

## مطالعه عددی و تجربی مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد و مقایسه آن با مشعل متخلخل

سید عبدالمهدی هاشمی<sup>۱\*</sup>، مجید نیکفر<sup>۲\*\*</sup> و مصطفی خسروی الحسینی<sup>۳\*\*\*</sup>

۱ و ۲- دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی

۳- پژوهشگاه صنعت نفت ایران

(دریافت: ۱۳۹۱/۱/۲۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۱۰/۱۱، پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۹)

احتراق پیش آمیخته در مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد و مشعل تمام متخلخل، در یک محفظه متقارن محوری به کمک شبیه سازی عددی مطالعه شده است. 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 به وجود می آورد. معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پیوستگی، تکانه، انرژی، گونه ها و حالت با استفاده از روش عددی حجم محدود حل شده اند. در این شبیه سازی از سینتیک چند مرحله ای کاهش یافته و مدل آشفتنگی  $k-\epsilon$  Realizable استفاده شده است. به منظور اعتبار سنجی نتایج عددی، نمونه ای آزمایشگاهی از این مشعل ساخته شده و مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج عددی و داده های تجربی مطابقت خوبی با هم دارند. نتایج برای هر دو نوع مشعل مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد که شعله در مشعل ترکیبی بازه پایداری بزرگ تری نسبت به مشعل متخلخل دارد. همچنین نتایج نشان می دهد مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد توان حرارتی را ۵۰ درصد افزایش و آلاینده NO را ۲۰ درصد کاهش می دهد.

کلیدواژگان: آزمون تجربی، شبیه سازی عددی، احتراق، مشعل ترکیبی، مشعل متخلخل

### مقدمه

نقش مهم محفظه های احتراق در صنعت، به خصوص در نیروگاه های تولید برق و توربین های گازی، توجه به افزایش راندمان و توان حرارتی و کاهش آلودگی این گونه ها را بیشتر روشن می سازد. یکی از راه های رسیدن به فناوری احتراق با توان حرارتی بالا استفاده از محیط متخلخل برای پایداری کردن احتراق شعله آزاد با توان حرارتی بالاست [۱]. از جمله برتری های مشعل های متخلخل نسبت به مشعل های معمولی می توان به بازده تابشی بالا، کم بودن آلودگی ناشی از NOx، سرعت شعله بالا، میزان بازه پذیری بار و دانسیته توان زیاد<sup>۱</sup>، کاهش حجم مشعل، افزایش محدوده شعله وری، توزیع یکنواخت حرارت و کاهش سروصدا اشاره کرد [۲، ۳].

یکی از تفاوت های میان احتراق در محیط متخلخل و احتراق با شعله آزاد، انتقال حرارت بهتر و مؤثرتر از گازهای سوخته به مخلوط ورودی است. در شعله های آزاد جریان مخلوط نسوخته با نزدیک شدن به ناحیه واکنش پیش گرم می شود. هنگامی که مواد نسوخته به ناحیه واکنش وارد می شوند، به دمای اشتعال رسیده و دمای مخلوط ناگهان افزایش می یابد. با توجه به این مطلب، احتراق شعله آزاد به خاطر پایین بودن ضریب هدایت حرارتی گاز دارای گرادیان شدید دماست. اجسام متخلخل ضریب

\* استادیار - نویسنده مخاطب (hashemi@kashanu.ac.ir)

\*\* کارشناس ارشد (me.nikfar@yahoo.com)

\*\*\* استادیار (mostafa.khosravy@kia.ac.ir)

۱. نسبت توان حرارتی تولیدی بر مساحت سطح مشعل

هدایت حرارتی بالاتری نسبت به گازها دارند. بنابراین، در حین احتراق، حرارت در خلاف جهت جریان از محصولات احتراق به مواد نسوخته سریع تر منتقل شده و باعث می شود تا دمای مخلوط نسوخته زودتر به دمای اشتعال برسد. در نتیجه طول منطقه احتراق افزایش می یابد. بزرگ تر شدن منطقه واکنش این امکان را فراهم می کند تا انتقال حرارت از جسم متخلخل بهتر صورت گیرد [۴]. همچنین پیش گرمایش مخلوط نسوخته افزایش پایداری احتراق را در پی دارد. تابش حرارتی و بالا بودن ضریب هدایت حرارتی محیط متخلخل، علاوه بر اینکه موجب افزایش انتقال حرارت از منطقه واکنش می شود، موجب کاهش دمای بیشینه شعله و کاهش انتشار  $NO_x$  می شود [۵].

در مشعل متخلخل، به دلیل بازگشت حرارت از ناحیه واکنش از طریق انتقال حرارت هدایت و تابشی جامد به جامد، ویژگی پایداری شعله در داخل یک محیط متخلخل با پایداری شعله آزاد متفاوت است. برای پایداری احتراق در داخل محیط متخلخل، باید میان بازگردش حرارت<sup>۱</sup>، حرارت آزاد شده و حرارت اتلافی تعادل ایجاد شود، به طوری که سرعت شعله و سرعت جریان یکسان شود. در محیط متخلخل وقتی سرعت جریان تغییر می کند، اگر این عمل، سرعت شعله را افزایش دهد، مکان شعله به گونه ای تغییر خواهد کرد که خود را با سرعت جریان تطبیق دهد و شعله در مکانی جدید پایدار می شود. به بیان دیگر، در نمودار سرعت شعله بر حسب مکان شعله، پایداری شعله می تواند در مکان هایی با گرادیان مثبت میسر شود [۳].

احتراق در محیط های متخلخل به طور جدی از دهه ۵۰ میلادی به بعد مورد توجه قرار گرفته است. ایجاد اغتشاش در جریان احتراقی، اختلاط بهتر سوخت و هوا و بهبود سازوکار احتراق در شعله های پیش مخلوط از اهداف اولیه به کارگیری محیط متخلخل در احتراق است. البته بعدها مزایای فراوان آن ها باعث شد تا تحقیقات وسیع تر و بیشتری در این زمینه انجام گیرد. دست [۶] از اولین کسانی است که در زمینه احتراق در محیط متخلخل تحقیق کرده است. وی به طور آزمایشگاهی پایداری و انتشار شعله را در یک محیط شنی با اندازه های متفاوت بررسی کرد و مدلی نیمه تجربی برای محاسبه سرعت شعله و تاثیر پیش گرمایش به وسیله هدایت حرارتی جامد ارائه کرد. هاول و همکاران [۲] مروری بر احتراق سوخت های هیدروکربنی در محیط های متخلخل ارائه داده اند. در این جمع آوری بعضی از خواص ترموفیزیکی محیط های متخلخل مانند ضریب هدایت حرارتی، راندمان تابشی، تابع فازی پراکندگی، ضریب انتقال حرارت و همچنین خواص سیال مانند سرعت و اغتشاش و مقایسه بین آن ها آورده شده است. ماتیس و الزی [۷] پایداری شعله، بازه کارکرد و میزان آلاینده ها را در مشعل متخلخل به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن ها نرخ آتش<sup>۲</sup> در حالت شعله پایدار را بین ۶۷۵ تا  $3951 \text{ kW/m}^2$  به دست آوردند. وگل و الزی [۸] پایداری شعله را در یک مشعل متخلخل دو قسمتی فلزی بررسی کردند. آن ها متوجه شدند که حد پایین و بالای سرعت در نزدیکی نسبت هم آرزوی ۱/۱ کمینه است. آودیک و همکاران [۹] به مطالعه تجربی احتراق در یک محیط متخلخل برای مصارف خانگی پرداخته اند. آن ها نشان دادند که استفاده از مشعل متخلخل می تواند توان حرارتی را تا ۸ برابر مشعل های معمولی افزایش داده و مقادیر  $CO$  و  $NO_x$  را کاهش دهد.

