

بررسی عددی اثر پارامتر هندسی تخلخل در مشعل محیط متخلخل آمونیاک-متان

مهدی سپه وند^۱، سید عبدالمهدی هاشمی^{۲*}، علی عارف منش^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، Mehdispahvand97@grad.kashanu.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، Hashemi@kashanu.ac.ir

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، Arefmanesh@kashanu.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵)

چکیده: هدف از مطالعه حاضر بررسی اثر خواص هندسی تخلخل از جمله اثر تغییر چگالی حفره تخلخل در بازه $ppi=40-10$ ، درصد تخلخل $0/7$ و $0/9$ و اثر پیش گرم کردن هوا در بازه $500-300$ کلوین و سه نسبت هم ارزی مختلف $0/7$ ، 1 ، $1/1$ بر توزیع دما و پایداری مشعل محیط متخلخل در سوخت آمونیاک-متان است. بدین منظور از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت ۲۲ و یک سینتیک شیمیایی شامل ۶۹ گونه و ۳۸۹ واکنش استفاده شده است. با توجه به رابطه بین چگالی حفره و درصد تخلخل و ضریب انتقال حرارت حجمی اثر این دو پارامتر موجب تغییر ضریب انتقال حرارت حجمی می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش چگالی حفره تخلخل اختلاف دمای دو فاز گاز و جامد کاهش می‌یابد. در چگالی حفره تخلخل برابر $ppi=10$ بیشترین دمای گاز در خروجی مشاهده شد و اختلاف دمای حداکثری بین فاز گاز و جامد در این حالت حدود 590 کلوین است و با افزایش چگالی حفره تخلخل در $ppi=40$ ، کمترین دمای گاز در خروجی مشاهده شد و اختلاف دمای بین فاز گاز و جامد در این حالت حدود 243 کلوین است. با افزایش درصد تخلخل از $0/7$ به $0/9$ ، ضریب انتقال حرارت حجمی کاهش و حدود شعله‌وری و پایداری مشعل افزایش می‌یابد. در نهایت مشاهده شد که در نسبت هم ارزی ثابت، با افزایش دمای ورودی تا 500 کلوین جبهه شعله به سمت بالادست مشعل کشیده می‌شود. همچنین در دمای ورودی ثابت، با افزایش نسبت هم ارزی از $0/7$ به سمت $1/1$ پایداری افزایش و موقعیت شعله به سمت بالادست کشیده می‌شود.

کلیدواژگان: مشعل متخلخل، سوخت آمونیاک، پایداری شعله، تخلخل، نسبت هم ارزی

مقدمه

انرژی همواره یکی از موضوعات مهم بشر برای احتراق است که در این میان، سوخت‌های فسیلی و زغال‌سنگ از مهم‌ترین سوخت‌ها برای احتراق می‌باشند. افزایش جمعیت در جهان و فرآیندهای صنعتی و افزایش تقاضای مصرف انرژی با سوخت‌های هیدروکربنی، سبب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) می‌شوند این گازها باعث آلودگی محیط و مشکلات زیست‌محیطی و همچنین اکوسیستم را عمیقاً تحت تأثیر قرار می‌دهد که امروزه به یک چالش اساسی برای بشر تبدیل شده است. انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند گاز دی‌اکسید کربن (CO_2)، سبب افزایش گرمای جهانی شده است که همین گاز به‌تنهایی حدود 30% درصد در این امر نقش دارد [۱]. برای کاهش این گازها بشر به فکر استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر و زیست‌گازها افتاد. با این حال، استفاده از منابع تجدید پذیر نظیر باد، انرژی خورشیدی و جزر و مد، مسئله ذخیره انرژی، بخصوص ناکارآمدی و هزینه‌های ذخیره‌سازی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این جایگزین کردن آن در مشعل‌های سنتی دشوار است؛ بنابراین به دنبال سوخت دیگری برای جایگزین کردن سوخت‌های فسیلی معمولی اهمیت بسیار دارد [۱]. امروزه به‌منظور

کاهش انتشار کربن و رسیدن به هدف انتشار کربن صفر، استفاده از سوخت‌های جایگزین در سیستم‌های احتراقی بسیار ضروری است. به این منظور از هیدروژن به‌عنوان یکی از محبوب‌ترین سوخت‌ها به دلیل محتوای کربن صفر و عملکرد بالا استفاده می‌شود. جایگزین کردن سوخت‌ها با هیدروژن نه تنها می‌تواند اثرات سلامت و آلاینده‌گی را بهبود بخشد، بلکه می‌تواند منجر به کاهش آلاینده‌گی در تغییرات آب و هوایی شود؛ اما هیدروژن به‌طور طبیعی در طبیعت یافت نمی‌شود و باید طی یک سری فرایند خاص تولید شود، همچنین، یک مانع دیگر، تجهیزات پرهزینه برای ذخیره سوخت هیدروژن مایع و انتقال آن است که همین امر مانع کاربرد گسترده آن می‌شود [۱]. به همین منظور از آمونیاک (NH_3) به‌عنوان یک سوخت جایگزین جذاب که دارای ۱۷/۸ درصد هیدروژن است در احتراق استفاده می‌شود. از طرفی منابع متعدد تولید و سنتز آمونیاک در جهان وجود دارد که شامل گاز طبیعی با ۷۲ درصد، زغال‌سنگ با ۲۲ درصد، نفت کوره ۴ درصد نفتا ۱ درصد و سایر انرژی‌ها است. شایان‌ذکر است که تطبیق‌پذیری یا قابلیت تغییر این مولکول منجر به توزیع آن در مقیاس تجاری و جهانی شده است که بازاری بالغ بر ۱۸۰ میلیون تن سالانه در سراسر جهان تولید می‌شود که آن را به دومین ماده شیمیایی تجاری در جهان تبدیل کرده است [۲]. در مقایسه با سوخت‌های هیدروکربنی سنتی، آمونیاک دارای واکنش‌پذیری کم، زمان تأخیر اشتعال بالا، سرعت شعله کم و دامنه اشتعال‌پذیری پایین‌تری است لذا برای غلبه بر این چالش‌ها، تحقیقات زیادی توسط محققان انجام شده است. در حال حاضر سه روش شناخته‌شده برای بهبود واکنش‌پذیری آن‌ها وجود دارد. اولین راه، اضافه کردن سوخت‌های هیدروکربنی سنتی نظیر H_2 ، CO ، CH_4 ، DME ، گازوئیل، دیزل، سوخت‌های سنگین، گاز سنتز و ... است. دومین راه استفاده از فناوری احتراق اکسیژن غنی برای افزایش شدت احتراق و آخرین راه آن افزایش دمای اولیه احتراق است. امروزه پژوهش در مورد احتراق آمونیاک به‌صورت عددی و تحلیل سینتیک احتراق و هم به‌صورت تجربی در حال انجام است. اسموکرو الزی [۳]، نتایج آزمایشگاهی و عددی را برای یک مشعل دوقسمتی با مخلوط پروپان/هوا بررسی کردند. البته از مخلوط متان/هوا هم برای مقایسه استفاده شده است. اثر عوامل مختلف بر روی دمای محوری، شعاعی، افت فشار و انتشار آلودگی‌های به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. مدل عددی استفاده‌شده یک‌بعدی، در حالت گذرا با مکانیزم کامل برای پروپان با ۷۰ جزء و ۴۶۳ واکنش شیمیایی بود. اسموکرو و الزی با تغییر نسبت‌های هم ارزی برای متان و پروپان، محدوده پایداری شعله را به دست آوردند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش نسبت هم ارزی محدوده‌های پایداری شعله برای پروپان و متان افزایش می‌یابد. فرزانه و همکاران [۴]، احتراق متان/هوا را در یک مشعل متخلخل مخروطی بررسی کردند. معادلات ناویر استوکس، انرژی و بقای ذرات شیمیایی را در یک مدل دوبعدی متقارن به‌صورت عددی حل کردند. برای پیش‌بینی مقادیر CO و NO از یک مکانیزم پنج مرحله‌ای و هفت گونه‌ای استفاده شد. توزیع دمای فاز گاز، دمای فاز جامد و نسبت مولی ذرات در طول لایه متخلخل به دست آمد. تأثیر نسبت هوای اضافه بر توزیع دما و میزان آلاینده‌ها بررسی شد. هاشمی و هاشمی [۵]، یک مشعل متخلخل دولایه را به‌صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها احتراق متان - هوا را در یک مشعل دوبعدی شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی می‌تواند محدوده پایداری و دمای شعله را کنترل کند. آن‌ها همچنین دریافتند که بازده برگشتی هدایت، جابجایی و تابش با افزایش نسبت هم ارزی در محدوده کارکرد پایدار، کاهش می‌یابد. هاشمی و همکاران [۶] در پژوهشی اثر شرایط حرارتی دیواره، پیش‌گرمایش مخلوط سوخت و هوا در ورودی و چگالی منافذ محیط متخلخل را بر حدود پایداری و انتشار NO در مشعل محیط متخلخل-آزاد را به‌صورت تجربی و عددی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که میزان پایداری شعله با افزایش تراکم منافذ افزایش می‌یابد درحالی‌که بیشترین و کمترین میزان انتشار NO به ترتیب در تراکم منافذ ۸ ppc و ۱۶ ppc اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده شد که استفاده از شرایط دیواره عایق باعث می‌شود که Blow Off (پرش شعله) در سرعت ورودی بالاتر در مقایسه با شرایط دمای دیواره ثابت رخ دهد. از طرف دیگر، استفاده از شرایط دمای ثابت دیوار (دیوار خنک شده) باعث می‌شود که در سرعت ورودی پایین در مقایسه با دیواره عایق، Flash Back (برگشت شعله) ایجاد شود.

