

طراحی و ساخت یک مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد و مقایسه آن با مشعل متخلخل

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

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. در این مطالعه برای افزایش توان حرارتی مشعل، یک شعله آزاد با سرعت بالا به وسیله محیط متخلخل پایدار می‌شود. به این منظور ابتدا نمونه آزمایشگاهی مشعل طراحی و ساخته شده است. سپس دو مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد و مشعل تمام متخلخل مورد آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی قرار گرفته و با هم مقایسه می‌شوند. 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 نشان می‌دهد که شعله آزاد به همراه شعله مدفون در محیط متخلخل در مشعل پایدار می‌شود. نتایج مدل‌سازی عددی مطابقت خوبی با داده‌های تجربی دارند. نتایج نشان می‌دهد مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد توان حرارتی را افزایش و آلایندگی را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: احتراق، مشعل ترکیبی، محیط متخلخل، شبیه‌سازی عددی، طراحی و ساخت

۱- مقدمه

یکی از مسائل مهم و مطرح چند دهه اخیر آلودگی محیط زیست است. احتراق سوخت‌های فسیلی یکی از منابع اصلی تولید آلودگی در محیط زیست است. بسیاری از آلودگی‌ها مانند NO_x و SO_x به وسیله احتراق سوخت‌های فسیلی تولید می‌شوند. انتشار این آلودگی‌ها به وسیله کاهش مصرف سوخت و با بهبود تجهیزات احتراقی می‌تواند کاهش یابد. یکی از این تجهیزات احتراقی که مدتی است مورد توجه قرار گرفته است و نقش قابل ملاحظه‌ای در کاهش آلایندگی‌ها می‌تواند داشته باشد، مشعل متخلخل 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 آلودگی‌کننده 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

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

۳- استادیار، پژوهشگاه صنعت نفت ایران

^۴ Free Flame

^۵ Bunsen Burner

میلیمتر است. دلیل این ضخامت نازک ضریب انتقال حرارت هدایتی پایین مخلوط گاز است. گرادیان دمای بالا در این منطقه باریک احتراق باعث انتقال حرارت در خلاف جهت حرکت جریان و در نتیجه رساندن مخلوط احتراق به دمای شعله‌وری می‌گردد. به منظور افزایش توان حرارتی و افزایش سرعت شعله در شعله آزاد از روش ایجاد اغتشاش در بالا دست جریان گاز استفاده می‌شود. این امر باعث ضخیم‌تر شدن جبهه شعله و افزایش انتقال حرارت می‌گردد. اما در کنار این بهبود، افزایش اغتشاش باعث چند شاخه‌ای شدن، افزایش ناپایداری، تولید سر و صدا و افزایش افت فشار می‌گردد. در مواد متخلخل انتقال حرارت توسط هدایت و تشعشع صورت می‌پذیرد. بالا دست ناحیه احتراق توسط تشعشع صادر شده از ناحیه پایین دست احتراق و همچنین انتقال حرارت هدایتی داخل ماده متخلخل پیش گرم می‌شود. حرارت تشعشعی ابتدا باعث گرم شدن جسم جامد و سپس بواسطه انتقال حرارت جابجایی باعث گرم شدن مخلوط گاز می‌گردد. همچنین بخش ناچیزی از این تشعشع (به دلیل ضریب جذب پایین گاز) مستقیماً سبب گرمایش مخلوط می‌شود. همچنین نشان داده شده است که سرعت شعله در محیط متخلخل می‌تواند تا ۱۸ برابر بیشتر از سرعت شعله آزاد جریان آرام باشد [۱]. 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.

برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ یاشیزاوا و همکارانش [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 پروفیل دما، شار انرژی تشعشعی و دیگر خصوصیات حرارتی قویاً با ضریب جذب، ضخامت اپتیکی ماده متخلخل و موقیت مکانی احتراق وابسته است. همچنین مشخص گردید که انتقال حرارت هدایت در جهت خلاف حرکت جریان باعث افزایش آنتالپی احتراق می‌گردد و بالانس محلی و کلی انرژی نمایانگر اهمیت انتقال حرارت تشعشع در رفتار سیستم می‌باشد.

