تست تجربی

هوای خروجی از کمپرسور بعد از عبور از فشار سنج، رطوبت‌گیر و دبی سنج، وارد مخلوط کن سوخت و هوا می‌شود تا با سوخت گاز شهری در این قسمت مخلوط شود. سوخت و هوای خروجی از مخلوط کن بعد از عبور از پخش کننده و یکنواخت

کننده به محیط متخلخل می‌رسد. محیط متخلخلی که در این آزمایش استفاده می‌شود، از جنس فوم‌های سرامیکی SiC می‌باشد. سرامیک به شکل استوانه‌ای به قطر 90 mm (دارای مساحت 64 cm^2) و ارتفاع 22 mm بوده و دارای تخلخل 87% درصد و چگالی حفره 8 ppc می‌باشد (شکل ۱). قطر سوراخ وسط محیط متخلخل 9 mm می‌باشد.



شکل ۱. محیط متخلخل از جنس سرامیک SiC

برای هم محور نگه داشتن سرامیک در راستای عمودی و جلوگیری از ورود هوای ثانویه^۱ (مقدار هوایی که از هوای اطراف محیط متخلخل سرامیکی ممکن است به منطقه‌ی واکنش وارد شود) به منطقه‌ی واکنش از یک نگه‌دارنده‌ی سرامیکی استفاده شده است. این غلاف از پودری مقاوم در مقابل حرارت تهیه شده است.

برای پخش کردن مخلوط هوا و گاز ورودی از یک پخش‌کننده‌ی^۲ چدنی استفاده شده است. وظیفه‌ی این پخش‌کننده، پخش مخلوط به‌طور یکسان و همگن در کل سطح مقطع ورودی به سرامیک (یا سطح مقطع مشعل) است. برای اطمینان بیشتر در انجام این امر در سرعت‌های بالای مخلوط ورودی، از صفحه‌ای سوراخ‌دار استفاده شده که در روی پخش‌کننده و قبل از ورود به سرامیک قرار گرفته است.

در این تحقیق از ترموکوپل نوع B استفاده شده است. ترموکوپل‌ها به وسیله دو ماژول تیپ b و g ، مبدل پورت و منبع تغذیه به دستگاه رایانه متصل می‌شود. دمای ترموکوپل‌ها در هر ثانیه با استفاده از نرم افزار labview اندازه‌گیری می‌شود. دمایی که به عنوان دمای محیط متخلخل اندازه‌گیری می‌شود باید در حالت پایدار شعله خوانده شود. باید توجه داشت که سرعت گاز روی دیواره‌ی جامد تقریباً صفر است. پس می‌توان نتیجه گرفت دمایی که هر ترموکوپل احساس می‌کند بیشتر ناشی از تابش و هدایت حرارتی سرامیک است تا جابجایی حرارتی گازهای اطراف ترموکوپل. لذا دمای احساس شده توسط ترموکوپل تقریباً برابر با دمای جانبی سرامیک است.

در محیط متخلخل ترموکوپل اول در ابتدا محیط متخلخل، ترموکوپل دوم با فاصله 10 mm از ترموکوپل اول و ترموکوپل سوم در انتهای این محیط متخلخل با ضخامت 22 mm و در تماس با بدنه آن قرار دارد. دو ترموکوپل یکی در فاصله 20 mm از محیط متخلخل و زیر آن قرار داده شده و دیگری درست در خروجی محفظه و بر روی خط محور آن تعبیه شده است. برای اندازه‌گیری دبی گاز و هوا از روماتر استفاده شده است. مزیت استفاده از این وسیله نسبت به سایر وسایل اندازه‌گیری دبی جریان، در قیمت ارزان، نصب راحت و دقت مطلوب آن (۲٪ خطا در بیشترین مقدار) است. در هر یک از مسیرهای جریان گاز و هوا یک روماتر قرار داده شده است. روماتر گاز دارای بازه‌ی کارکردی جریان بین ۰ تا ۱۶ لیتر بر دقیقه و فشار تفاضلی عملکرد در شرایط دمایی نرمال، ۱۶ میلیتر آب معادل فشار شبکه‌ی گاز طبیعی بعد از رگلاتور است. روماتر هوا بازه‌ی کارکردی دبی بین ۰/۵ تا ۱۰ مترمکعب بر ساعت دارد و فشار تفاضلی عملکرد آن در شرایط دمایی نرمال برابر یک بار است.