اولین کاربرد آمونیاک در سیستم‌های احتراق واقعی در سال ۱۹۴۵ توسط کراک منتشر شد [۷] که در جریان جنگ جهانی دوم، مخلوطی از آمونیاک و گاز زغال‌سنگ، به‌عنوان ابزاری برای جبران کمبود سوخت دیزل در موتور اتوبوس‌های غیرنظامی مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش موفقیت‌آمیز بود، اگرچه زمانی که جنگ به پایان رسید متوقف شد. اخیراً تحقیقات تجربی و عددی به این نتیجه رسیده‌اند که این چالش‌ها عمدتاً ناشی از سرعت شعله کم آمونیاک هستند که حدود ۵ برابر پایین‌تر از سرعت شعله متان است و برای حل این مشکلات، مخلوط‌های سوخت آمونیاک با ترکیبات دیگر مورد تحقیق قرار گرفته است. مورچ و همکاران [۸] احتراق آمونیاک-هیدروژن را در موتور اشتعال جرقه‌ای (SI) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که انتشار گازهای گلخانه‌ای بالاتر در درصد هیدروژن بیشتر در مخلوط و نسبت هوای اضافی از ۱/۱ تا ۱/۴ رخ می‌دهد، همچنین دریافتند که کاهش آلاینده‌ی پس از احتراق، می‌تواند حد خود را به آلاینده‌ی گازهای احتراق بنزین کاهش دهد و در نهایت به این نتیجه رسیدند که ترکیب گاز آمونیاک-هیدروژن جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی در موتورهای SI به لحاظ بهره‌وری و قدرت هستند. والرا-مدینا و همکاران [۹] احتراق ترکیبات سوخت آمونیاک-هیدروژن و آمونیاک-متان را در شعله چرخشی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که مخلوط‌های سوخت آمونیاک-هیدروژن محدود به باریک‌تری از نسبت هم‌ارزی که شعله پایدار است را ارائه می‌دهد و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناکس (NOx) می‌تواند به حداکثر مقادیر ۴۵۰۰ ppm برسد. برای مخلوط‌های سوخت آمونیاک-متان، پایداری شعله برای دامنه وسیع‌تری از نسبت‌های ارز به دست آمد، در حالی که انتشار گازهای گلخانه‌ای ناکس به حداکثر مقادیر ۲۶۰۰ ppm در نزدیکی حالت استوکیومتری رسید. کوراتا و همکاران [۱۰] احتراق آمونیاک خالص و آمونیاک-متان را در یک توربین گاز دومرحله‌ای بررسی نمودند. برای آمونیاک خالص، میزان انتشار ناکس کم‌تر از ۱۰۰۰ ppm بود. آن‌ها استدلال کردند که ایجاد نواحی غنی و ضعیف مجزا در داخل محفظه احتراق منجر به واکنش بین آمونیاک نسوخته و ناکس می‌شود که این امر انتشار کلی ناکس را کاهش می‌دهد. همچنین این امر منجر به غلظت بالای آمونیاک (در حدود ۱۵۰۰ ppm) در خروجی محفظه احتراق می‌شود. در مقابل احتراق سوخت آمونیاک-متان منجر به انتشار بسیار کم آمونیاک (در حدود ۳۰ ppm) ولی ناکس بیشتر می‌شود. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش غلظت آمونیاک تا ۰/۶ ناکس افزایش و بعداز آن کاهش می‌یابد. تیان و همکاران [۱۱] به صورت تجربی و عددی احتراق پیش مخلوط آمونیاک/متان/اکسیژن/آرگون را بررسی نمودند و در این تحلیل یک سینتیک شیمیایی احتراق با شامل ۸۴ گونه و ۷۰۳ واکنش استفاده و معرفی نمودند و نتایج نشان داد با افزایش غلظت آمونیاک، ناکس افزایش می‌یابد. اوکافور و همکاران [۱۲] مکانیزم احتراق تیان و GRI-Mech 3.0 را تلفیق و یک مکانیزم با ۵۹ گونه و ۳۵۶ واکنش را معرفی نمود. این مکانیزم با اطلاعات یک محفظه استوانه‌ای حجم ثابت که در دما و فشار اتمسفر و کسر مولی آمونیاک بین ۰/۳-۰ در احتراق آمونیاک-متان صحت‌سنجی شد. ژیاو و همکاران [۱۳] احتراق مشعل آمونیاک-متان با استفاده از مکانیزم کوانوف و با استفاده از یک مشعل یک‌بعدی برای به دست آوردن زمان تأخیر اشتعال شبیه‌سازی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که ناکس با افزایش غلظت درصد آمونیاک تا ۵۰ درصد افزایش و بعداز آن کاهش می‌یابد، همچنین بیشینه انتشار ناکس در حوالی حالت استوکیومتری است و در حالت‌های کمتر و بیشتر از حالت استوکیومتری این مقدار کمتر است. راموس و همکاران [۱۴] احتراق پیش مخلوط سوخت آمونیاک-متان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ناکس با افزایش غلظت درصد آمونیاک تا ۵۰ درصد افزایش و بعداز آن کاهش می‌یابد، همچنین این مقدار با افزایش نسبت هم‌ارزی نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها از مکانیزم‌های شیمیایی احتراق برای پیش‌بینی داده‌های تجربی استفاده نمودند و به‌طور قابل‌توجهی در اکسیدهای نیتروژن و انتشار مونواکسید کربن اختلاف‌های بزرگ را برای اغلب مکانیزم‌های مورد استفاده مشاهده نمودند. تاکنون مطالعات محدودی در زمینه احتراق سوخت آمونیاک در مشعل محیط متخلخل چه به صورت تجربی و عددی انجام شده است که در ذیل این مطالعات بررسی می‌شود.