هاشمی و عطف [۱۰] شعله پایدار در داخل محیط متخلخل لایه ای از جنس فلزی را بررسی کردند. آن ها نتیجه گرفتند با افزایش ضخامت محیط دمای سطح کاهش و با افزایش دبی سوخت دمای سطح افزایش می یابد. هاشمی و همکاران [۱۱] در تحقیق دیگر به بررسی تجربی پایداری شعله در محیط متخلخل کاربرد سیلیسیم پرداخته اند. آن ها مشاهده کردند که شعله در دو ناحیه نزدیک سطح فوقانی و در نیمه پایین محیط متخلخل پایدار می شود. همچنین، افزایش نرخ آتش، محدوده پایداری شعله داخل محیط متخلخل را کاهش می دهد. همچنین، هاشمی و همکاران در تحقیقی دیگر [۱۲] به بررسی تجربی تأثیر نرخ آتش بر راندمان تابشی مشعل متخلخل سرامیکی پرداخته اند. نتایج آن ها نشان می دهد که بیشترین بازده تابشی در نسبت هم آرزوی ۰/۷۵ به دست می آید. حسین پور و همکاران [۱۳] مطالعه عددی بر روی احتراق پیش مخلوط هوا-متان در محیط متخلخل دوبعدی انجام دادند. در این مقاله، از چهار سینتیک شیمیایی چند مرحله ای متفاوت برای شبیه سازی واکنش های

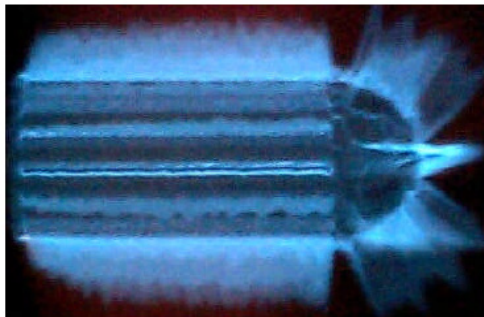
1. Heat recirculation  
2. Firing rate

شیمیایی و بررسی اثر آن‌ها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ضریب انتقال گرمای هدایت در پایین دست شعله، دمای گاز و ماده متخلخل در ناحیه احتراق کاهش می‌یابد و این کاهش دما موجب کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌شود. همچنین نتایج حاصل از پیش‌بینی چهار سینتیک شیمیایی مختلف با یکدیگر مطابقت دارند.

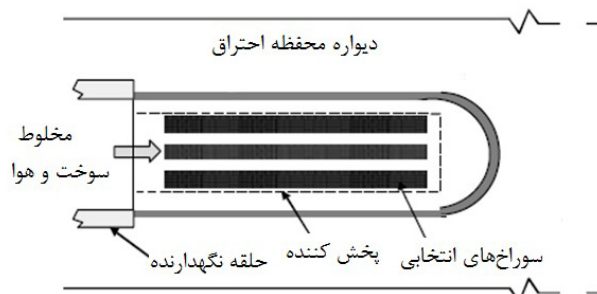
رجایی [۱۴] مشعل متخلخل را با فرض تعادل موضعی بین فاز سیال و جامد و با استفاده از یک واکنش عمومی تک‌قدمی به صورت عددی مدل کرده است. آن‌ها نشان دادند که سرعت شعله در محیط متخلخل ۶ برابر سرعت شعله آرام است. عبدالمجیبو و همکاران [۱۵] به گردآوری مطالب جامعی در مورد کاربردهای تکنولوژی احتراق در محیط متخلخل پرداخته‌اند. مالیکو و همکاران [۱۶] یک مشعل متخلخل را با تقارن محوری دوبعدی، که متصل به یک مبدل است، را مدل کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مقادیر محاسبه شده برای CO و NO به ترتیب کمتر و بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی است. از نتایج آن‌ها مشاهده می‌شود که دمای فاز گاز با دمای فاز جامد تفاوتی نداشته و هر دو منحنی دما تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند. برنر و همکاران [۱۷] به بررسی تجربی و عددی پایداری احتراق در محیط متخلخل پرداخته‌اند. مدل‌سازی عددی آن‌ها با فرض تعادل دمایی بین فاز گاز و جامد انجام شده است. مطابقت خوبی بین نتایج عددی و تجربی ملاحظه می‌شود. ماتيو و الزی [۱۸] به بررسی محدوده پایداری شعله در محیط متخلخل پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش نسبت هم‌ارزی (و افزایش هم‌زمان سرعت شعله)، محدوده‌های پایداری شعله برای پروپان و متان افزایش می‌یابد. بیشینه توان حرارتی به دست آمده در تحقیق آن‌ها  $5000 \text{ kW/m}^2$  است. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش سرعت ورودی، شعله به سطح خروجی نزدیک شده و دمای خروجی افزایش می‌یابد.

ماریاش و همکاران [۱۹] به بررسی عددی و تجربی احتراق در محیط متخلخل در یک مشعل با ابعاد کوچک پرداخته‌اند. آن‌ها در مدل عددی خود از فرض تعادل حرارتی بین فاز جامد و گاز استفاده کرده و مشاهده کردند که نتایج عددی و تجربی تطابق خوبی با هم دارند. همچنین، آن‌ها مشاهده کردند که در تمامی حالات بیشینه تولید  $\text{NO}_x$  کمتر از  $30 \text{ ppm}$  است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که کمترین نسبت اتلاف حرارت در بیشترین نرخ مخلوط ورودی به دست می‌آید. بیدی و همکاران [۲۰] به بررسی عددی پایداری شعله و بهینه‌سازی مشعل از نظر تولید انرژی پرداخته‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که شعله بیشتر در نیمه بالادست محیط متخلخل پایدار می‌شود و تولید آلاینده‌گی در این حالت کمتر از وقتی است که شعله در نیمه پایین دست جریان پایدار می‌شود.

تنها پروژه انجام شده در ارتباط با ایده مطرح شده در این تحقیق، مطالعه‌ای در مورد ساخت یک نمونه مشعل صنعتی است که جزئیات و فناوری آن آشکارسازی نشده است. این تحقیق کاربردی مربوط به شرکت آمریکایی آلزتا است که توسط ویکلی و همکاران [۲۱] و گرین برگ و مک دوگال [۲۲] انجام شده است. مشعل مورد بررسی آن‌ها در شکل ۱ آمده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱- الف) طرحواره و ب) نمونه احتراق در مشعل نانو استار [۲۲،۲۱]

مخلوط سوخت و هوا از سمت چپ مشعل نشان داده شده در شکل ۱-الف وارد مشعل می‌شود و بعد از عبور از سوراخ‌های پخش‌کننده جریان، در محیط متخلخل و منافذ تعبیه‌شده روی آن محترق می‌شود که نمونه‌ای از احتراق در آن در شکل ۱-ب مشاهده می‌شود. تحقیق ارائه‌شده توسط این شرکت تا حد زیادی جنبه معرفی محصول را داشته و بررسی علمی بر روی پارامترهای مهم و اثرگذار روی احتراق در آن بیان نشده است. تنها پارامتر بررسی‌شده اثر فشار بر روی تولید آلاینده NO و CO است که به‌نوعی مشخص‌کننده کارکرد بسیار مناسب مشعل برای استفاده در توربین‌های گازی با فشار بالاست. در هر صورت آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش فشار NO<sub>x</sub> افزایش و CO کاهش می‌یابد.

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

با توجه به نیاز صنعت به احتراق‌هایی با توان بالا و تولید آلاینده‌ی کم، ایده استفاده از مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد مطرح و در این مطالعه احتراق در مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد مورد آزمون 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 پدید می‌آورد.

## وسایل آزمایش

شکل ۲ سیستم کلی دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. شکل ۲-الف پایه نگه‌دارنده‌ای که مشعل بر روی آن سوار می‌شود را نشان می‌دهد. در شکل ۲-ب طرحواره‌ای از کل سیستم آزمایش به همراه تجهیزات به کار رفته ارائه شده است. همان‌طور که از شکل ۲-ب مشخص است، هوای خروجی از کمپرسور، بعد از عبور از فشارسنج، رطوبت‌گیر و دبی‌سنج، وارد مخلوط‌کن سوخت و هوا می‌شود تا با سوخت گاز شهری در این قسمت مخلوط شود. سوخت و هوای خروجی از مخلوط‌کن بعد از عبور از پخش‌کننده و یکنواخت‌کننده به محیط متخلخل می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای پخش کردن مخلوط هوا و گاز ورودی، از یک پخش‌کننده<sup>۱</sup> چدنی استفاده شده است. وظیفه این پخش‌کننده، پخش مخلوط به‌طور یکسان و همگن در کل سطح مقطع ورودی به سرامیک (یا سطح مقطع مشعل) است.