در سال ۱۹۷۴ واینبرگ 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 [۳]. در خلال سال‌های ۱۹۷۹ تا ۱۹۸۱ 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.

استفاده از سینتیک کامل احتراق در مدلسازی مشعل متخلخل توسط هسو و همکاران [۵] 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 [۶]. 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 [۷]. 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.

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 برحسب kJ/m^3 ، $\dot{V}_f$ دبی حجمی گاز بر حسب m^3/s و A سطح مقطع مشعل بر حسب m^2 می‌باشد.

در حال حاضر هیچ تحقیقی در مورد احتراق در مشعلی مرکب از محیط متخلخل و شعله آزاد انجام نگرفته است. در این مطالعه احتراق در مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد مورد تست تجربی و شبیه‌سازی عددی قرار گرفته و با مشعل تمام متخلخل مقایسه می‌شود. 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.

۲- وسائل آزمایش

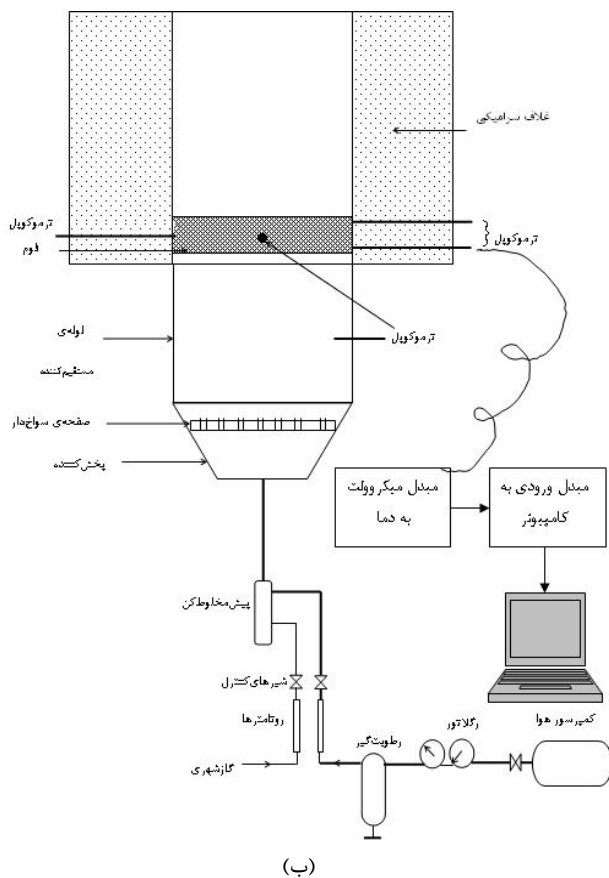
شکل ۱ سیستم کلی دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. شکل ۱-الف پایه نگهدارنده‌ای که مشعل بر روی آن سوار می‌شود را نشان می‌دهد. در شکل ۱-ب طرح‌واره‌ای از کل سیستم آزمایش به همراه تجهیزات به کار رفته ارائه شده است. همانطور که از شکل ۱-ب مشخص است هوای خروجی از کمپرسور بعد از عبور از فشار سنج، رطوبت‌گیر و دبی سنج، 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. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، برای پخش کردن مخلوط هوا و گاز ورودی از یک پخش کننده^۱ چدنی استفاده شده است. وظیفه‌ی این پخش کننده، پخش مخلوط به‌طور یکسان و همگن در کل سطح مقطع ورودی به سرامیک (یا سطح مقطع مشعل) است.

محیط متخلخلی که در این آزمایش استفاده می‌شود، از جنس فوم‌های سرامیکی SiC می‌باشد. سرامیک به شکل استوانه‌ای به قطر 90mm (دارای مساحت 64cm^2) و ارتفاع 22mm بوده و دارای تخلخل ۸۷ درصد و چگالی حفره ppc ۸ می‌باشد (شکل ۲). قطر سوراخ وسط محیط متخلخل 9mm می‌باشد (شکل ۲).