نوذری و همکاران [۱۵] نیز مطالعه‌ای تجربی بر روی احتراق ترکیبات سوخت آمونیاک-هیدروژن در یک مشعل محیط متخلخل سیلیکون کارباید (SiC) انجام دادند. آزمایش‌های پایداری نشان داد که مشعل متخلخل قادر به احتراق مؤثر

مخلوط‌های سوخت با مقادیر بالای آمونیاک است. برکمن و همکاران [۱۶] احتراق آمونیاک خالص را در یک مشعل محیط متخلخل با استفاده از تشخیص مبتنی بر لیزر بررسی نمودند و حداکثر مقادیر NO را برای نسبت هم ارزی ۰/۹ مشاهده کردند. آن‌ها از مکانیزم‌های شیمیایی مختلف برای پیش‌بینی داده‌های تجربی استفاده نمودند که تفاوت و اختلاف‌های مهمی را برای بسیاری از مکانیزم‌ها، به‌خصوص در منطقه بعد از شعله، یافتند. روچا و همکاران [۱۷] احتراق آمونیاک-متان-هوا و احتراق آمونیاک-هیدروژن-هوا را در یک مشعل محیط متخلخل به‌صورت تجربی و سینتیک شیمیایی بررسی نمودند. در این پژوهش آن‌ها انتشار ناکس، مونواکسید کربن و آمونیاک نسوخته را بررسی نمودند. نتایج تجربی برای سوخت آمونیاک-متان نشان داد که بیشینه مقدار ناکس در محدوده درصد غلظت ۵۰ درصد اتفاق می‌افتد درحالی‌که در احتراق آمونیاک-هیدروژن این مقدار در محدوده‌های ۵۰ درصد و ۸۰ درصد اتفاق می‌افتد. داده‌های انتشار مونواکسید کربن نشان‌دهنده احتراق کامل متان است اما آمونیاک نسوخته موجود در دودکش، اکسیداسیون ناقص آن را برای شرایط مورد مطالعه نشان داد. شبیه‌سازی سینتیک شیمیایی الگوهای انتشار ناکس مشابهی را نشان داد اما در اکثر موارد به‌طور قابل توجهی داده‌های تجربی را بیش‌ازحد پیش‌بینی، نشان داد. هاشمی و همکاران [۱۸] احتراق سوخت آمونیاک-نیتروژن در محیط متخلخل را به‌صورت عددی بررسی نمودند. در این پژوهش ویژگی‌های احتراق از نظر ساختار متخلخل، نسبت هم‌ارزی و اجزای سوخت و روند انتشار آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حدود پایداری شعله با افزایش نسبت هم‌ارزی صرف‌نظر از کسر آمونیاک افزایش می‌یابد. همچنین افزودن آمونیاک در مخلوط سوخت باعث کاهش پایداری شعله و ضخامت شعله حرارتی می‌شود از طرفی منجر به افزایش انتشار NO می‌شود. افزایش نسبت هم‌ارزی منجر به کاهش ضخامت شعله حرارتی در شرایط سوخت رقیق شد درحالی‌که در شرایط غنی، باعث افزایش ضخامت منطقه شعله شد همچنین با افزایش میانگین قطر حفره‌های محیط متخلخل، محدوده پایداری شعله افزایش یافت. مطالعات انجام‌شده در این زمینه بیانگر آن است که با استفاده از محیط متخلخل می‌توان در محدوده‌های رقیق نیز شعله پایدار داشت. در این شرایط میزان آلاینده ناکس به‌شدت کاهش می‌یابد. همچنین مطالعات تجربی و عددی انجام‌شده در این زمینه اثر پارامترهایی مانند نسبت هم‌ارزی، سرعت جریان ورودی، مشخصه‌های ترموفیزیکی محیط متخلخل و ترکیبات سوختی مختلف را بر محدوده پایداری شعله و مقدار آلاینده‌ها بررسی نموده‌اند. نتایج در حالت کلی گویای آن است که استفاده از محیط متخلخل باعث بهبود محدوده پایداری، کاهش تولید آلاینده‌ها و افزایش بازده تشعشعی مشعل در ضمن افزایش افت فشار می‌شود. کارهای عددی انجام‌شده در این زمینه نیز با در نظر گرفتن فرضیات مختلف مانند شرط عدم تعادل یا تعادل حرارتی بین فاز جامد و گاز داخل محیط متخلخل، شرط در نظر گرفتن تشعشع داخل محیط متخلخل و وضعیت رژیم جریان داخل محیط متخلخل سعی در مدل‌سازی بهتر احتراق در محیط متخلخل به‌منظور نزدیک کردن نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج تجربی دارند و در این زمینه تا اکنون تحقیقات مختلفی انجام‌شده است. از طرفی مطالعات انجام‌شده نشان داد که سوخت آمونیاک مزایای متعددی به نسبت سایر سوخت‌های کربنی دارد از جمله چگالی حجمی انرژی بالاتر، درصد بالای هیدروژن موجود در آمونیاک به نسبت سایر سوخت‌ها، قیمت ارزان‌تر و فشار ذخیره‌سازی پایین‌تر به نسبت سوخت هیدروژن و مهم‌تر از این‌ها این سوخت عاری از کربن است لذا عاری از آلاینده‌گی نظیر CO، CO₂، SO_x، HC_s است. با توجه به پژوهش‌هایی که در بالا ذکر شد و تا امروز در مورد احتراق آمونیاک بررسی شده و مشخص شد معایب گاز آمونیاک از جمله سرعت شعله پایین، حدود شعله‌وری پایین و انتشار گاز گلخانه‌ای ناکس بالا و ... است.

اکثر پژوهش‌هایی که تاکنون در احتراق آمونیاک انجام‌شده چه به‌صورت عددی و یا تجربی متمرکز بر تعیین پارامترهایی نظیر سرعت شعله آرام و زمان تأخیر اشتعال احتراق در شعله آمونیاک بوده است و از طرفی محیط متخلخل به دلیل خواص منحصربه‌فرد حرارتی و فیزیکی مطلوب، سبب بهبود عملکرد احتراق در مشعل می‌شود. در این مطالعه اثر محیط متخلخل در احتراق سوخت آمونیاک و مخلوط آن با سایر سوخت‌ها به‌صورت عددی مطالعه می‌شود که تا به امروز در پژوهش‌های دیگر کمتر انجام‌شده است. بنابراین هدف مطالعه حاضر با استفاده از نرم‌افزار فلونت، بررسی عددی اثر پارامترهای مختلف از قبیل اثر خواص مهم محیط متخلخل از جمله چگالی حفره تخلخل و درصد تخلخل و خواص مهم احتراقی شامل پیش گرم کردن

هوای ورودی و نسبت هم‌ارزی، بر وضعیت پایداری شعله و توزیع دمای شعله در احتراق مخلوط آمونیاک-متان در محیط متخلخل است.