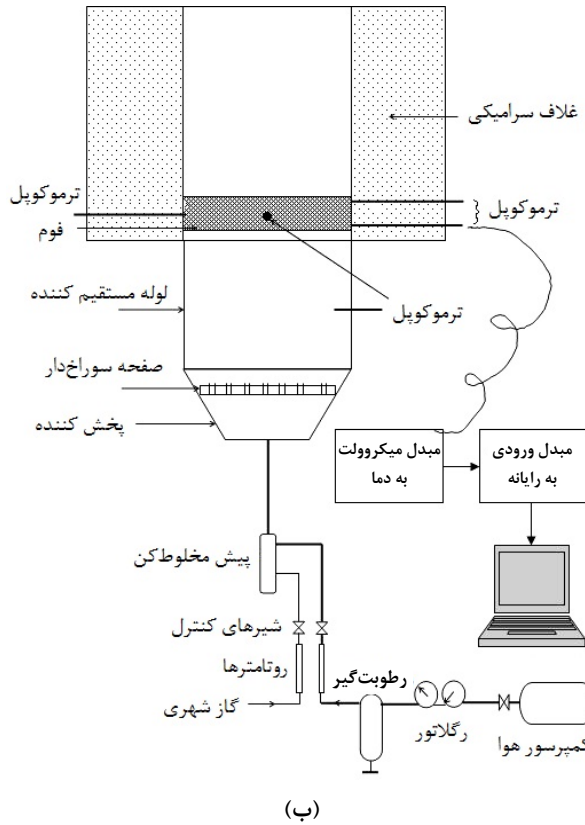
محیط متخلخلی که در این آزمایش استفاده می‌شود، از جنس فوم‌های سرامیکی SiC است. سرامیک به‌شکل استوانه‌ای به قطر ۹۰ mm (دارای مساحت ۶۴ cm<sup>2</sup>) و ارتفاع ۲۲ mm بوده و دارای تخلخل ۸۷ درصد و چگالی حفره ۸ ppc است. قطر سوراخ وسط محیط متخلخل ۹ mm است (شکل ۳).

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، برای هم‌محور نگه‌داشتن سرامیک در راستای عمودی و جلوگیری از ورود هوای ثانویه<sup>۲</sup> (مقدار هوایی که از هوای اطراف محیط متخلخل سرامیکی ممکن است به منطقه واکنش وارد شود) به منطقه واکنش، از یک محفظه سرامیکی نسوز استفاده شده است.

در این تحقیق، از ترموکوپل نوع B استفاده شده است. ترموکوپل‌ها به‌وسیله مبدل ورودی و منبع تغذیه به دستگاه رایانه متصل می‌شوند. محل قرارگیری ترموکوپل‌ها روی مشعل به‌صورت طرحواره در شکل ۵ نشان داده شده است. دمای ترموکوپل‌ها در هر ثانیه با استفاده از نرم‌افزار لب‌ویو<sup>۳</sup> اندازه‌گیری می‌شود. دمایی که به‌عنوان دمای محیط متخلخل اندازه‌گیری

1. Diffuser  
2. Secondary air  
3. Labview

می‌شود باید در حالت پایدار شعله خوانده شود. باید توجه داشت که سرعت گاز روی دیواره جامد تقریباً صفر است. پس می‌توان نتیجه گرفت دمایی که هر ترموکوپل احساس می‌کند بیشتر ناشی از تابش و هدایت حرارتی سرامیک است تا جابه‌جایی حرارتی گازهای اطراف ترموکوپل. لذا دمای احساس شده توسط ترموکوپل تقریباً برابر با دمای جانبی سرامیک است.



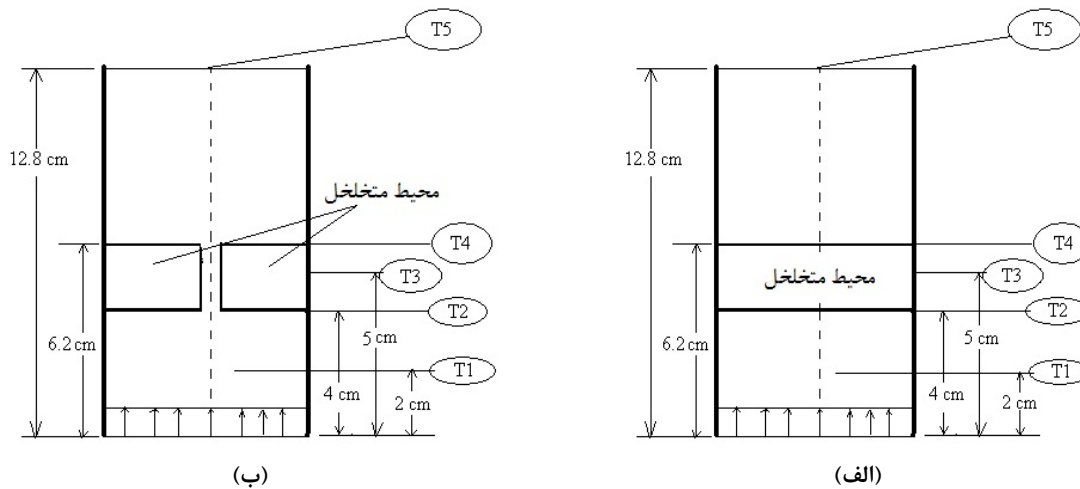
شکل ۲- الف) پایه نگهدارنده مشعل به همراه مخلوطکن سوخت و هوای طراحی شده ب) طرحواره دستگاه آزمایش



شکل ۳- محیط متخلخل سوراخ شده از جنس سرامیک SiC



شکل ۴- نگه‌دارنده سرامیکی



شکل ۵- محل قرارگیری ترموکوپل‌ها در مشعل، الف) مشعل تمام‌متخلخل، ب) مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد

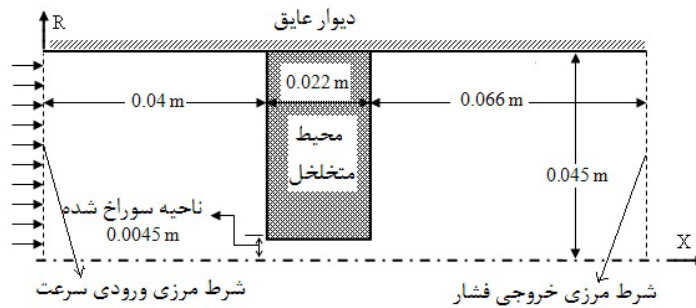
برای اندازه‌گیری دبی گاز و هوا از روتامتر استفاده شده است. مزیت استفاده از این وسیله نسبت به سایر وسایل اندازه‌گیری دبی جریان، در قیمت ارزان، نصب راحت و دقت مطلوب آن (۲ درصد خطا در بیشترین مقدار) است. در هر یک از مسیرهای جریان گاز و هوا یک روتامتر قرار داده شده است. روتامتر گاز دارای بازه کارکردی جریان بین ۰ تا ۱۶ لیتر بر دقیقه و فشار تفاضلی عملکرد در شرایط دمایی استاندارد (۲۵ درجه سلسیوس)، ۱۶ میلی‌لیتر آب معادل فشار شبکه گاز طبیعی بعد از رگلاتور است. روتامتر هوا بازه کارکردی دبی بین ۰/۵ تا ۱۰ مترمکعب بر ساعت دارد و فشار تفاضلی عملکرد آن در شرایط دمایی استاندارد برابر یک بار است. بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از شرکت گاز منطقه، چگالی گاز طبیعی ۰/۷۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب و ارزش حرارتی خالص آن ۸۴۰۰ کیلوکالری بر متر مکعب بوده و ۸۹ درصد آن را متان تشکیل می‌دهد. با توجه به آنکه مشعل‌های متخلخل از نوع شعله پیش‌مخلوط‌اند، در این دستگاه از یک پیش‌مخلوط‌کن استفاده می‌شود. این قطعه به‌گونه‌ای 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 ۲۰۰ لیتری با قابلیت تحمل بیشینه فشار ۱۰ بار بهره گرفته شده است. فشار طراحی روتامتر هوا برابر یک بار است. به همین دلیل، یک تنظیم‌کننده فشار (یا رگلاتور) در مسیر بین کمپرسور و روتامتر هوا نصب شده تا بتواند فشار هوا را تا یک بار کاهش دهد. همچنین، از یک رطوبت‌گیر بین رگلاتور و روتامتر استفاده شده است.