¹ Secondary Air

² Diffuser

اگر دما از حالت نرمال تغییر کند باید مقدار جریان اصلاح گردد. زیرا چگالی گازها نسبت به مایعات وابستگی بیشتری به دما دارند. بر اساس اطلاعات بدست آمده از شرکت گاز منطقه، چگالی گاز طبیعی 0.744 کیلوگرم بر مترمکعب و ارزش حرارتی خالص آن 8400 کیلوکالری بر متر مکعب بوده و 89 درصد آن را متان تشکیل می دهد.

با توجه به آنکه مشعل های متخلخل از نوع شعله پیش مخلوط هستند، در این دستگاه از یک پیش مخلوط کن استفاده می شود. این قطعه به گونه ای طراحی شده است که ابتدا هوای مصرفی از درون یک مجرای همگرا، وارد پیش مخلوط کن شده و سپس گاز به آن اضافه می شود. همچنین یک پیچ تنظیم، مقدار دبی ورودی مخلوط سوخت و هوا را به داخل محفظه احتراق کنترل می کند. در 20 ل پیش مخلوط کن مورد استفاده در دستگاه آزمایش نشان داده شده است.

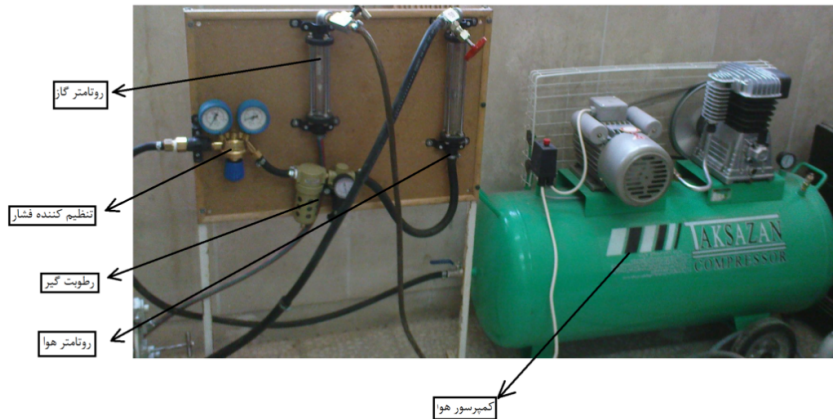


شکل ۲. پیش مخلوط کن سوخت و هوا

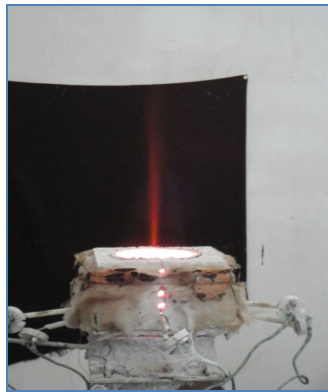
در این دستگاه آزمایشگاهی از یک کمپرسور 200 لیتری با قابلیت تحمل بیشینه ی فشار 10 بار بهره گرفته شده است (شکل ۳). فشار طراحی روتامتر هوا برابر یک بار است. به همین دلیل یک تنظیم کننده ی فشار (یا رگلاتور) در مسیر بین کمپرسور و روتامتر هوا نصب شده تا بتواند فشار هوا را تا یک بار کاهش دهد. شکل ۳ این رگلاتور را نشان می دهد. هوایی که توسط کمپرسور فشرده می شود موقع خروج، رطوبت زیادی دارد. زیرا وقتی در دمای محیط فشار هوا زیاد شود، رطوبت موجود در هوا به مایع تبدیل و در مخزن کمپرسور جمع شده و هنگام خروج هوا، همراه آن از مخزن خارج می شود. این رطوبت باعث ایجاد خطا در اندازه گیری روتامتر می شود. بنابراین یک رطوبت گیر بین رگلاتور و روتامتر نصب می شود (شکل ۳).

هوای خارج شده از کمپرسور وارد رگلاتور شده و سپس وارد رطوبت گیر می شود. پس از آن هوای آماده وارد روتامتر و در نهایت وارد یکی از ورودی های پیش مخلوط می گردد. گاز طبیعی نیز پس از وارد شدن به روتامتر مورد نظر وارد ورودی دوم پیش مخلوط می گردد. پس از ورود هوا و گاز به پیش مخلوط، مخلوط آماده وارد شدن به تجهیزات مشعل می گردد.