مشخصات و هندسه مشعل متخلخل

به‌منظور بررسی و شبیه‌سازی عددی پایداری شعله احتراق مخلوط آمونیاک-متان، از مشعل مورد مطالعه روچا و همکاران استفاده شده است [۱۷]. مطابق با شکل ۱ در این مشعل از دو لایه متخلخل که در لایه اول محیط متخلخل از جنس سرامیک آلومینا (Al_2O_3) با چگالی حفره ۴۰ ppi و قطر ۷۰ میلی‌متر و طول ۴۰ میلی‌متر و همچنین لایه دوم محیط متخلخل از جنس زیرکونیا (ZrO_2) با چگالی حفره ۱۰ ppi و قطر ۷۰ میلی‌متر و طول ۴۰ میلی‌متر استفاده شده است همچنین خواص ماتریس‌های متخلخل که مطابق با خواص استفاده شده در پژوهش کاتاپان و همکاران است [۱۹] است، در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که خواص جنس زیرکونیا به دلیل نحوه ساخت پیچیده آن، ترکیبی از چندین جنس مختلف است که شرح کامل خواص آن در پژوهش کاتاپان و همکاران آورده شده است [۱۹].

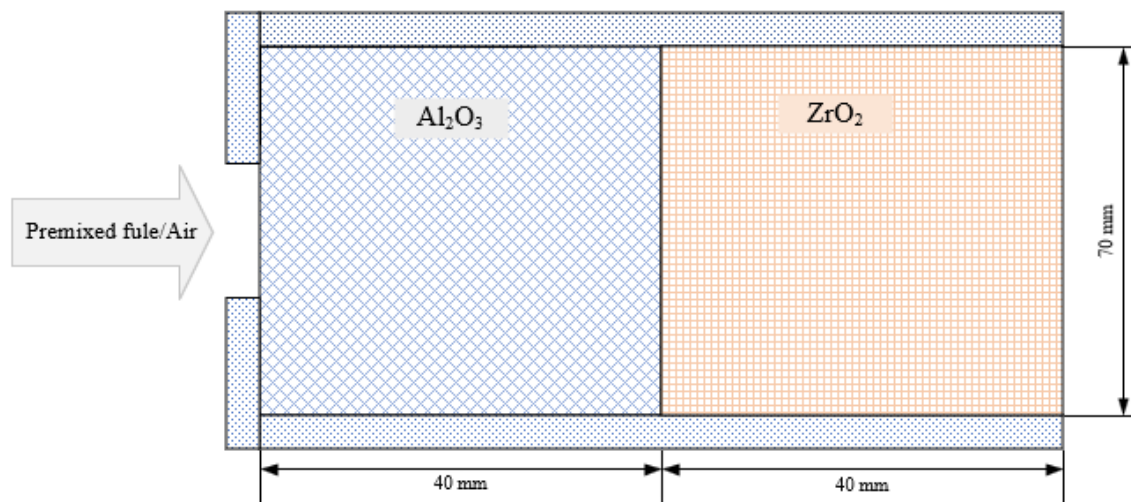


Figure 1- Schematic of the combustion chamber under study [17]

شکل ۱- طرح‌واره محفظه احتراق مورد مطالعه [۱۷]

جدول ۱- خواص ماتریس‌های متخلخل

Table 1- Properties of porous matrices

Parameter	Dimension	Al_2O_3	ZrO_2
Special heat capacity	C_p [J/kg.k]	3987	1200
Density	ρ [kg/m ³]	3750	4500
Thermal conductivity at 20°C	W/mK	20-30	10-15
Thermal conductivity at 1000°C	W/mK	5-6	2-3
Porosity (ϵ)	-	0.8	0.8

بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی

بررسی کردن عدم وابستگی نتایج به‌دست‌آمده در یک مطالعه عددی یکی از مواردی است که همواره در این‌گونه مطالعات مورد توجه قرار می‌گیرد. در روش‌های عددی به دلیل وجود خطاهای ناشی از گسسته‌سازی بایستی شبکه مناسبی انتخاب شود تا با ریز کردن بیشتر آن در نتایج تغییری حاصل نشود. شبکه به کار گرفته‌شده در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار انسیس

مشینگ تولیدشده و برای تولید شبکه از المان‌های چهاروجهی بهره گرفته شده است. برای استقلال حل عددی از شبکه به کار گرفته شده، از شش شبکه سازمان‌یافته با تعداد ۴۹۶۸، ۱۱۲۰۰، ۱۷۶۰۰، ۱۸۷۰۰، ۲۲۸۰۰ و ۳۱۰۰۰ سلول استفاده شده است. شکل ۲ و ۳ توزیع دمای فاز گاز و جامد بر روی خط مرکزی مشعل در نسبت هم ارزی ۰/۸ و نسبت سوخت آمونیاک به متان (۸۰/۲۰) را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، بیشینه مقدار دمای گاز و جامد و موقعیت شعله با تغییر سلول‌های شبکه از ۴۹۶۸ به ۱۸۷۰۰، تغییر زیادی کرده است ولی بعد از آن موقعیت شعله و ماکزیمم دما تغییر آن‌چنانی نداشته است، بنابراین در این پژوهش از شبکه‌ای با تعداد ۱۸۷۰۰ سلول پس از بررسی استقلال جواب‌ها از شبکه، به‌منظور حل معادلات حاکم وارد نرم‌افزار فلونت شده است.