### ۳- شبیه‌سازی عددی

#### ۳-۱- هندسه و شرایط مرزی

شکل ۶ یک هندسه دوبعدی متقارن محوری را برای شبیه‌سازی احتراق در این مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد نشان می‌دهد. مطابق طرح آزمایشگاهی، اندازه شعاع ورودی سوخت و هوا برابر ۴۵mm است. طول کل محفظه برابر ۱۲۸mm است که محیط متخلخل به ضخامت ۲۲mm در فاصله ۴۰mm از ورودی مخلوط قرار دارد. طول محفظه بعد از محیط متخلخل ۶۰mm است.

سرعت ورودی مخلوط متان و هوا ۴۰ cm/s و نسبت هم‌ارزی ۰/۹ است. دمای ورودی ۳۰۰K و مقدار شدت آشفستگی ورودی ۵ درصد در نظر گرفته شده است. جریان در فشار ۱bar محفظه را ترک می‌کند. دیواره‌ها عایق‌اند و ضریب صدور دیواره‌ها برابر ۰/۷ در نظر گرفته شدند.



شکل ۶- هندسه مورد استفاده در مدل سازی عددی و شرایط مرزی

### ۳-۲- معادلات حاکم و فرضیات مدل

معادلات حاکم شامل پیوستگی، تکانه، 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 [۵]:

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

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

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

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

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

که در آن  $\rho$  جرم مخصوص است و از قانون گاز ایدئال به دست می آید. همچنین  $\mu$  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  $\varepsilon$  تخلخل محیط متخلخل اند. مقدار  $k_{eff}$  به صورت  $k+k_t$  تعریف می شود که در آن  $k$  ضریب هدایتی و  $k_t$  هدایت آشفته جریانی است.  $D_{km}$  ضریب نفوذ گونه  $k$  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. نرخ تولید گونه شیمیایی است. برای تعیین مقدار افت فشار در طول محیط متخلخل از رابطه زیر (رابطه ارگان) استفاده شده است [۲۳، ۲۴]:

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

که  $d_p$  قطر متوسط حفره است که عبارت است از [۲۴]:

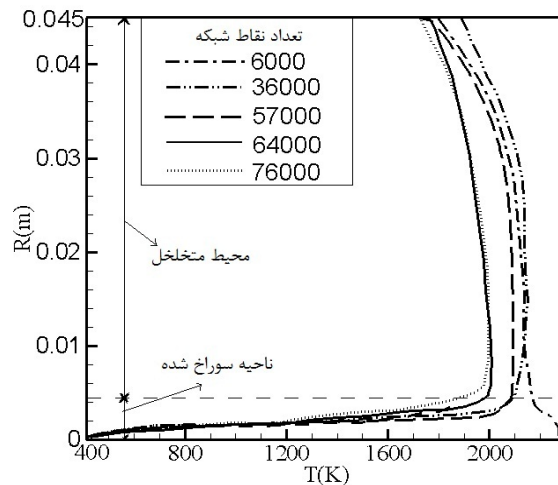
$$d_p (cm) = \sqrt{\frac{4\varepsilon}{\pi}} \lambda \quad (9)$$

که در آن  $\lambda$  چگالی حفره محیط متخلخل بر حسب حفره در سانتی متر (ppc) است. تمام جملات جابه جایی در معادلات بالا توسط طرح بالادست مرتبه دوم گسسته می شوند که دارای دقت مرتبه دو است. برای اصلاح ترم فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است.

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

مدل‌سازی‌ها با بسته نرم‌افزاری انسیس فلونت ۱۳<sup>۱</sup> و روش حجم محدود انجام شده است. در این تحقیق، به منظور مدل‌سازی احتراق از مدل انتقال گونه‌ها و مدل نرخ محدود آرام استفاده شده است. در این مدل، از مکانیزم چندمرحله‌ای GRI3 کاهش یافته استفاده شده است که شامل ۱۶ گونه است. معادلات برای همه گونه‌ها حل می‌شوند و زمان همگرایی حل حدود ۱۲۰ ساعت برای رایانه‌ای با رم ۴ گیگ، هارد ۱ گیگ و پردازنده دوهسته‌ای ۲/۴ هرتز است. در این شبیه‌سازی فاز جامد و گاز را در تعادل دمایی فرض می‌کنیم [۱۹، ۱۷]. برای گسسته‌سازی جملات معادلات از تقریب مرتبه دو بالادست<sup>۲</sup> و برای کوپل کردن جملات فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل<sup>۳</sup> [۲۵] استفاده شده است. حل‌کننده تفکیکی به صورت ضمنی به کار گرفته شده است. معیار همگرایی<sup>۴</sup>  $10^{-6}$  برای باقی‌مانده جملات معادله انرژی و  $10^{-4}$  برای سایر معادلات در نظر گرفته شده است. از روش جهات مجزا<sup>۴</sup> برای مدل‌سازی تابش استفاده شده است. ماده متخلخل به صورت همگن است. خواص فیزیکی و ترموفیزیکی محیط متخلخل مانند ضریب هدایت حرارتی یا قطر حفره‌ها ثابت‌اند. ماده متخلخل غیرکاتالیستی است. حرکت گاز به صورت جریان آشفته در نظر گرفته شده است و از روش Realizable k-ε برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شده است. نقطه شروع برای جرقه و حل از محدوده آغاز محیط متخلخل است.

برای شبکه‌بندی مدل از نرم‌افزار گمبیت<sup>۵</sup> با ساختار منظم چهارضلعی استفاده شده است. به منظور یافتن تعداد سلول‌های مناسب شبکه برای شبیه‌سازی عددی، دما در خروجی قسمت شعله آزاد و خروجی محیط متخلخل در  $X=62\text{mm}$  برای تعداد سلول‌های متفاوت مقایسه شده است. شکل ۷ مقادیر دما در مقطع خروجی محیط متخلخل و شعله آزاد را در تعداد گره‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ تعداد ۶۴۰۰۰ سلول مناسب به نظر می‌رسد.



شکل ۷- مقادیر دمای سطح خروجی محیط متخلخل و شعله آزاد (از مرکز تا دیواره عایق) به‌ازای تعداد سلول‌های مختلف

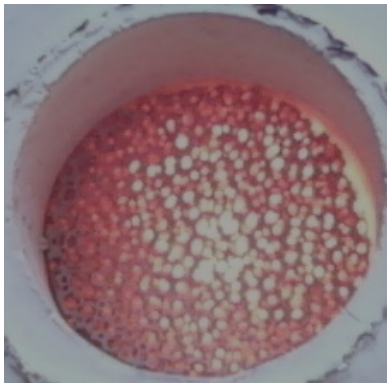
### ۴- نتایج

برای آزمون مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد و مشعل تمام‌متخلخل، آزمون‌هایی در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ با دبی هوای  $9/1 \text{ m}^3/\text{hr}$  و دبی گاز  $12/5 \text{ lit}/\text{min}$  (نرخ آتش  $1143 \text{ kW}/\text{m}^2$ ) برای هر دو مشعل در محیط متخلخل با چگالی حفره  $8 \text{ ppc}$

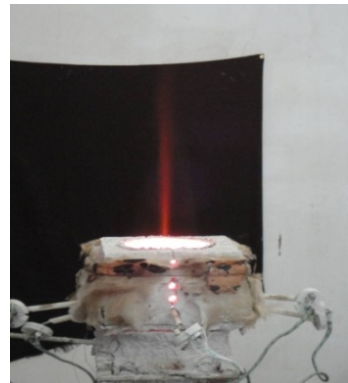
1. Ansys-Fluent v13
2. Second-order upwind scheme
3. SIMPLE
4. Discrete ordinate
5. Gambit