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، برای هم محور نگه داشتن سرامیک در راستای عمودی و جلوگیری از ورود هوای ثانویه^۲ (مقدار هوایی که از هوای اطراف محیط متخلخل سرامیکی ممکن است به منطقه‌ی واکنش وارد شود) به منطقه‌ی واکنش از یک محفظه سرامیکی نسوز استفاده شده است.

¹ Diffuser

² Secondary Air



شکل ۱. الف) پایه نگه دارنده مشعل به همراه مخلوط کن سوخت و هوای طراحی شده (ب) طرحواره‌ی دستگاه آزمایش



شکل ۲. محیط متخلخل سوراخ شده از جنس سرامیک SiC



شکل ۳. نگه دارنده‌ی سرامیکی

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.

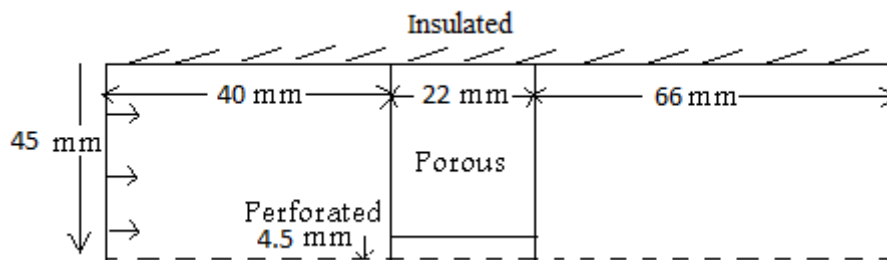
در محیط متخلخل ترموکوپل اول در ابتدا محیط متخلخل، ترموکوپل دوم با فاصله 10 mm از ترموکوپل اول و ترموکوپل سوم در انتهای این محیط متخلخل با ضخامت 22 mm و در تماس با بدنه آن قرار دارد. برای اندازه‌گیری دبی گاز و هوا از روتامتر استفاده شده است. مزیت استفاده از این وسیله نسبت به سایر وسایل اندازه‌گیری دبی 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 روتامتر قرار داده شده است. روتامتر گاز دارای بازه‌ی کارکردی جریان بین ۰ تا 16 لیتر بر دقیقه و فشار تفاضلی عملکرد در شرایط دمایی نرمال، $16\text{ میلیتر آب معادل فشار شبکه‌ی گاز طبیعی}$ بعد از رگلاتور است. روتامتر هوا بازه‌ی کارکردی دبی بین 0.5 تا $10\text{ مترمکعب بر ساعت}$ دارد و فشار تفاضلی عملکرد آن در شرایط دمایی نرمال برابر یک بار است. 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 $0.744\text{ کیلوگرم بر مترمکعب}$ و ارزش حرارتی خالص آن $8400\text{ کیلوکالری بر متر مکعب}$ بوده و ۸۹ درصد آن را متان تشکیل می‌دهد.

با توجه به آنکه مشعل‌های متخلخل از نوع شعله پیش مخلوط هستند، در این دستگاه از یک پیش مخلوط‌کن استفاده می‌شود. این قطعه به گونه‌ای طراحی شده است که ابتدا هوای مصرفی از درون یک مجرای همگرا، وارد پیش‌مخلوط‌کن شده و سپس گاز به آن اضافه می‌شود. در این دستگاه آزمایشگاهی از یک کمپرسور 200 لیتری با قابلیت تحمل بیشینه‌ی فشار 10 بار بهره گرفته شده است. فشار طراحی روتامتر هوا برابر یک بار است. به همین دلیل یک تنظیم‌کننده‌ی فشار (یا رگلاتور) در مسیر بین کمپرسور و روتامتر هوا نصب شده تا بتواند فشار هوا را تا یک بار کاهش دهد. هوایی که توسط کمپرسور فشرده می‌شود 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 می‌شود. این رطوبت باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری روتامتر می‌شود. بنابراین یک رطوبت‌گیر بین رگلاتور و روتامتر نصب می‌شود.