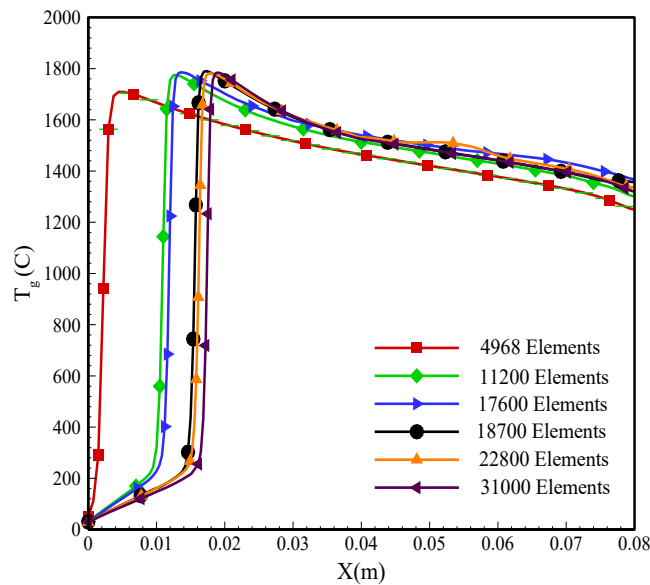


Figure 2- Gas phase temperature distribution on the centerline of the burner

شکل ۲- توزیع دمای فاز گاز بر روی خط مرکزی مشعل

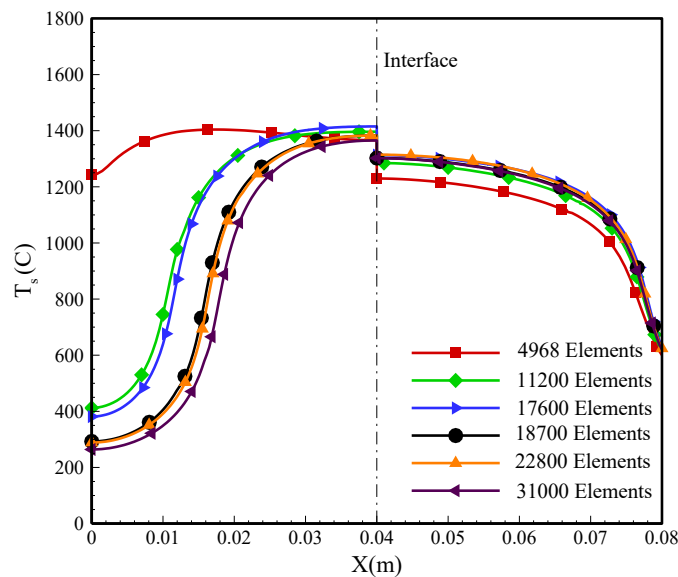


Figure 3- Solid phase temperature distribution on the centerline of the burner

شکل ۳- توزیع دمای فاز جامد بر روی خط مرکزی مشعل

معادلات حاکم بر جریان سیال در محیط متخلخل

در این بخش ابتدا معادلات حاکم بر جریان سیال در مشعل متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای مطلوب در بحث مشعل‌های متخلخل، متغیرهای دما، سرعت، فشار، چگالی و غلظت گونه‌های شیمیایی است. هندسه مورد نظر دوبعدی و تقارن محوری در نظر گرفته شده است. به منظور کاهش میزان محاسبات، در این مقاله از مدل تقارن محوری استفاده شده است. به علت اینکه در مشعل‌های متخلخل، دو فاز گاز و جامد حضور دارند، به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر از فرض عدم تعادل حرارتی مابین فاز گاز و جامد استفاده شده است. به عبارت دیگر، دو معادله انرژی مجزا، برای هریک از فازها حل خواهد شد. اثر تشعشع گاز در برابر تشعشع ماتریس جامد، ناچیز در نظر گرفته شده است. همچنین رفتار محصولات و واکنش‌دهنده‌ها، به صورت گاز ایده‌آل تراکم‌ناپذیر لحاظ شده است. در این قسمت معادلات حاکم بر مشعل محیط متخلخل، شرح داده می‌شوند. این معادلات شامل معادلات پیوستگی، تکانه، انرژی در فاز گاز، انرژی در فاز جامد، بقای گونه‌ها و حالت می‌باشند [۲۰].

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

معادله تکانه

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon \vec{u} \vec{u}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla \cdot (\mu_g \varepsilon \nabla \vec{u}) - (\nabla p)_p \quad (2)$$

که در این رابطه \vec{u} بیانگر سرعت ذاتی سیال و ε بیانگر تخلخل محیط است. عبارت $(\nabla p)_p$ که در سمت راست معادله بالا آورده شده است افت فشار ناشی از وجود محیط متخلخل است که توسط معادله تصحیح شده ارگن محاسبه می‌شود [۲۱].

$$\nabla p = \frac{180(1-\varepsilon)^2 \mu}{\varepsilon^3 d_p^2} \vec{u} + \frac{1.8(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p} |\vec{u}| \vec{u} \quad (3)$$

در معادله بالا ترم اول و دوم به ترتیب تانسورهای تراوایی برای جریان داری و غیرداری هستند. در رابطه بالا d_p قطر متوسط فوم سرامیکی است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d_p = \frac{1}{100 p p c} \sqrt{\frac{4 \varepsilon}{\pi}} \quad (4)$$

که در این رابطه ppc چگالی حفره بر حسب واحد سانتی متر است.

معادله انرژی در فاز گاز

$$\frac{\partial(\rho_g c_{p,g} \varepsilon T_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g c_{p,g} \varepsilon \vec{u} T_g) + \varepsilon \sum_k \rho_g Y_k V_k c_{p,k} \nabla \cdot T = \nabla \cdot (\varepsilon \lambda_g \nabla T_g) - \varepsilon \sum_k \dot{\omega}_k M W_k h_k + H_v (T_s - T_g) \quad (5)$$

در رابطه بالا c_p گرمای ویژه سیال، λ_g ضریب هدایت حرارتی سیال، T_g دمای گاز، T_s دمای جامد، H_v ضریب انتقال حرارت حجمی، $\dot{\omega}_k$ نرخ مولی تولید گونه k ام h_k آنتالپی گونه k ام، W_k وزن مولکولی گونه k ام است. در این معادله ترم دوم و سوم سمت راست معادله به ترتیب معرف انرژی آزاد شده بر اثر واکنش‌های شیمیایی و انتقال حرارتی میان فاز گاز و جامد است.

معادله انرژی در فاز جامد

$$\rho_s(1-\varepsilon)c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{s,\text{eff}} \nabla T_s) + H_v(T_g - T_s) \quad (6)$$

که در این رابطه ρ_s و c_s به ترتیب معرف چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی ماتریس جامد هستند. اثر مکانیزم تشعشی ماتریس جامد به صورت غیرمستقیم در ضریب هدایت حرارتی مؤثر $\lambda_{s,\text{eff}}$ آورده شده است به این صورت که با استفاده از معرفی یک ضریب رسانش معادل برای تشعشع، انتقال حرارت از طریق مکانیزم تشعشع با گرا دیان دما مرتبط شده است و ضریب هدایت حرارتی مؤثر شامل دو ترم هدایت حرارتی محیط متخلخل و هدایت حرارتی وابسته به تشعشع است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲].

$$\lambda_{s,\text{eff}} = \lambda_{s,\text{cond}} + \lambda_{s,\text{rad}} \quad (7)$$

$$\lambda_{s,\text{rad}} = \frac{16\sigma T_s^3}{3\beta(1-\varepsilon)} \quad (8)$$

در این معادله σ ثابت استفان-بولتزمن^۱ است که مقدار آن $5/672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ است و T_s نیز معرف دمای جامد است. در این معادله ضریب خاموشی، خود از طریق رابطه‌ی محاسبه می‌شود.

$$\beta = \frac{3}{d_p} (1-\varepsilon) \quad (9)$$

در نتیجه ضریب هدایت حرارتی مؤثر ماتریس جامد را می‌توان این‌طور بیان کرد:

$$\lambda_{s,\text{eff}} = \lambda_{s,\text{cond}} + \frac{16\sigma d_p T_s^3}{9(1-\varepsilon)} \quad (10)$$

از آنجایی که دمای گاز و جامد متفاوت هستند؛ بنابراین برای هر فاز معادله انرژی به صورت مجزا حل شده است. دو معادله از طریق ترم انتقال حرارت حجمی به همدیگر کوپل می‌شوند. ضریب انتقال حرارت حجمی توسط رابطه زیر بیان می‌شود [۲۳].

$$H_v = \frac{\text{Nu}_v \lambda_g}{d_p^2} \quad \text{Nu}_v = 0.146 \text{Re}^{0.96} \quad (11)$$