در این قسمت نتایج آزمایش تجربی و مدل سازی عددی برای یک حالت ارائه شده است. در این حالت سرعت ورودی cm/s 40 ، نسبت هم ارزی 0.9 ، دبی سوخت گاز شهری $12.5 lit/min$ ($FR=1143 \text{ kW/m}^2$) و دبی هوا $9/1 \text{ m}^3/hr$ می باشد. این تست در شرایط اتمسفریک انجام شده است. شکل ۴ شعله پایداری را در شرایط ذکر شده نشان می دهد. همانطور که از شکل ۴ مشخص است از قسمت سوراخ میانی محیط متخلخل که قبلا در شکل ۱ نشان داده شد، شعله آزاد بیرون آمده است. باید توجه شود که در تمامی طول ناحیه قرمز رنگ در شکل ۴ شعله نداریم و بخشی از این طول شعله تنها مربوط به درخشش محصولات احتراق است. به علت گداختگی زیاد سطح محیط متخلخل و کشیدگی شعله آزاد، امکان ارائه عکس از نمای بالا نبوده است.



شکل ۳. نحوه قرارگیری روماترها، رگلاتور و رطوبت گیر

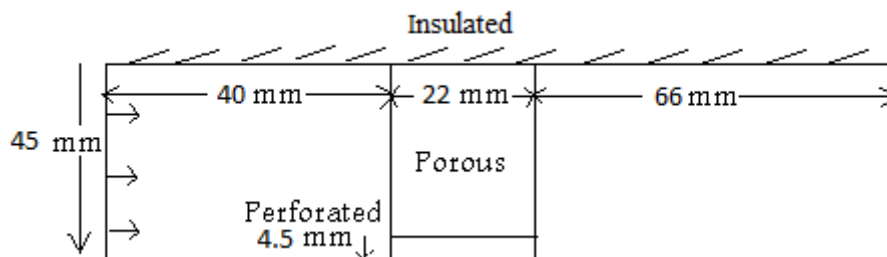


شکل ۴. نمای از یک شعله پایدار در شرایط آزمایش الف) تست تجربی ب) شبیه سازی عددی

۳- شبیه سازی عددی

۳-۱- هندسه و شرایط مرزی

شکل ۵ یک هندسه دو بعدی متقارن محوری را برای شبیه سازی احتراق در این مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد نشان می دهد. مطابق طرح آزمایشگاهی، اندازه شعاع ورودی سوخت و هوا برابر ۴۵mm می باشد. طول کل محفظه برابر ۱۲۸mm می باشد که محیط متخلخل به ضخامت ۲۲mm در فاصله ۴۰mm ای از ورودی مخلوط قرار دارد. طول محفظه بعد از محیط متخلخل ۶۰mm است.



شکل ۵. هندسه مورد استفاده در مدل سازی عددی

سرعت ورودی مخلوط متان و هوا 40 cm/s و نسبت هم ارزی 0.9 می باشد. دمای ورودی 300 K و مقدار شدت آشتگی ورودی 5% در نظر گرفته شده است. جریان در فشار 1 bar محفظه را ترک می کند. دیواره ها عایق می باشند و ضریب صدور دیواره ها برابر 0.7 در نظر گرفته است.

۳-۲- الگوریتم حل، استقلال حل از شبکه و اعتبار سنجی

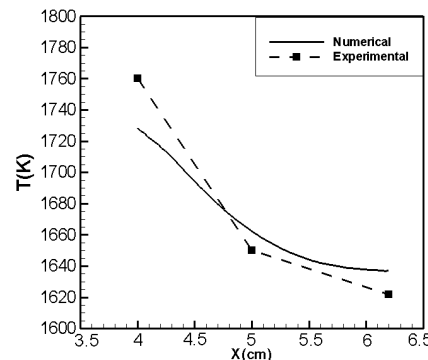
مدل سازی ها با نرم افزار انسیس فلوئنت و روش حجم محدود انجام شده است. در این مدل سازی از مکانیزم دقیق کاهش یافته استفاده شده که شامل ۱۶ جزء و ۴۱ واکنش است. در این شبیه سازی فاز جامد و گاز در تعادل دمایی فرض می شود. برای گسسته سازی جملات معادلات از تقریب مرتبه دو بالادست و برای کوپل کردن جملات فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. حل کننده تفکیکی به صورت ضمنی به کار گرفته شده است. معیار همگرایی 10^{-6} برای باقیمانده جملات معادله انرژی و 10^{-4} برای سایر معادلات در نظر گرفته شده است. از روش جهات مجزا (DO) برای مدل سازی تشعشع استفاده شده است. ماده متخلخل به صورت همگن است. خواص فیزیکی و ترموفیزیکی محیط متخلخل مانند ضریب هدایت حرارتی یا قطر حفره ها ثابت اند. ماده متخلخل غیر کاتالیستی است. معادلات تابش برای محیط متخلخل حل نمی شود. حرکت گاز به صورت جریان آشفته در نظر گرفته شده است و از روش $k-\epsilon$ Realizable برای مدل سازی روابط توربولانس استفاده شده که با توجه به پیش آمیخته بودن جریان و عدد دامکلهر کوچکتر از ۱، از روش شیمی با سرعت محدود استفاده شده است (Laminar Finite-rate). معادلات برای همه ۱۶ جزء حل می شوند و زمان هر اجرا حدود ۵ شبانه روز می باشد.