۳- شبیه سازی عددی

۳-۱- هندسه و شرایط مرزی

شکل ۴ یک هندسه دو بعدی متقارن محوری را برای شبیه سازی احتراق در این مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد نشان می‌دهد. مطابق طرح آزمایشگاهی، اندازه شعاع ورودی سوخت و هوا برابر 45 mm می‌باشد. طول کل محفظه برابر 128 mm می‌باشد که محیط متخلخل به ضخامت 22 mm در فاصله 40 mm ای از ورودی مخلوط قرار دارد. طول محفظه بعد از محیط متخلخل 60 mm است.



شکل ۴. هندسه مورد استفاده در مدل سازی عددی

سرعت ورودی مخلوط متان و هوا 4 cm/s و نسبت هم ارزی 0.9 می باشد. دمای ورودی 300 K و مقدار شدت آشفستگی 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 شدند.

۳-۲- 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:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j}] - \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C U_j T)_f = \frac{\partial}{\partial x_j}(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \varepsilon \sum_{k=1}^{NS} \dot{\omega}_k h_k W_k + u_i (\tau_{ij})_{eff}) + S_h \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho D_{km} \frac{\partial}{\partial x_j} Y_k) + \dot{\omega}_k W_k \quad (5)$$

$$\rho = \frac{p \bar{W}}{RT} \quad (6)$$

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 آشفستگی 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 [۸]:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_i = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u_i}{d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho |V| u_i}{d_p^3} \quad (7)$$

که d_p قطر متوسط حفره می باشد که عبارت است از [۸]:

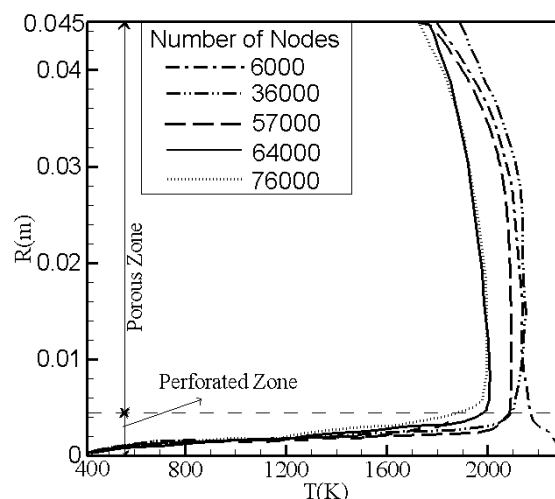
$$d_p \text{ (cm)} = \frac{\sqrt{4\varepsilon/\Pi}}{\lambda} \quad (8)$$

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 [۹] استفاده شده است.

۳-۳- الگوریتم حل، معیار همگرایی و استقلال حل از شبکه

مدل سازی ها با بسته نرم افزاری انسیس فلوئنت ۱۳ و روش حجم محدود انجام شده است. در این مدل سازی از مکانیزم چند مرحله ای GRI3 کاهش یافته استفاده شده است که شامل ۱۶ جزء می باشد. در این شبیه سازی فاز جامد و گاز را در تعادل دمایی فرض می کنیم. 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^۶ ۱۰ برای باقیمانده جملات معادله انرژی و ۱۰^{-۴} 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. حرکت گاز به صورت جریان آشفته در نظر گرفته شده است و از روش k-ε Realizable برای مدل سازی روابط توربولانس استفاده شده که با توجه به پیش آمیخته بودن جریان از روش شیمی با سرعت محدود استفاده شده است (Laminar Finite-rate).

برای مش بندی مدل از نرم افزار گمبیت با ساختار منظم چهار ضلعی استفاده شده است. به منظور یافتن تعداد سلول های مناسب شبکه برای شبیه سازی عددی، دما در خروجی قسمت شعله آزاد و خروجی محیط متخلخل در فاصله ۶۲mm ای برای تعداد سلول های متفاوت مقایسه شده است. شکل ۱ مقادیر دما در مقطع خروجی محیط متخلخل و شعله آزاد را در تعداد مش مختلف نشان می دهد. با توجه به شکل ۵ تعداد ۶۴۰۰۰ سلول مناسب به نظر می رسد.