همچنین می‌توان رابطه‌ای برای ضریب انتقال حرارت حجمی با ضریب انتقال حرارت جابجایی با توجه به سطح مقطع به ازای واحد حجم ماده متخلخل (a_v) به دست آورد: در این رابطه a_v نماینده‌ی سطح آزاد حفره‌ها بر واحد حجم ماتریس جامد است و از رابطه پیشنهادی فو و همکاران [۲۴] به دست می‌آید.

$$a_v = 169.4 \times ppc \quad (12)$$

معادله بقای گونه‌های شیمیایی

$$\frac{\partial (\rho_g \varepsilon Y_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon \vec{u} Y_k) + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon Y_k V_k) = \varepsilon \dot{\omega}_k M W_k \quad (13)$$

در این معادله‌ی جمله‌ی چشمه‌ی $\varepsilon \dot{\omega}_k M W_k$ مبین نرخ تولید یا مصرف گونه‌ی k ام در طی واکنش شیمیایی است. هم‌چنین در این معادلات، V_k سرعت نفوذ گونه‌ی k ام است [۲۰].

¹ Stefan-Boltzmann Constant

معادله‌ی حالت گاز ایده‌آل

$$\rho_g = \frac{p}{R_u T_g \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_i}{MW_i} \right)} \quad (14)$$

که در آن W_i وزن مولکولی متوسط و R_u ثابت جهانی گازها می‌باشند و این رابطه برای یک مخلوط گازی متشکل از N گونه‌ی شیمیایی نوشته شده است.

شرایط اولیه و مرزی

برای حل عددی معادلات حاکم بر مسئله نیاز به شرایط مرزی مناسب است. در مرز ورودی دمای مخلوط سوخت و هوا برابر ۳۰۰ کلوین و سرعت جریان محوری در نظر گرفته شده است. در مرز خروجی از شرط صفر بودن گرادیان در جهت محوری مؤلفه‌های سرعت، دما و گونه‌های شیمیایی استفاده شده است (با فرض به‌اندازه کافی دور بودن مرز خروجی از محیط متخلخل این فرض قابل قبول است). در مرزهایی که به‌صورت دیواره می‌باشند از شرط عدم لغزش برای سرعت، صفر بودن گرادیان نفوذ برای گونه‌های شیمیایی و آدیاباتیک بودن برای معادلات انرژی در فاز جامد و سیال استفاده شده است. در مرزهای ابتدا و انتهای ماتریس جامد نیز تبادل حرارت از طریق تشعشع و جابجایی با محیط پیرامون در نظر گرفته شده است. خط تقارن محوری محفظه احتراق نیز به‌عنوان شرط مرزی تقارن برای تمام معادلات در نظر گرفته شده است.

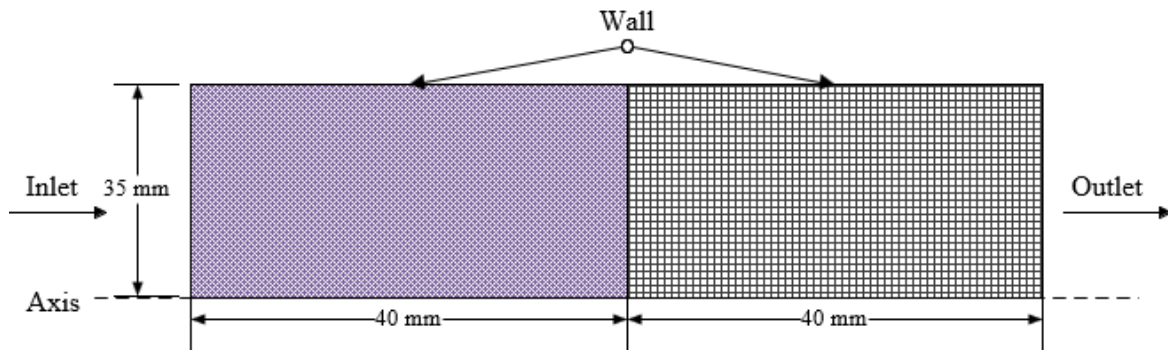


Figure 4- Boundary conditions of the study chamber geometry
شکل ۴- شرایط مرزی هندسه محفظه مورد مطالعه

شرایط مرزی به‌کاررفته برای معادلات پیوستگی، انرژی فاز گاز و بقاء گونه‌ها به شرح زیر است. در این روابط x_{in} و x_{out} نشان‌دهنده‌ی مرز ورودی و خروجی کل ناحیه‌ی حل و x_0 و x_1 نشان‌دهنده‌ی مرز ابتدا و انتهای محیط متخلخل می‌باشند.

$$T_g = T_{gin}, \quad Y_k = Y_{kin}, \quad v=0, \quad u=u_0 \quad \text{at } :x=x_{in} \quad (15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial T_g}{\partial x} = \frac{\partial Y_k}{\partial x} = 0 \quad \text{at } :x=x_{out} \quad (16)$$

در خروجی مشعل، به‌شرط این‌که محل خروجی به‌اندازه‌ی کافی از محل شعله دور باشد که در مدل‌سازی حاضر این چنین است، از شرط توسعه‌یافتگی میدان جریان استفاده می‌شود؛ بنابراین شیب تغییر برای سرعت گاز، دمای گاز و کسر جرمی گونه‌ها برابر با صفر است [۴].

شرایط مرزی در مرزهای جامد، بامنظور کردن هر سه شکل انتقال حرارت مؤثر در تبادل انرژی و از برقراری توازن انرژی برای مرزها، به دست می‌آید [۲۵]؛ بنابراین برای معادله‌ی انرژی فاز جامد از شرط مرزی زیر استفاده می‌شود:

$$[h_0(T_{g,0} - T_{s,0}) + e_0 \sigma (T_{surr,0}^4 - T_{s,0}^4)](1 - \varepsilon) = -\lambda_{s,eff,0} \frac{\partial T_s}{\partial x} \quad \text{at } :x=x_0 \quad (17)$$

$$[h_l(T_{g,l} - T_{s,l}) + e_0 \sigma (T_{surr,l}^4 - T_{s,l}^4)](1 - \varepsilon) = -\lambda_{s,eff,l} \frac{\partial T_s}{\partial x} \bigg|_{x=x_l} \quad \text{at: } x = x_l \quad (18)$$

در این معادلات، زیرنویس‌های 0 و l به ترتیب، نشان‌دهنده‌ی ورودی و خروجی محیط متخلخل، e ضریب صدور محیط متخلخل و σ ثابت استفان-بولتزمن می‌باشند. T_{surr} نیز، دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. این شرط با فرض تعادل شار حرارتی ورودی و خروجی در مرزهای جامد به‌دست آمده است (برآیند سه بردار شار حرارتی تشعشع، رسانش و جابجایی در مرزهای جامد برابر صفر است). روابط (۱۷) و (۱۸) دربرگیرنده‌ی هر دو شار حرارتی ناشی از جابجایی و تشعشع از سطح محیط متخلخل می‌باشند. احتساب شار تشعشعی در این دو شرط مرزی، نقصان معادله‌ی تقریبی نفوذ جرمی را در مدل‌سازی این مکانیزم انتقال حرارت در نزدیکی مرزهای جامد جبران می‌کند. روابط فوق جزء شرایط مرزی رایج بوده که بیشترین تطابق را با فیزیک مسئله دارند.