انجام شده است. دمای هوای آزمایشگاه و مخلوط ورودی به مشعل حدود ۲۷ درجه سانتی گراد است. شکل ۸ احتراق در این دو مشعل را در شرایط ورودی ذکر شده نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۸-الف مشخص است، از قسمت سوراخ میانی محیط متخلخل، که قبلاً در شکل ۳ نشان داده شد، شعله آزاد بیرون آمده است. باید توجه شود که در تمامی طول ناحیه روشن در شکل ۸-الف شعله وجود ندارد و بخشی از این طول فقط مربوط به درخشش محصولات داغ احتراق است. شکل ۸-ب احتراق مدفون در مشعل تمام‌متخلخل را نشان می‌دهد. دمای اندازه‌گیری‌شده در خروجی مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد و مشعل تمام‌متخلخل (T5) به ترتیب ۱۷۱۰ K و ۱۹۳۵ K است. دمای اندازه‌گیری‌شده توسط ترموکوپل T1 (شکل ۵ مشاهده شود) در زیر محیط متخلخل در مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد و مشعل تمام‌متخلخل به ترتیب ۸۰۰ K و ۹۶۰ K است که موقعیت شعله را در پایین‌ترین لایه محیط متخلخل تایید می‌کند.



(ب)

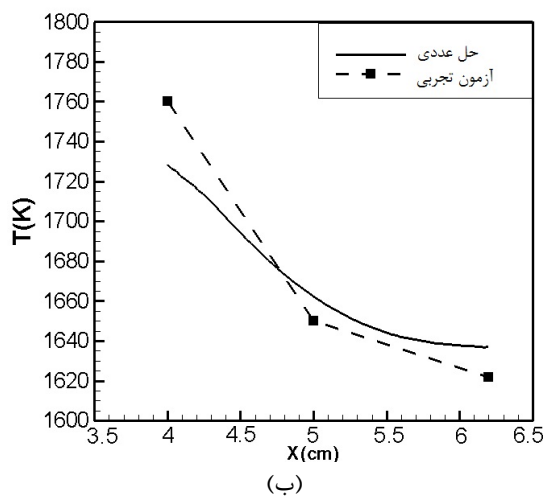


(الف)

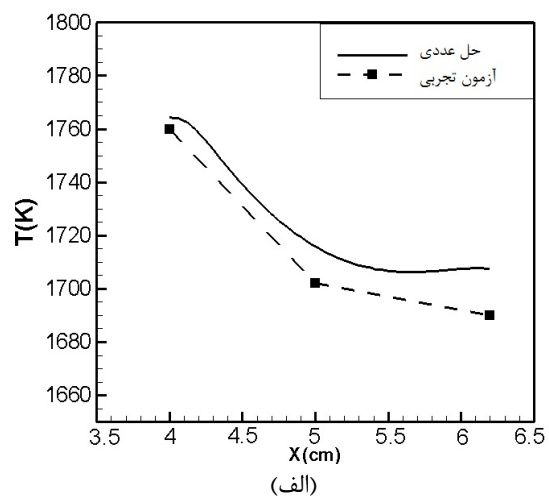
شکل ۸- نمایی از یک شعله پایدار در شرایط آزمایش، الف) مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد، ب) مشعل متخلخل

#### ۴-۱- اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی

در شکل ۹، دماهای اندازه‌گیری‌شده در امتداد محیط متخلخل به همراه دماهای به‌دست آمده در نقاط مشابه در شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است.



(ب)



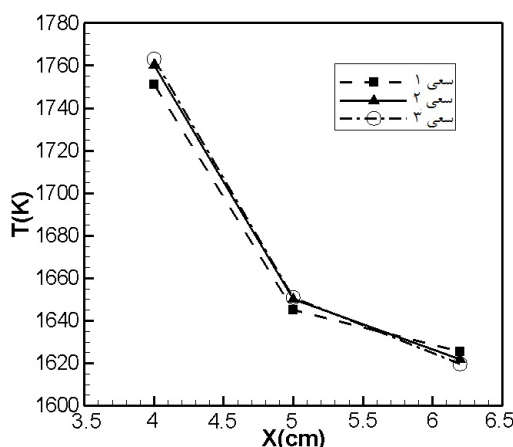
(الف)

شکل ۹- مقایسه نیم‌رخ دمای جانبی محیط متخلخل در مدل‌سازی عددی و تجربی در الف) مشعل تمام‌متخلخل و ب) مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد

از شکل ۹ مشخص است که شعله در قسمت زیرین محیط متخلخل پایدار شده است و بیشینه دما در محیط متخلخل حدود ۱۸۰۰ کلوین است. در شکل ۹، از مقایسه دو منحنی دمای مربوط به آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی مشخص است که هر دو منحنی رفتار یکسانی برای دما نشان می‌دهند و بیشینه اختلاف بین این دو منحنی حدود ۲ درصد است.

#### ۲-۴- تکرارپذیری

برای نشان دادن میزان دقت و صحت داده‌های حاصل از نتایج آزمایشگاهی، آزمون مربوط به محیط متخلخل ترکیبی سه بار تکرار شده است. نتایج این آزمون که در نرخ آتش  $1143 \text{ kW/m}^2$  و نسبت هم‌ارزی  $0.9$  انجام شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این شکل نیم‌رخ<sup>۱</sup> دمای جانبی مشعل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰، نیم‌رخ‌های دمای محوری در سه تکرار نسبت به یکدیگر اختلاف چندانی ندارند. بنابراین، می‌توان گفت آزمایش‌ها از دقت خوبی به لحاظ تکرارپذیری برخوردارند.



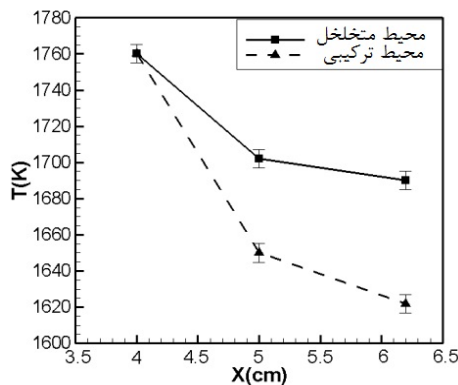
شکل ۱۰- نمودار دمای جانبی مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد در سه تکرار

#### ۳-۴- تحلیل خطا

یکی از روش‌های دقیق در برآورد عدم قطعیت نتایج تجربی روشی است که توسط کلین و مک کلینتوک [۲۶] ارائه شده است. این روش توسط محققان دیگر (هولمن [۲۷]) نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در روش مورد نظر میزان عدم قطعیت یک کمیت وابسته از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$W_R = \left( \sum \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} \times w_i \right)^2 \right)^{0.5} \quad (10)$$

در رابطه بالا،  $W_R$  عدم قطعیت کمیت وابسته مورد نظر  $R$  و  $w_i$  عدم قطعیت کمیت مستقل  $X_i$  است. خطاهای موجود در یک فرایند آزمایشگاهی عبارت‌اند از: خطای موجود در وسایل اندازه‌گیری، خطای اندازه‌گیری که معمولاً ناشی از عدم دقت پژوهش‌گر است و خطای موجود در محاسبات. خطای اندازه‌گیری در روتامترها حداکثر ۲ درصد در مقیاس کامل است و خطای اندازه‌گیری ترموکوپل‌ها شامل ۵ کلوین خطای کالیبراسیون و ۳/۵ کلوین خطای اندازه‌گیری است. با توجه به ساده بودن معادلات به کاررفته و کم بودن حجم محاسبات میزان خطای ناشی از گرد کردن و عملیات محاسباتی در آزمون‌های تجربی بسیار اندک و قابل صرف نظر است. عدم قطعیت دما پس از ساده‌سازی رابطه (۱۰) در شکل ۱۱ روی منحنی‌های دما نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دامنه خطای دما نسبت به مرتبه دما اندک بوده و نتایج از دقت مطلوبی برخوردارند.