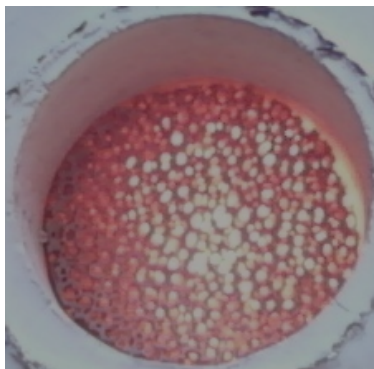
شکل ۵. مقادیر دمای سطح خروجی محیط متخلخل و شعله آزاد (از مرکز تا دیواره عایق) به ازای تعداد سلول های مختلف

⁸⁰Second-order upwind scheme(SOU)

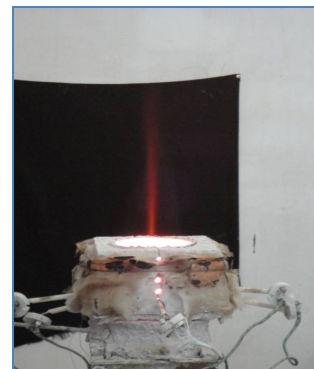
⁸¹SIMPLE

۴- نتایج

برای آزمون مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد و مشعل تمام متخلخل تستی‌هایی در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ با دبی هوا $9/1 \text{ m}^3/\text{hr}$ و دبی گاز $12/5 \text{ lit/min}$ ($FR = 1143 \text{ kW/m}^2$) برای هر دو مشعل در محیط متخلخل با چگالی حفره PPC ۸ انجام شده است. شکل ۶ نمایی از احتراق در این دو مشعل در شرایط ورودی ذکر شده نشان می‌دهد. آزمون‌ها در شرایط اتمسفریک انجام شده است. همانطور که از شکل ۶-الف مشخص است از قسمت سوراخ میانی محیط متخلخل که قبلاً در شکل ۲ نشان داده شد، شعله آزاد بیرون آمده است. باید توجه شود که در تمامی طول ناحیه قرمز رنگ در شکل ۶-الف شعله نداریم و بخشی از این طول فقط 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 ۶-ب احتراق مدفون در مشعل تمام متخلخل را نشان می‌دهد. دمای اندازه‌گیری شده در خروجی مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد و مشعل تمام متخلخل به ترتیب 1710 K و 1935 K می‌باشد. دمای اندازه‌گیری شده توسط ترمو کوپل T1 در خروجی مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد و مشعل تمام متخلخل به ترتیب 800 K و 960 K می‌باشد. که موقعیت شعله را در پایین ترین لایه محیط متخلخل تایید می‌کند.



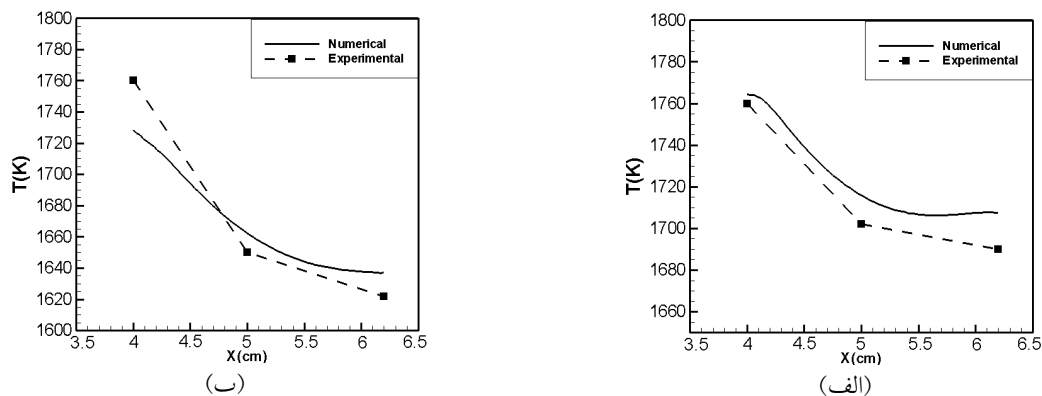
(ب)



(الف)