برای مش بندی مدل از نرم افزار گمبیت استفاده شده و ساختار منظم چهار ضلعی استفاده شده است. به منظور یافتن تعداد سلول های مناسب شبکه برای شبیه سازی عددی، دما در خروجی محفظه احتراق و روی خط محور آن برای تعداد سلول های متفاوت در شبیه سازی عددی نسبت به مقدار اندازه گیری شده در تست تجربی مقایسه شده است (جدول ۱). دما در این نقطه در تست تجربی 1710 K است. با توجه به جدول ۱ تعداد 64000 سلول مناسب به نظر می رسد.

جدول ۱. بررسی استقلال حل از شبکه

تعداد نقاط شبکه	دمای محاسبه شده در خروجی (K)	درصد خطا با نتایج تجربی (%)
۶۰۰۰	۲۴۰۰	۴۰
۳۶۰۰۰	۲۲۳۰	۳۰
۵۷۰۰۰	۱۸۱۰	۵/۸
۶۴۰۰۰	۱۸۰۰	۵/۲
۷۶۰۰۰	۱۸۰۲	۵/۳

در شکل ۶ دماهای اندازه گیری شده در محیط متخلخل به همراه دماهای بدست آمده در نقاط مشابه در شبیه سازی عددی آمده است. از شکل ۶ مشخص است که شعله در قسمت زیرین محیط متخلخل پایدار شده است و ماکزیمم دما در محیط متخلخل حدود 1800 کلوین است. در شکل ۶، از مقایسه دو منحنی دمای مربوط به تست تجربی و شبیه سازی عددی مشخص است که هر دو منحنی رفتار یکسانی برای دما نشان می دهند و بیشینه اختلاف بین این دو منحنی حدود 2% است.



شکل ۶. مقایسه پروفیل دمای جانبی محیط متخلخل در مدل سازی عددی و تجربی در مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد

۳-۳- معادلات حاکم و فرضیات مدل

معادلات حاکم شامل پیوستگی، مومنتوم، انرژی، اجزا و حالت در دو بعد برای حالتی که تعادل حرارتی بین فاز جامد و گاز در نظر گرفته شده است به ترتیب عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j}] - \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C U_j T)_f = \frac{\partial}{\partial x_j}(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \varepsilon \sum_{k=1}^{NS} \dot{\omega}_k h_k W_k + u_i (\tau_{ij})_{eff}) + S_h \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho D_{km} \frac{\partial}{\partial x_j} Y_k) + \dot{\omega}_k W_k \quad (6)$$

$$\rho = \frac{p \bar{W}}{RT} \quad (7)$$

که در آن ρ جرم مخصوص می باشد و از قانون گاز ایده آل به دست می آید. همچنین μ لزجت دینامیک، U_j و u_j به ترتیب سرعت سیال و سرعت نوسان سیال در جهت j و k_{eff} ضریب هدایت مؤثر و ε تخلخل محیط متخلخل می باشند. مقدار k_{eff} به صورت $k+k_t$ تعریف می شود که در آن k ضریب هدایتی و k_t هدایت آشفته گی جریان می باشد. D_{km} ضریب دیفیوژن جزء k ام در مخلوط و $(\tau_{ij})_{eff}$ تانسور تنش مؤثر است. S_h در این مسئله ترم تابش است که در بخش های بعد به آن پرداخته می شود. $\dot{\omega}_k$ نرخ تولید جزء شیمیایی می باشد. برای تعیین مقدار افت فشار در طول محیط متخلخل از رابطه زیر استفاده شده است [۱۰]:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_i = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u_i}{d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho |V| u_i}{d_p^3} \quad (8)$$

که d_p قطر متوسط حفره می باشد که عبارت است از [۱۰]:

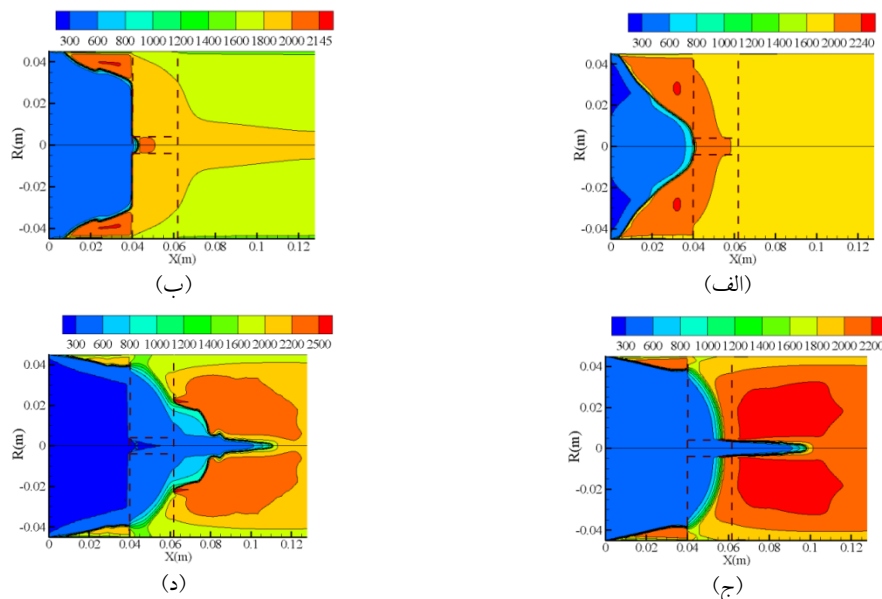
$$d_p \text{ (cm)} = \frac{\sqrt{4\varepsilon/\Pi}}{\lambda} \quad (9)$$

که در آن λ چگالی حفره محیط متخلخل بر حسب حفره در سانتی متر (ppc) است. تمام جملات جابجایی در معادلات بالا توسط طرح بالادست مرتبه دوم^۱ گسسته می شوند که دارای دقت مرتبه دو است. برای اصلاح ترم فشار از الگوریتم سیمپل^۲ [۱۱] استفاده شده است.

۴- نتایج

با توجه به اینکه تخلخل و چگالی حفره می توانند جدای از هم تعریف شوند بنابراین در این تحقیق به ازای تخلخل ثابت ۸۷٪ و نسبت هم ارزی ۰/۹، مشعل با چگالی حفره های مختلف بررسی می شود. بنابراین با توجه به تعریف تخلخل، به ازای یک نسبت ثابتی از حجم فضاهای خالی به حجم کل، اثر تغییر تعداد حفره های محیط متخلخل در واحد طول بر کارکرد مشعل بررسی می شود. در این تحقیق سه چگالی حفره ۴ ppc، ۸ ppc و ۱۶ ppc در نظر گرفته شده است.

شکل ۷ خطوط هم دمای مشعل ترکیبی با چگالی حفره ۴ ppc را در سرعت های ورودی مختلف نشان می دهد. مشاهده می شود که کمترین سرعت ورودی (توان حرارتی) که به ازای آن شعله پایدار داخل محیط متخلخل شکل می گیرد، ۰/۴ m/s است (شکل ۷ب). بیشینه سرعت ورودی برای ایجاد شعله پایدار ۱/۲ m/s است (شکل ۷د). شکل ۷-الف برگشت شعله و شکل ۷-د پرش شعله را نشان می دهد.