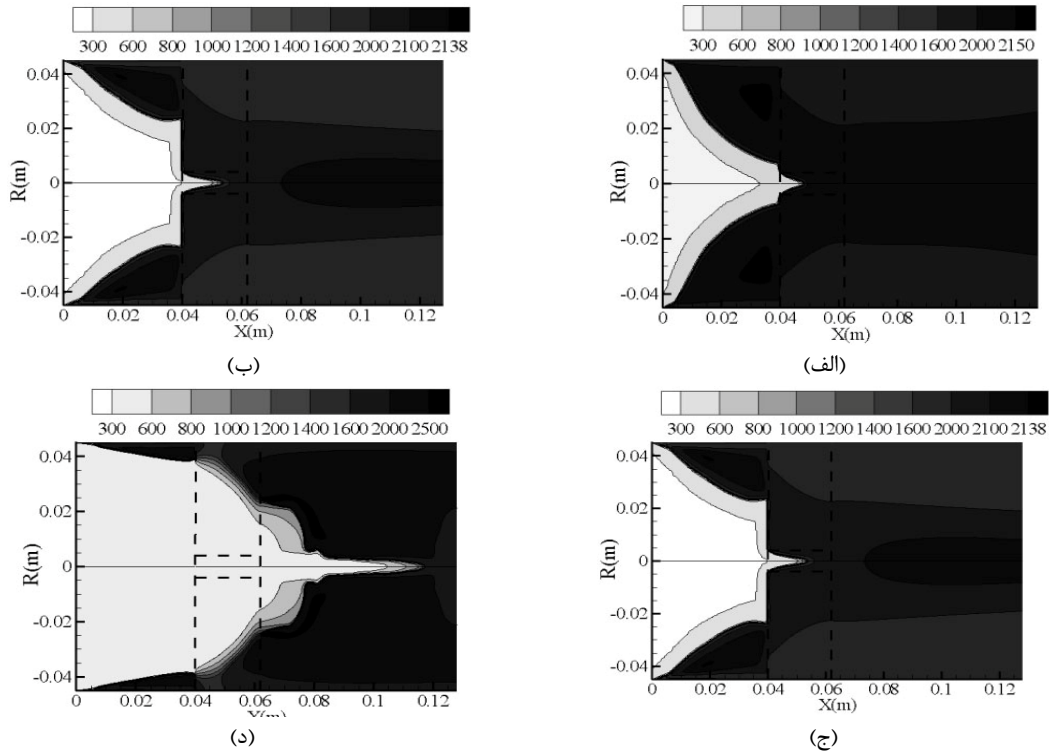
شکل ۱۱- دمای جانبی محیط متخلخل در مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد و مشعل تماممتخلخل

#### ۴-۴- مقایسه دو مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد و تماممتخلخل

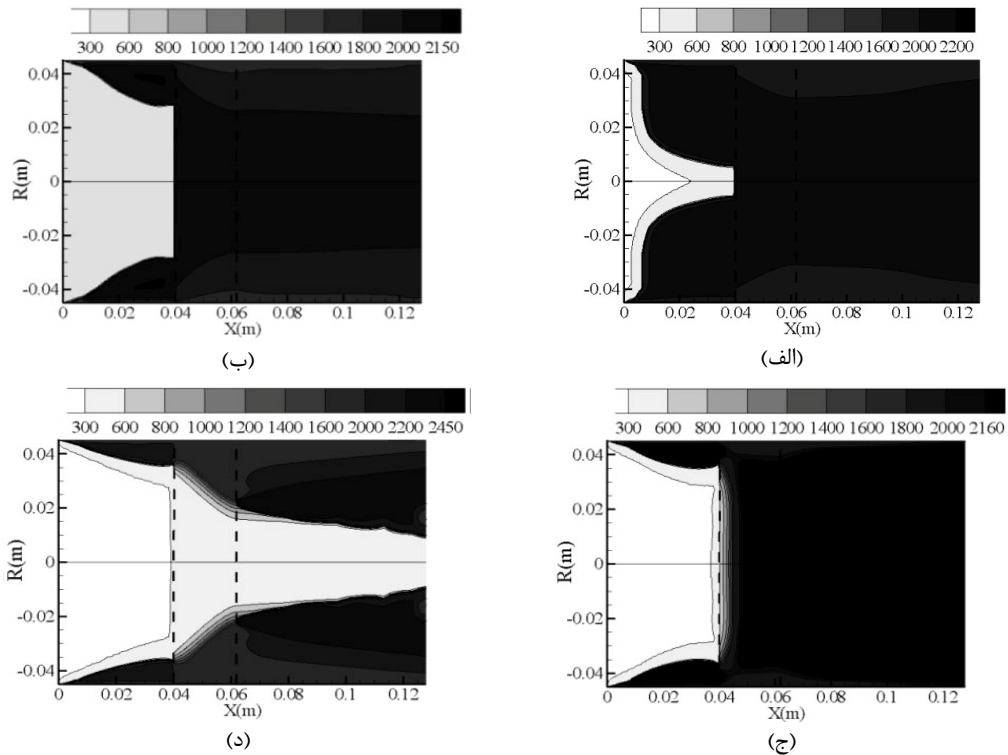
برای انجام مقایسه‌ای بین دو مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد و مشعل تماممتخلخل، با در نظر گرفتن پارامترهای یکسان در شبیه‌سازی برای دو محیط ترکیبی و محیط تماممتخلخل آزمون‌هایی انجام شده است. شکل ۱۲ خطوط هم‌دما در مشعل ترکیبی را نشان می‌دهد. در این شکل خط‌چین‌ها محدوده محیط متخلخل و شعله آزاد را نشان می‌دهد. از شکل ۱۲-الف مشاهده می‌شود که با سرعت ورودی  $0.2 \text{ m/s}$ ، برگشت کامل شعله به قبل از محیط متخلخل رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، شعله در محدوده قبل از محیط متخلخل قرار می‌گیرد. شعله پایدار در محیط متخلخل در سرعت  $0.3 \text{ m/s}$  (شکل ۱۲-ب) در پایین‌ترین لایه محیط متخلخل یعنی موقعیت  $X=0.4 \text{ m}$  شکل می‌گیرد. با افزایش سرعت ورودی تا  $1/5 \text{ m/s}$  (شکل ۱۲-ج)، شاهد تغییر مکان شعله به  $0.52 \text{ m}$  از ابتدای محفظه خواهیم بود. با افزایش بیشتر سرعت ورودی تا  $1/6 \text{ m/s}$  پرش شعله<sup>۱</sup> خواهیم داشت (شکل ۱۲-د). منظور از پرش شعله مشاهده شروع سیر تدریجی حل به سمت جواب نهایی، که همان خاموشی شعله است، می‌باشد. در واقع، با اینکه مسئله به شکل دایم حل می‌شود، برای شرایطی که حل به خاموشی شعله همگرا می‌شود، از تعبیر «پرش شعله» استفاده شده است. در این حالت، حل عددی به یک جواب مشخص پایدار نمی‌شود و چنانچه پاسخ‌ها در مراحل مختلف حل ترسیم شوند، مشاهده می‌شود که جبهه شعله در حال حرکت است. چنانچه جبهه شعله در مقطعی پایدار باشد، در همان نقطه همگرایی حاصل خواهد شد و گرنه حرکت جبهه شعله بدون رسیدن به همگرایی ادامه خواهد یافت. این رفتار به عنوان پرش شعله در شبیه‌سازی عددی می‌تواند تلقی شود. مقایسه بین مدل‌سازی و نتایج تجربی این تلقی را تایید می‌کند. برگشت شعله نیز عیناً به همین صورت تعریف می‌شود با این تفاوت که حرکت جبهه شعله در فرایند حل در راستای مخالف است.