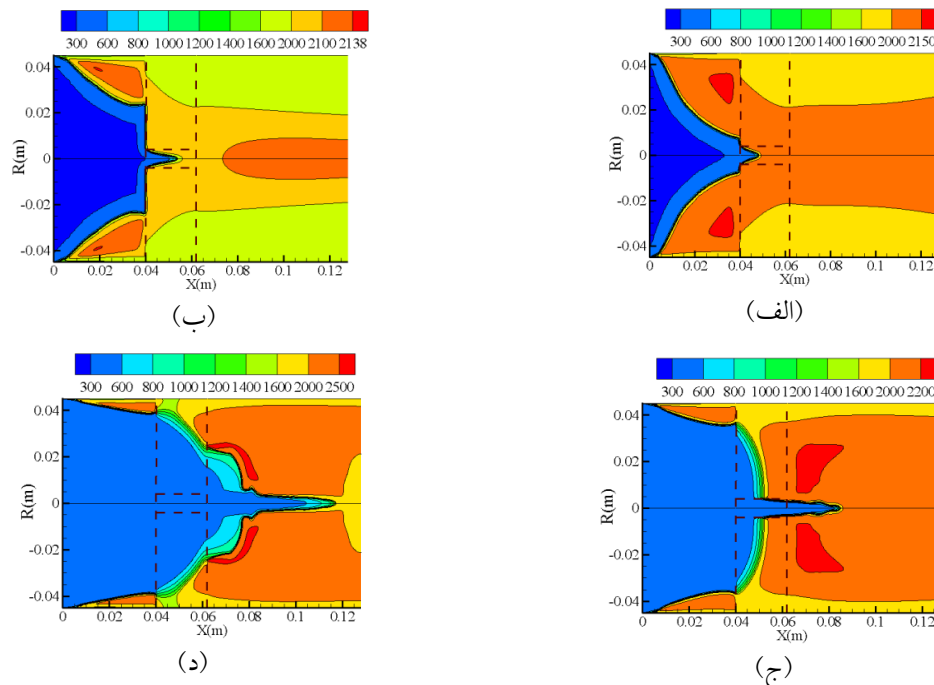
شکل ۶. نمایی از یک شعله پایدار در شرایط آزمایش (الف) مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد (ب) مشعل متخلخل

در شکل ۷ دماهای اندازه‌گیری شده در محیط متخلخل به همراه دماهای بدست آمده در نقاط مشابه در شبیه سازی عددی آمده است. از شکل ۷ مشخص است که شعله در قسمت زیرین محیط متخلخل پایدار شده است و ماکزیمم دما در محیط متخلخل حدود 1800 کلوین است. مشاهده می‌شود که دمای جانبی در محیط تمام متخلخل نسبت به محیط ترکیبی بالاتر است. یکی از دلایل این بالاتر بودن دما می‌تواند عبور جریان از قسمت سوراخ در محیط ترکیبی و انجام قسمتی از واکنش احتراقی بعد از محیط متخلخل و به شکل شعله آزاد باشد. در شکل ۷، از مقایسه دو منحنی دمای مربوط به تست تجربی و شبیه سازی عددی مشخص است که هر دو منحنی رفتار یکسانی برای دما نشان می‌دهند و بیشینه اختلاف بین این دو منحنی حدود ۲٪ است.



شکل ۷. مقایسه پروفیل دمای جانبی محیط متخلخل در مدل سازی عددی و تجربی در الف) مشعل تمام متخلخل و ب) مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد

برای انجام مقایسه‌ای بین دو مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد و مشعل تمام متخلخل با حفظ تمام پارامترهای موجود در شبیه سازی به طور مشابه برای دو محیط ترکیبی و محیط تمام متخلخل آزمون‌هایی صورت گرفته است. شکل ۸ خطوط هم‌دما در مشعل ترکیبی را نشان می‌دهد. از شکل ۸-الف مشاهده می‌شود که با سرعت ورودی 0.2 m/s ، برگشت کامل شعله به قبل از محیط متخلخل رخ می‌دهد. شعله پایدار در محیط متخلخل در سرعت 0.3 m/s (شکل ۸-ب) در پایین ترین لایه محیط متخلخل یعنی موقعیت $X=0.04 \text{ m}$ شکل می‌گیرد. با افزایش سرعت ورودی تا 0.5 m/s (شکل ۸-ج) شاهد تغییر مکان شعله به 0.052 m از ابتدای محفظه خواهیم بود. با افزایش بیشتر سرعت ورودی تا 0.6 m/s پرش شعله^۱ خواهیم داشت (شکل ۸-د).