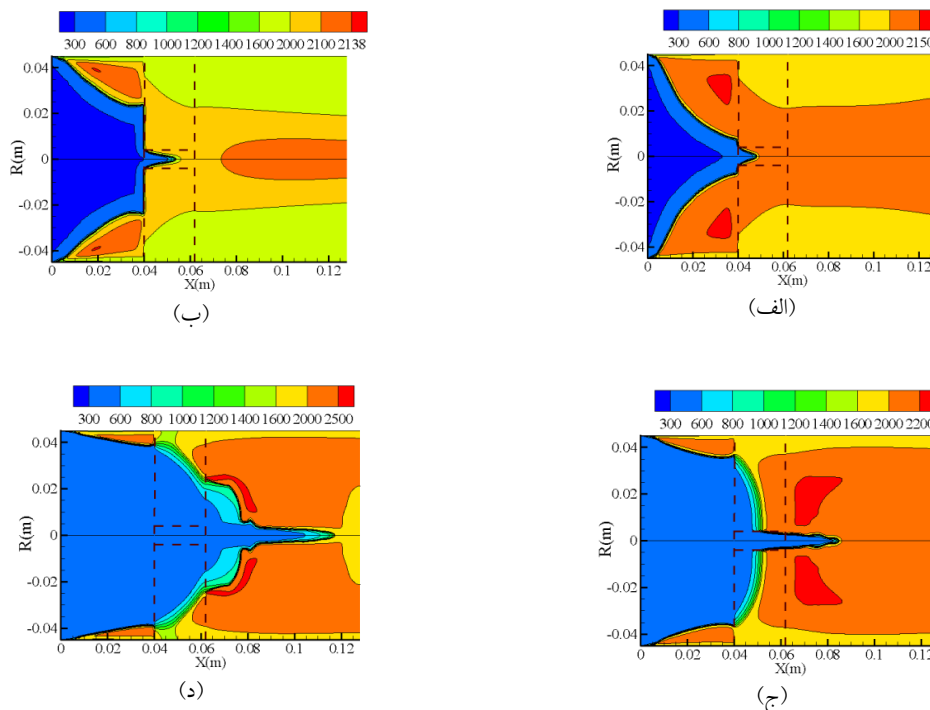
شکل ۷. خطوط هم دما بر حسب کلوین داخل محفظه احتراق با $\lambda = 4$ ppc در سرعت های الف) ۰/۳ m/s ب) ۰/۴ m/s ج) ۱/۲ m/s د) ۱/۳ m/s

خطوط هم دما برای مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد با چگالی حفره ۸ ppc در شکل ۸ نشان داده شد. از شکل ۸-ب مشاهده می شود که کمترین سرعت ورودی (توان حرارتی) که به ازای آن شعله پایدار داخل محیط متخلخل شکل می گیرد

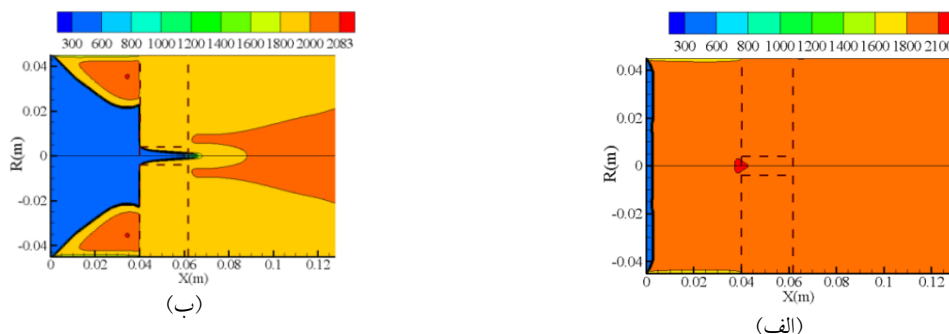
⁸⁰Second-order upwind scheme(SOU)

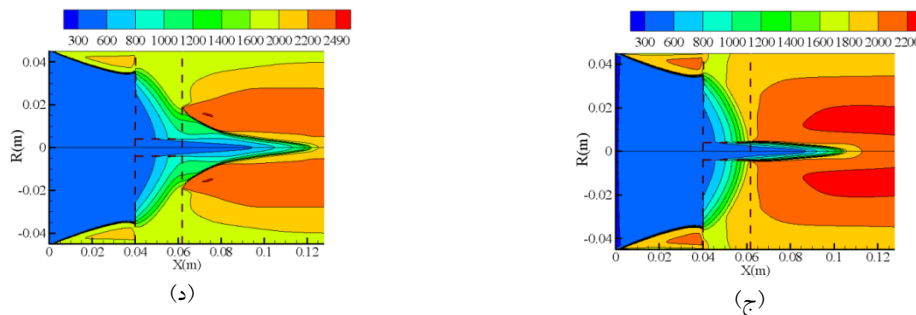
⁸¹SIMPLE

0.3 m/s است. بیشینه سرعت ورودی برای ایجاد شعله پایدار $1/5 \text{ m/s}$ است (شکل ۸-ج). شکل های ۸-الف و ۸-د به ترتیب برگشت شعله و پرش شعله را نشان می دهند. شکل ۹ خطوط همدمای مشعل ترکیبی با چگالی حفره 16 ppc را در سرعت های ورودی مختلف نشان می دهد. از شکل ۹-ب مشاهده می شود که کمترین سرعت ورودی (توان حرارتی) که به ازای آن شعله پایدار داخل محیط متخلخل شکل می گیرد 0.8 m/s است. بیشینه سرعت ورودی برای ایجاد شعله پایدار $2/6 \text{ m/s}$ است (شکل ۹-ج). شکل های ۹-الف و ۹-د به ترتیب برگشت شعله و پرش شعله را نشان می دهند.