شکل ۱۳ نتایج شبیه‌سازی احتراق در محیط تماممتخلخل را نشان می‌دهد. این شکل خطوط هم‌دما را در مشعل تماممتخلخل نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در مشعل تماممتخلخل، به‌ازای سرعت ورودی  $0.3 \text{ m/s}$ ، برگشت شعله رخ می‌دهد (شکل ۱۳-الف) و شعله پایدار داخل محیط متخلخل عملاً از سرعت  $0.4 \text{ m/s}$  به بعد شکل می‌گیرد (شکل ۱۳-ب). به‌ازای سرعت  $1 \text{ m/s}$ ، مکان شعله عوض شده و در موقعیت  $0.45 \text{ m}$  از ابتدای محفظه قرار می‌گیرد (شکل ۱۳-ج). این میزان از نرخ ورودی جریان، بیشینه تحمل شعله پایدار در محیط متخلخل است و بعد از آن پرش شعله رخ می‌دهد (شکل ۱۳-د). رویت عددی پرش شعله از ملاحظه پاسخ‌های به‌دست آمده قبل از رسیدن به همگرایی حاصل می‌شود. در این حالت می‌توان روند حرکت شعله به بیرون و نهایتاً خاموشی آن را مشاهده کرد. این روند نتیجه عدم توازن بین جریان هیدرودینامیکی و احتراق مخلوط و غلبه سرعت جریان بر سرعت مخلوط است، که مشابه همان چیزی است که در واقع نیز به‌وقوع می‌پیوندد. طبیعتاً ادعایی در مورد مطابقت این پاسخ‌های میانی (مانند شکل ۱۳-د) با حل واقعی نمی‌توان داشت و این حل تنها نمایشی از مدل‌سازی حرکت شعله به بیرون است.

1. Blow off



شکل ۱۲- خطوط هم‌دما برحسب کل‌وین داخل محفظه احتراق مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد در سرعت‌های الف)  $0.2 \text{ m/s}$ ، ب)  $0.3 \text{ m/s}$ ، ج)  $0.5 \text{ m/s}$ ، د)  $0.6 \text{ m/s}$



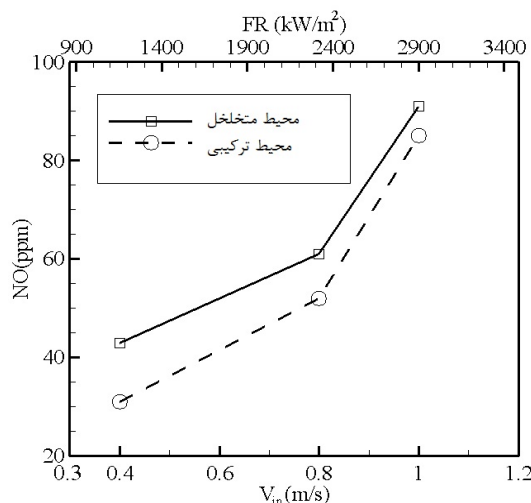
شکل ۱۳- خطوط هم‌دما برحسب کل‌وین داخل محفظه احتراق مشعل تمام‌متخلخل در سرعت‌های الف)  $0.3 \text{ m/s}$ ، ب)  $0.4 \text{ m/s}$ ، ج)  $1 \text{ m/s}$ ، د)  $1.1 \text{ m/s}$

از خطوط هم‌دمای هر دو مشعل (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت مخلوط ورودی محل جبهه شعله در محیط متخلخل به سمت پایین دست جریان جابه‌جا می‌شود. موقعیت جبهه شعله فقط در نیمه پایینی محیط متخلخل است. این مشاهده با نتایج دیگر محققان مطابقت دارد [۲۰]. شعله همواره به شکل شعله مدفون پایدار شده و در هیچ یک از دو مشعل شعله سطحی مشاهده نمی‌شود.

با توجه به نتایج تجربی (شکل ۱۱) و نتایج شبیه‌سازی عددی (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) مشاهده می‌شود که دمای جانبی در محیط تمام‌متخلخل 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. این امر موجب می‌شود که در مشعل ترکیبی دمای گازها بعد از محیط متخلخل بالاتر باشد.

از شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود که دمای مخلوط ورودی قبل از محیط متخلخل در مجاورت دیواره افزایش یافته است که علت آن احتراق مخلوط مجاور دیواره به دلیل دمای بالای دیواره در اثر تبادل حرارت تابشی با محیط متخلخل است. در یک نمونه مدل‌سازی عددی با خنک‌کاری دیواره مشاهده شد که شعله در این ناحیه تشکیل نمی‌شود. با مقایسه حداکثر توان حرارتی دو مشعل ترکیبی-متخلخل-شعله آزاد و مشعل تمام‌متخلخل مشاهده می‌شود که به‌ازای شرایط هندسی یکسان، حدود توان حرارتی در مشعل ترکیبی نسبت به مشعل تمام‌متخلخل افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۲، بیشینه تحمل سرعت ورودی برای تشکیل شعله پایدار در مشعل ترکیبی  $1/5 \text{ m/s}$  ( $FR=4355/2 \text{ kW/m}^2$ ) است، در حالی که مطابق شکل ۱۳ بیشینه تحمل سرعت ورودی برای تشکیل شعله پایدار در مشعل تمام‌متخلخل  $1 \text{ m/s}$  ( $FR=2902/9 \text{ kW/m}^2$ ) است. این افزایش توان حرارتی در حدود  $1452/3 \text{ kW/m}^2$  برای یک مشعل در فشار اتمسفریک است. این افزایش توان حرارتی در حدود ۵۰ درصد است. یکی از علل افزایش محدوده توان حرارتی در مشعل ترکیبی افت کمتر و امکان عبور جریان بیشتر در محل سوراخ است. کاهش افت فشار تنها علت افزایش توان حرارتی نیست؛ دلیل دیگر این است که لبه‌های شعله آزاد شکل‌گرفته توسط محیط متخلخل با دمای بالا به نوعی به سمت پایین کشیده می‌شود. همچنین، خود محیط متخلخل و احتراقی که در آن در حال انجام است به‌عنوان جرقه‌ای دایمی برای شعله آزاد عمل می‌کند. دلیل دیگر ایجاد مقدار زیادی رادیکال آزاد در قسمت احتراق در محیط متخلخل و برخورد این رادیکال‌ها با جریان ورودی نسوخته در قسمت شعله آزاد است. رادیکال‌های آزاد به‌علت واکنش‌پذیری بالا در احتراق نقشی مشابه جرقه ایفا می‌کنند و موجب پایداری شعله آزاد می‌شوند.

شکل ۱۴ تولید آلاینده NO را در خروجی محفظه احتراق (به‌صورت متوسط وزنی) برای دو مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد و مشعل تمام‌متخلخل برحسب سرعت مخلوط ورودی در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و چگالی حفره ۸ ppc نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- تولید آلاینده NO برحسب سرعت مخلوط ورودی و نرخ آتش

از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود تولید آلاینده NO در مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد نسبت به مشعل تماممتخلخل، به‌ویژه در سرعت‌های ورودی پایین‌تر، کمتر است. متوسط کاهش آلاینده NO در مشعل ترکیبی نسبت به مشعل تماممتخلخل حدود ۲۰ درصد است. از شکل ۱۴ دیده می‌شود که با افزایش سرعت مخلوط ورودی، تولید آلاینده NO حاصل از احتراق زیاد می‌شود. کاهش آلاینده NO در مشعل ترکیبی به‌علت کاهش دما در این مشعل نسبت به مشعل متخلخل است که این کاهش دما در آزمون‌های تجربی نیز مشاهده شد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، دو مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد و مشعل تماممتخلخل مورد آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی قرار گرفت. محیط متخلخل، که به شکل استوانه است، به‌گونه‌ای در امتداد محور سوراخ شده است که ترکیبی از مشعل متخلخل و شعله آزاد را پدید می‌آورد. در دو مشعل، در محیط متخلخل، شعله مدفون به‌وجود آمده و هیچ شعله سطحی مشاهده نشد. نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی به‌دست آمده برای هر دو مشعل برای همین شرایط و هندسه مقایسه شد. نتایج تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج عددی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت مخلوط ورودی جبهه شعله به‌سمت خروج از محیط متخلخل پیش‌روی می‌کند. جابه‌جایی و حضور جبهه شعله فقط در نیمه بالادست جریان (نیمه پایینی محیط متخلخل) است. از نتایج مشاهده می‌شود که حد بالا و پایین پایداری شعله در مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد به‌ترتیب به میزان ۵۰ و ۲۵ درصد بیشتر از مشعل تماممتخلخل است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که مشعل ترکیبی تولید آلاینده NO کمتری (حدود ۲۰ درصد) نسبت به مشعل تماممتخلخل دارد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان لازم می‌دانند از پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان برای حمایت از این تحقیق تشکر و قدردانی نمایند.