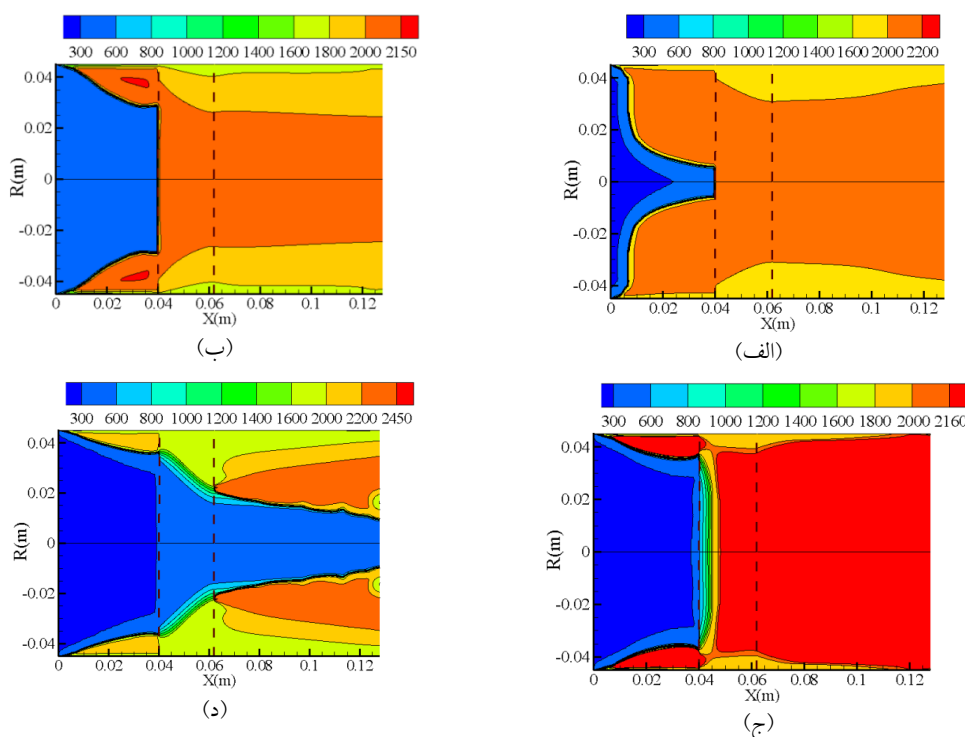


شکل ۸. خطوط هم دما بر حسب کلونین داخل محفظه احتراق مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد در سرعت‌های الف) 0.2 m/s

ب) 0.3 m/s ج) 0.5 m/s د) 0.6 m/s

^۱ blowoff

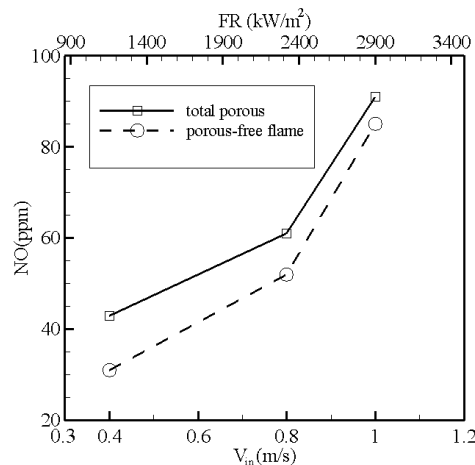
برای شبیه سازی احتراق در محیط تمام متخلخل در محفظه احتراق شکل ۲، قسمت مربوط به ناحیه شعله آزاد حذف و به جای آن محیط متخلخل قرار می گیرد. شکل ۹ خطوط هم دما را در مشعل تمام متخلخل نشان می دهد. مشاهده می شود که در مشعل تمام متخلخل به ازای سرعت ورودی 0.3 m/s برگشت شعله رخ می دهد (شکل ۹-الف) و شعله پایدار داخل محیط متخلخل عملاً از سرعت 0.4 m/s به بعد شکل می گیرد (شکل ۹-ب). به ازای سرعت 1 m/s مکان شعله عوض شده و در موقعیت 0.45 m از ابتدای محفظه قرار می گیرد (شکل ۹-ج). این میزان از نرخ ورودی جریان، بیشینه تحمل شعله پایدار در محیط متخلخل است و بعد از آن پرش شعله رخ می دهد (شکل ۹-د).