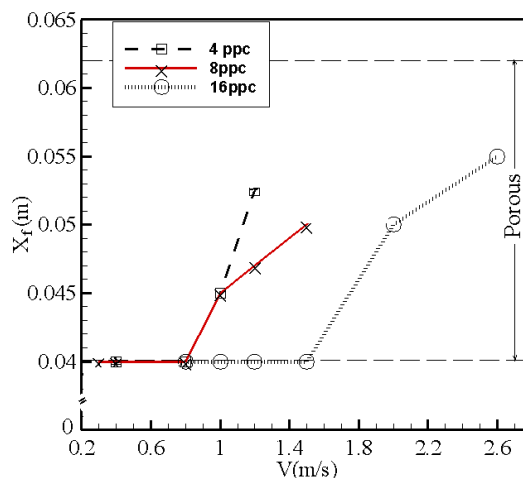
شکل ۸. خطوط هم دما بر حسب کلونین داخل محفظه احتراق مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد با $\lambda = 8 \text{ ppc}$ و در سرعت های الف) 0.2 m/s ب) 0.3 m/s ج) 0.5 m/s د) 0.8 m/s





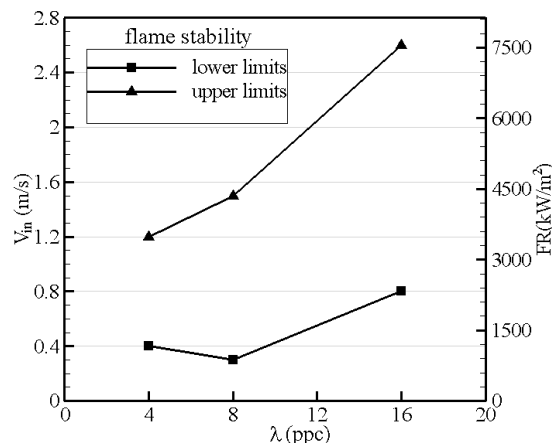
شکل ۹. خطوط هم دما بر حسب کلونین داخل محفظه احتراق با چگالی حفره $\lambda = 16$ ppc در سرعت‌های الف) 0.7 m/s (ب) $2/7 \text{ m/s}$ (ج) $2/6 \text{ m/s}$ (د) $2/7 \text{ m/s}$

شکل ۱۰ منحنی مکان شعله بر حسب سرعت مخلوط ورودی را برای چگالی حفره‌های ۴ ppc، ۸ ppc و ۱۶ ppc در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ نشان می‌دهد. از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی حفره محیط متخلخل شعله به ازای سرعت‌های بالاتری به سمت پایین دست جریان (بالای محیط متخلخل) حرکت می‌کند. به عنوان مثال در سرعت ورودی 0.7 m/s در مشعل با محیط متخلخل ۴ ppc شعله در موقعیت $X = 0.0525 \text{ m}$ از ابتدای محفظه قرار دارد در حالی که در مشعل با تخلخل ۱۶ ppc شعله همچنان در پایین‌ترین سطح محیط متخلخل قرار دارد ($X = 0.04 \text{ m}$).