روش حل معادلات حاکم

معادلات حاکم بر این مسئله از جمله معادلات بقای جرم، تکانه، انرژی فاز گاز و جامد، بقای گونه‌ها و تشعشع داخل محیط متخلخل با در نظر گرفتن فرضیات مناسب و به کمک روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل به‌صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار فلونت^۱ ۲۲ حل می‌شوند. وضعیت رژیم جریان داخل محیط متخلخل در حالت پایا و همچنین فرضیات مناسب مانند شرط عدم تعادل فاز گاز و جامد (از آنجاکه محیط گاز و محیط متخلخل جامد در تعادل حرارتی قرار ندارند، لازم است که معادله انرژی برای هر کدام به‌صورت جداگانه نوشته شود که شامل ترم هدایت حرارتی در فاز جامد و گاز، انتقال حرارت جابجایی بین فاز جامد و گاز، انتقال حرارت جابجایی با محیط اطراف، تولید حرارت در فاز گاز و تشعشع در فاز جامد است و این دو معادله به‌وسیله ترم انتقال حرارت جابجایی به یکدیگر جفت می‌شوند) در نظر می‌گیریم. به دلیل محدودیت‌های موجود در کتابخانه‌های پیش‌فرض نرم‌افزار، لازم است که با استفاده از UDF^۲ اطلاعات موردنیاز در مورد معادلات انرژی فاز جامد و تشعشع محیط متخلخل از جمله برای معرفی ضریب هدایت حرارتی مؤثر به‌صورت تابعی از دما که شامل دو ترم هدایت حرارتی محیط متخلخل و هدایت حرارتی وابسته به تشعشع (برای حذف معادلات پیچیده تشعشعی درون محیط متخلخل) است به نرم‌افزار اضافه شوند. این برنامه‌های کمکی به زبان برنامه‌نویسی C نوشته می‌شوند و به نرم‌افزار اصلی به‌صورت دینامیکی ارتباط پیدا می‌کند. به‌منظور حل عددی مسئله بایستی هندسه موردنظر شبکه‌بندی شود. پس از انطباق شبکه بر میدان حل، حول هر گره، حجم کنترلی ایجاد می‌شود و از معادلات حاکم روی هر حجم کنترل انتگرال‌گیری می‌شود. سپس دستگاهی از معادلات منفصل شده به‌صورت جبری به دست می‌آید. لازم به ذکر است که از روش آپویند مرتبه دوم برای انفصال جملات معادلات تکانه و انرژی استفاده می‌شود. دستگاه جبری معادلات حاصل شده با استفاده از الگوریتم مبتنی بر تکرار حل می‌شوند تا معیار همگرایی 10^{-6} در آن‌ها ارضا شود. به‌منظور جلوگیری از واگرایی مسئله از ضرایب زیر تخفیف استفاده می‌شود. در این مطالعه، همچنین از سینتیک شیمیایی ژو و همکاران [۲۶] با ۶۹ گونه و ۳۸۹ واکنش برای شبیه‌سازی احتراق آمونیاک-متان با هوا استفاده می‌شود همچنین برای ارزیابی خواص ترموفیزیکی و انتقالی از کتابخانه‌های آماده نرم‌افزار CHEMKIN استفاده می‌شود.

اعتبارسنجی

به‌منظور اعتبارسنجی، نتایج حاصل از پژوهش حاضر برای سوخت آمونیاک-متان در نسبت هم ارزی ۰/۸ و درصد سوخت آمونیاک به متان (۷۰/۳۰) با نتایج تجربی و آزمایشگاهی روچا و همکاران [۱۷] مقایسه شده است. در این پژوهش از سینتیک

^۱ Ansys Fluent 22.0
^۲ User Define Function

شیمیایی ژو و همکاران [۲۶] با ۶۹ گونه و ۳۸۹ واکنش برای شبیه‌سازی احتراق آمونیاک-متان با هوا استفاده می‌شود. در پژوهش تجربی انجام شده به منظور اندازه‌گیری دما در مشعل متخلخل از ۸ ترموکوپل به فاصله یک سانتی‌متر از هم در طول محیط متخلخل استفاده شده است. در این پژوهش نتایج شبیه‌سازی توزیع دمای فاز گاز و جامد سوخت آمونیاک-متان بر روی خط مرکزی مشعل با نتایج تجربی اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. به دلیل تماس نوک ترموکوپل با فاز گاز و جامد در واقع دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل، دمایی بین دمای فاز گاز و جامد محیط متخلخل است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نتایج عددی، تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. از آنجایی که فرض عدم تعادل حرارتی بین فاز گاز و جامد در نظر گرفته شده، دمای فاز گاز و جامد در هر دو ناحیه ورودی و احتراق متفاوت است. در ناحیه احتراق، دمای گاز بیش‌تر از دمای جامد پیش‌بینی شده است. به علت شروع احتراق دمای گاز در یک لحظه به بیشینه مقدار خود رسیده است. حرارت آزاد شده در ناحیه احتراق توسط انتقال حرارت جابجایی از فاز گاز به ماتریس جامد منتقل شده و ماتریس جامد از طریق هدایت حرارتی جامد به جامد و تابش، حرارت را به ناحیه ورودی انتقال می‌دهد و دمای این ناحیه را افزایش می‌دهد، این افزایش دما باعث پیش گرم شدن گاز ورودی به مشعل شده است. میانگین خطای اندازه‌گیری شده برای فاز جامد شبیه‌سازی شده و دمای ترموکوپل‌ها در ۸ نقطه حدود ۹/۵ درصد است و برای فاز گازی شبیه‌سازی شده و دمای تجربی حدود ۱۷ درصد است. حداکثر خطای عددی در پیش‌بینی دمای بیشینه فاز گاز در محل جبهه‌ی شعله (به علت شروع احتراق دمای گاز در یک لحظه به بیشینه مقدار خود می‌رسد) حاصل می‌شود. خطای به وجود آمده در شبیه‌سازی عددی می‌تواند مربوط به خواص ترموفیزیکی فازهای گاز و جامد و همچنین به دلیل اینکه در کار تجربی انجام شده خواص ترموفیزیکی محیط متخلخل زیرکونیا ترکیبی از چندین نوع مختلف سرامیک است که باعث می‌شود در کار عددی خطا ایجاد شود و این خواص به‌طور کامل در مرجع [۱۹] بیان شده است. علاوه بر این استفاده از سینتیک‌های مختلف در پیش‌بینی بیشینه‌ی دما در جبهه شعله، تأثیرگذار است.