شکل ۹. خطوط هم دما بر حسب کلون داخل محفظه احتراق مشعل تمام متخلخل در سرعت های الف) 0.3 m/s ب) 0.4 m/s ج) 1 m/s د) 1.1 m/s

با مقایسه حداکثر توان حرارتی دو مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد و مشعل تمام متخلخل مشاهده می شود که به ازای چگالی حفره و شرایط مرزی یکسان بیشینه توان حرارتی در مشعل ترکیبی نسبت به مشعل تمام متخلخل افزایش می یابد. با توجه به شکل ۵-۶ بیشینه تحمل سرعت ورودی در مشعل ترکیبی 1.5 m/s ($FR=4355/2 \text{ kW/m}^2$) است در حالی که بیشینه تحمل سرعت ورودی در مشعل تمام متخلخل 1 m/s ($FR=2902/9 \text{ kW/m}^2$) است. این افزایش توان حرارتی در حدود $1452/3 \text{ kW/m}^2$ برای یک مشعل در فشار اتمسفریک می باشد.

شکل ۱۰ تولید آلاینده NO را در دو مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد و مشعل تمام متخلخل بر حسب سرعت مخلوط ورودی در نسبت هم آریزی 0.9 و چگالی حفره 8 ppc نشان می دهد. از شکل ۱۰ مشاهده می شود تولید آلاینده NO در مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد نسبت به مشعل تمام متخلخل بخصوص در سرعت های ورودی پایین تر، کمتر است. متوسط کاهش آلاینده NO در مشعل ترکیبی نسبت به مشعل تمام متخلخل حدود 20% است. از شکل ۱۰ دیده می شود که با افزایش سرعت مخلوط ورودی، تولید آلاینده NO حاصل از احتراق زیاد می شود. کاهش آلاینده NO در مشعل ترکیبی به علت کاهش دما در این مشعل نسبت به مشعل متخلخل می باشد که این کاهش دما در تست های تجربی نیز مشاهده شد.



شکل ۱۰. تولید آلاینده NO بر حسب سرعت مخلوط ورودی و نرخ آتش

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه دو مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد و مشعل تمام متخلخل مورد آزمون تجربی و شبیه سازی عددی قرار گرفت. محیط متخلخل که به شکل استوانه است به گونه ای در امتداد محور سوراخ شده است که ترکیبی از مشعل متخلخل و شعله آزاد را بوجود می آورد. در دو مشعل، شعله مدفون بوجود آمده و هیچ شعله سطحی مشاهده نشد. نتایج شبیه سازی عددی با داده های تجربی بدست آمده برای هر دو مشعل برای همین شرایط و هندسه مقایسه شد. نتایج، تطابق خوبی بین داده های تجربی و نتایج عددی را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که محدوده پایداری شعله در مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد به میزان ۳۰ درصد بیشتر از مشعل تمام متخلخل است. همچنین نتایج نشان می دهد که مشعل ترکیبی تولید آلاینده NO کمتری (حدود ۲۰ درصد) نسبت به مشعل تمام متخلخل دارد.

مراجع

- 1- Howell, J., Hall, M., Ellzey, L., "Combustion of Hydrocarbon Fuel within Porous Inert Media", Prog. Energy Combustion Sci., Vol. 22, PP. 121-145, 1996.
- 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- 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.
- 6- 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.
- 7- 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.
- 8- 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
- 9- S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Pub, New York, 1980.