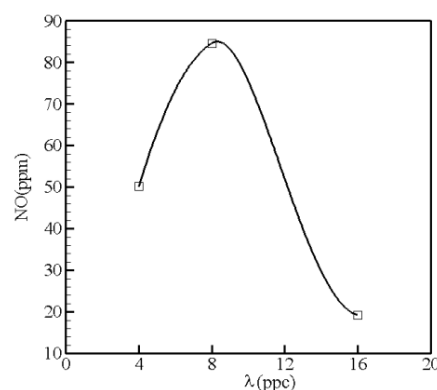


شکل ۱۰. منحنی مکان شعله بر حسب سرعت مخلوط ورودی برای چگالی حفره های مختلف

شکل ۱۱ حدود پایداری شعله بر حسب چگالی حفره‌های مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۱ دیده می‌شود با افزایش چگالی حفره محیط متخلخل در مشعل ترکیبی حد بالای پایداری مقادیر بالاتری را انتخاب می‌کند. با توجه به اینکه سرعت شعله آرام در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ برابر با 0.3 m/s است. از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که به ازای هیچ یک از مقادیر چگالی حفره محیط متخلخل شعله پایدار در سرعت‌های کمتر از سرعت شعله آرام در این نسبت هم‌ارزی نداریم و فقط به ازای چگالی حفره ۸ ppc در سرعت ورودی معادل سرعت شعله آرام شعله پایدار شکل می‌گیرد. در شکل ۱۲ مقادیر تولید آلاینده NO بر حسب چگالی حفره را در نرخ آتش 2900 kW/m^2 و در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ نشان می‌دهد. از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که چگالی حفره محیط متخلخل بکار برده شده بر تولید آلاینده NO اثر گذار است. بیشترین و کمترین تولید آلاینده NO به ترتیب در مشعل با محیط متخلخل ۸ ppc و ۱۶ ppc رخ می‌دهد.



شکل ۱۱. حدود پایداری شعله بر حسب چگالی حفره‌های مختلف



شکل ۱۲. میزان تولید آلاینده NO بر حسب چگالی حفره در $FR=2900 \text{ kW/m}^2$

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر یک مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد مورد آزمون تجربی و شبیه سازی عددی قرار گرفت. محیط متخلخل که به شکل استوانه است به گونه‌ای در امتداد محور سوراخ شده است که ترکیبی از مشعل متخلخل و شعله آزاد را بوجود می‌آورد. نتایج، تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج عددی نشان می‌دهد به طوری حداکثر اختلاف بین نتایج تجربی و عددی حدود ۲٪ می‌باشد. از نتایج تجربی و عددی مشاهده شد که شعله در زیر محیط متخلخل پایدار می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که شعله در همه چگالی حفره‌های محیط متخلخل در نیمه پایینی محیط متخلخل پایدار می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش سرعت مخلوط ورودی شعله شروع به حرکت در محیط متخلخل به سمت پایین دست جریان می‌کند. با افزایش چگالی حفره محیط متخلخل شعله به ازای سرعت‌های بالاتری به سمت پایین دست جریان (بالای محیط متخلخل) حرکت می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش چگالی حفره محدوده پایداری شعله افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در سرعت‌های کمتر از سرعت شعله آرام شعله پایدار بوجود نیامده و برگشت شعله رخ می‌دهد. از نتایج مشاهده می‌شود که چگالی حفره محیط متخلخل بر تولید آلاینده NO اثرگذار است.

مراجع

- 1- Soete G. De. "Stability and Propagation of Combustion Wave in Porous Media" The Eleventh Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 959-966, 1966.
- 2- Yoshizawa, Y., Sasaki, K. and Echigo, R., "*Analytical study of the structure of radiation controlled flame*" International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 31, pp. 311-319, 1988.
- 3- Weinberg, F. J., "*Combustion temperatures: the future*" Nature, vol. 233, pp. 239-241, 1971.
- 4- Takeno, T. and Sato, K. "*A theoretical and experimental study on an excess enthalpy flame, combustion in reactive systems*", the Seventh International Colloquium on Gas dynamics, Honolulu (Ed. J. P. Boris), vol. 76, pp. 596-610, 1981.
- 5- Babkin, S. V., Korzhavin, A. A. and Bunev, A. V., "*Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media*" Combustion and Flame, vol. 87, pp. 182-190, 1991.
- 6- Hsu, F. P. and Matthews, D. R., "*The Necessity of Using Detailed Kinetics in Models for Premixed Combustion within Porous-Media*", Combustion and Flame, vol. 93, pp. 457-466, 1993.
- 7- Hsu, F. P., Howell, R. J. and Matthews, D. R., "*A Numerical Investigation of Premixed Combustion within Porous Inert Media*", Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, vol. 115, pp. 744-750, 1993.
- 8- Leonardi, A. S., Viskanta, R. and Gore, P. J., "*Analytical and experimental study of combustion and heat transfer in submerged flame metal fiber burners/heaters*" Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, vol. 125, pp. 118-125, 2003.
- 9- Xu, K., Liu, M., Zhao, P., "*Stability of lean combustion in mini-scale porous media combustor with heat recuperation*", Chem. Eng. Process.: Process intensification, 50, 608-613, 2001.
- 10- Diamantis D.J., Mastorakos E. and Goussis D.A. "Simulations of Premixed Combustion in Porous Media", Combust. Theory and Modeling, Vol. 6, pp. 383-411, 2002.
- 11- S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Pub, New York, 1980.