## منابع

1. C. E. Baukal, *Industrial Burners handbook*, CRC Press, Taylor & Francis, Section 11-13, 2003.
2. J. Howell, M. Hall and L. Ellzey, "Combustion of Hydrocarbon Fuel within Porous Inert Media," *Prog. Energy Combustion Sci.*, 22, pp. 121-145, 1996.
3. S. Wood and A. T. Harris, "Porous Burners for Lean Burn Applications," *Prog. Energ. Combust. Sci.*, 34, 2008, pp. 667-684.
4. M. Abdul Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. Abu Bakar, A. A. Mohamad, R. M. N. Muhad and M. K. Abdullah, "Combustion in Porous Media and its Applications- A Comprehensive Survey," *J. Env. Man.*, 90, 2009, pp. 2278-2312.
5. K. Vafai, *Handbook of Porous Media*, Ed. 2, CRC Press Taylor & Francis Group, United States of America, 2005.
6. G. De. Soete, "Stability and Propagation of Combustion Wave in Porous Media," *The Eleventh Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, University of California, Berkeley, California, 1966, pp. 959-966.
7. W. Mathis, Jr. and J. L. Ellzey, "Flame Stabilization, Operating Range, and Emissions for a Methane/Air Porous Burner," *Combust. Sci. And Tech.*, 175, 2003, pp. 825-839.
8. B. J. Vogel and J. L. Ellzey, "Subadiabatic and Super Adiabatic Performance of a Two-Section Porous Burner," *Combust. Sci. and Tech.*, 177, 2005, pp. 1323-1338.
9. F. Avdic, M. Adzic and F. Durst, "Small Scale Porous Medium Combustion System for Heat Production in Households," *Appl. Energy*, 87, 2010, pp. 2148-2155.
10. S. A. Hashemi and H. Atoof, "An Experimental Study of the Effect of Thickness and Porosity on the Performance of a Porous Metal Radiation Burner," *Fuel and Combustion*, 2, No. 2, Fall 2009-Winter 2010, pp. 11-23, (in Farsi).
11. S. A. Hashemi, J. Amani and H. Atoof, "Experimental Study of Flame Stability in SiC Porous Media," *Amirkabir Journal of Science and Technology, Mechanical Engineering*, 43, No. 1, 2011, pp.59-70, (in Farsi).
12. S. A. Hashemi, M. Nikfar and R. Ashrafi, "Experimental Study of Firing Rate on Radiation Efficiency of Ceramichal Porous Burner," *Fourth Combustion Conference of Iran*, University of Kashan, Kashan, Iran, Februsry 2012, (in Farsi).
13. S. Hossainpour and N. Moallemi Khiavi, "Two-Dimensional Numerical Simulation of Combustion in Porous Burners using for Multi-steps Kinetics Mechanisms," *Fuel and Combustion*, 3, No 1, 2010, pp. 63-74, (in Farsi).

14. M. R. Rajaiee, "Two-Dimensional Simulation of Premixed Gases Combustion in Porous Media using Numerical Methods," MSc Thesis, 2003, (in Farsi).
15. M. Abdul Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. Abu Bakar, A. A. Mohamad and M. K. Abdullah, "A Review of Investigation on Liquid Fuel Combustion in Porous inert Media," *Progress in Energy and Combustion Science*, 35, 2009, pp. 216-230.
16. M. Abdul Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. Abu Bakar, A. A. Mohamad and M. K. Abdullah, "Application of Porous Media Combustion Technology-Areview," *Applied Energy*, 86, 2009, pp. 1365-1375.
17. M. Abdul Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. Abu Bakar, A. A. Mohamad, R. M. N. Muhad and M. K. Abdullah, "Combustion in Porous Media and its Applications- A Comprehensive Survey," *Journal of Environmental Management*, 90, 2009, pp. 2287-2312.
18. I. Malico, X. Y. Zhou and J. C. F. Pereira, "Two-Dimensional Numerical study of Combustion and Pollutants Formation in Porous Media," *Combust. Sci. and Tech.*, 152, 2000, pp. 57-79.
19. G. Brenner, K. Pickenäcker, O. Pickenäcker, D. Trimis, K. Wawrzinek and T. Weber, "Numerical and Experimental Investigation of Matrix-Stabilized Methane/Air Combustion in Porous Inert Media," *Combust. Flame*, 123, 2000, pp. 201-213.
20. T. Smucker Matthew and J. L. Ellzey, "Computational and Experimental Study of A two-Section Porous Burner," *Combust. Sci. and Tech.*, 176, 2004, pp.1171-1189.
21. Timothy L. Marbach, "Vijaykant Sadasivuni and Ajay K. Agrawal, Investigation of a Miniature Combustor Using Porous Media Surface Stabilized Flame," *Combustion Science and Technology*, 179, 2007, pp. 1901-1922.
22. M. Bidi, M. R. H. Nobari and M. Saffar Aval, "A Numerical Evaluation of Combustion in Porous Media by EGM (Entropy Generation Minimization)," *Energy*, 35, 2010, pp. 3483-3500.
23. C. K. Weakley, S. J. Greenberg, R. M. Kendall and N. K. Mc Dougald, "Development of Surface-Stabilized Fuel Injectors With Sub-Three ppm NOx Emissions," *Proceedings of IJPGC '02 2002 Intern. Joint Power Generation Conf. Phoenix, AZ, USA, June 24-26, 2002*.
24. S. J. Greenberg and N. K. Mc Dougald, "Full-Scale Demonstration of Surface-Stabilized Fuel Injectors For Sub-Three PPM NOx Emissions," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2004 Power for Land, sea and Air, Austria, 2004*.
25. F. Macdonald, M. S. El-Sayed, K. Mow and F. A. L. Dullien, "Flow through Porous Media Ergun Equation Revisited," *Ind. Eng. Chem. Fund.*, 18, 1979, pp. 199-208.
26. D. J. Diamantis, E. Mastrakos, D. A. Goussis, "Simulation of Premixed Combustion in Porous Media," *Comb. Theory Model*, 6, 2002, pp. 383-411.
27. S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, John Wiley and Sons, New York 1984.
28. S. J. Kline and F. A. Mc Clintock, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mech. Eng.*, 75, No. 1, January 1953, pp. 3-8.
29. J. P. Holman, *Experimental Methods for Engineers*, Seventh Edition, New York, Mc Graw Hill, 2001.

## English Abstract

# A Numerical Investigation with Experimental Test of Combined Porous-Free Flame Burner and Its Comparison with a Porous Burner

S. A. M. Hashemi<sup>1</sup>, M. Nikfar<sup>2</sup> and M. Khosravianhosseini<sup>3</sup>

1, 2- Department of Mechanical Engineering and Energy Research Institute, University of Kashan, Kashan, Iran

3- Iran's oil Industry Research, Tehran, Iran

(Received: 2012.4.9, Received in revised form: 2013.1.1, Accepted: 2013.2.18)

Premixed combustion in a Combined Porous-Free Flame Burner (CPFFB) and a porous burner (PB) is numerically studied at a cylindrical axisymmetric combustion chamber. The cylindrical porous medium is perforated in the center line that a combination of porous burner and free flame is made. Governing equations of mass, momentum, energy and species mass fraction are solved using finite volume method. In this numerical simulation, a reduced multi-step combustion mechanism and realizable  $k-\epsilon$  turbulence model are used. To validate the numerical results, an experimental prototype of the burner was made and has been tested. The numerical results have a good agreement with the experimental data. The results are compared for both types of the burners. The results show that the flame in CPFFB is stable in a range greater than that of PB. The results show that the CPFFB has a higher thermal power about 50% and lower NO pollutant formation about 20% rather than an equivalent PB.

**Keywords:** Experimental test, Numerical simulation, Combustion, Combined burner, Porous medium