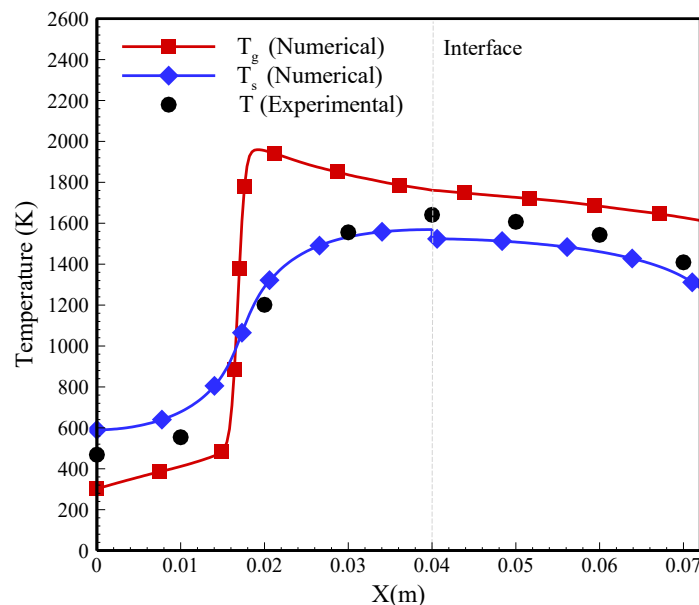


Figure 5- Comparison of gas and solid temperature diagram for ammonia-methane fuel on burner centerline with experimental results of Rocha et al [17]

شکل ۵- مقایسه توزیع دمای گاز و جامد برای سوخت آمونیاک-متان بر روی خط مرکزی مشعل با نتایج آزمایشگاهی روچا و همکاران [۱۷]

نتایج

بررسی اثر پارامترهای مهم در عملکرد مشعل متخلخل

در این بخش، نتایج بررسی‌های انجام شده در زمینه‌ی چگونگی اثرگذاری پارامتر مهم تخلخل بر روی توزیع دمای فاز گاز و جامد و مخلوط سوخت آمونیاک و متان ارائه و تفسیر می‌شوند. در هر مطالعه‌ی پارامتری فقط یک کمیت که همان کمیت مورد بررسی است تغییر داده می‌شود و سایر پارامترها و شرایط نسبت به حالت پایه بدون تغییر می‌مانند.

چگالی حفره تخلخل

در این پژوهش احتراق در محیط متخلخل سوخت آمونیاک - متان با نسبت هم ارزی $\phi = 1$ و سرعت ورودی مخلوط سوخت و هوا، 0.12 m/s و درصد آمونیاک $\text{NH}_3 = 70\%$ و درصد تخلخل در هر دولایه برابر 0.8 ثابت در نظر گرفته شده است. چگالی حفره تخلخل که یک کمیت و مشخصه‌ی هندسی مهم محیط‌های متخلخل است و توصیف‌کننده‌ی تراکم محیط است در حالت‌های مختلف بررسی می‌شود. حالت‌های مورد بررسی برای این کمیت در جدول ۲ ارائه می‌شود.

جدول ۲- حالت‌های مختلف چگالی تخلخل لایه‌ها

Table 2- Different states of porosity density of layers

states	porosity density of upper layer (ppi)	porosity density of the downstream layer (ppi)
1	10	10
2	10	20
3	20	30
4	40	40

با توجه به معادلات (۵) و (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت که ارتباط مستقیمی بین چگالی حفره تخلخل و ضریب انتقال حرارت حجمی برقرار است. به بیان دیگر هنگامی که اثر چگالی حفره تخلخل مورد مطالعه قرار می‌گیرد در واقع اثر و ضریب انتقال حرارت حجمی بررسی می‌شود؛ بنابراین مشاهدات و تفاسیری که در این قسمت بیان می‌شوند برای بررسی اثرات ضریب انتقال حرارت حجمی نیز کاملاً معتبر می‌باشند.

همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود اختلاف دمای بین فاز گاز و جامد در طول محیط متخلخل مشاهده می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود، به‌طور کلی با افزایش چگالی حفره تخلخل (ضریب انتقال حرارت حجمی) اختلاف دمای دو فاز کاهش و با کاهش چگالی حفره تخلخل (ضریب انتقال حرارت حجمی) اختلاف دمای فازهای گاز و جامد افزایش می‌یابد؛ زیرا هر قدر که ضریب انتقال حرارت حجمی بزرگ‌تر باشد، نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی بین دو فاز زیاد می‌شود و نمودارهای دما بیش‌تر به یکدیگر میل می‌کنند و اختلافشان کم‌تر می‌شود. در حالت حدی، یعنی وقتی ضریب انتقال حرارت حجمی بسیار بزرگ است، نمودارهای دما برهم منطبق می‌شوند. به بیان دیگر دمای فاز گاز و دمای فاز جامد باهم برابر می‌شوند. در این شرایط حتی می‌توان از شرط تعادل حرارتی محلی استفاده و فقط یک معادله‌ی انرژی را حل کرد. در جدول ۳ مقادیر برخی کمیت‌های مهم در حالات مختلف مورد مطالعه، ارائه می‌شود.

جدول ۳- مقایسه بعضی از کمیت‌ها در حالات مختلف جدول ۲

Table 3- Comparison of some quantities in different situations of Table 2

states	$T_{g,max}(K)$	$T_{s,max}(K)$	$T_{g,max}(K) - T_{s,max}(K)$	$T_{g,out}(K)$	flame position(m)
1	2149.2	1559.36	589.64	1821.22	0.0288
2	2194.47	1942.51	251.96	1735	0.0065
3	2196.45	1951.76	244.69	1724.49	0.005
4	2209.52	1965.86	243.66	1661.57	0.0046

با توجه به شرایط هندسی مسئله و ثابت ماندن سایر پارامترها و اینکه در این حالت احتراق در لایه اول اتفاق افتاده است و از آنجایی که هرچقدر چگالی حفره تخلخل (ضریب انتقال حرارت حجمی) کاهش یابد، نرخ انتقال گرما از فاز گاز به جامد کمتر می‌شود که منجر می‌شود دمای فاز گاز در خروجی مشعل نسبت به حالت‌های دیگر افزایش پیدا کند همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در حالت ۱ زمانی که چگالی حفره تخلخل برابر $ppi=10$ است، ضریب انتقال حرارت حجمی در کمترین مقدار خود قرار دارد و اختلاف دمای بین حداکثر دمای شعله در فاز گاز و جامد به دلیل انتقال حرارت کمتر حدود K ۵۹۰ است و همین امر باعث می‌شود که دمای گاز در خروجی مشعل بیشترین مقدار خود یعنی K ۱۸۲۲ شود. لازم به ذکر است از آنجایی که آلاینده‌های ناکس تابع دمای گاز است، افزایش دمای گاز در خروجی سبب افزایش این آلاینده‌ها در خروجی مشعل می‌شود. ضمناً با همین استدلال دمای حداکثر محیط متخلخل نسبت به مقدار حالت‌های دیگر کاهش و برابر K ۱۵۶۰ می‌شود. با افزایش مقدار چگالی حفره تخلخل مشاهده می‌شود که اختلاف بین حداکثر دمای فاز گاز و جامد کاهش یافته و در چگالی حفره تخلخل برابر $ppi=40$ این اختلاف به کمترین مقدار خود یعنی K ۲۴۳ می‌رسد. با افزایش چگالی حفره تخلخل از ppi ۱۰ به ppi ۴۰ به دلیل انتقال حرارت بهتر بین فاز گاز و جامد و پیش گرم شدن دمای فاز گاز مشاهده می‌شود موقعیت و جبهه شعله از فاصله 0.288 متری به 0.46 متری و به سمت بالادست شعله حرکت می‌کند و همین امر سبب افزایش پایداری شعله و کاهش آلاینده‌ها در خروجی مشعل می‌شود.

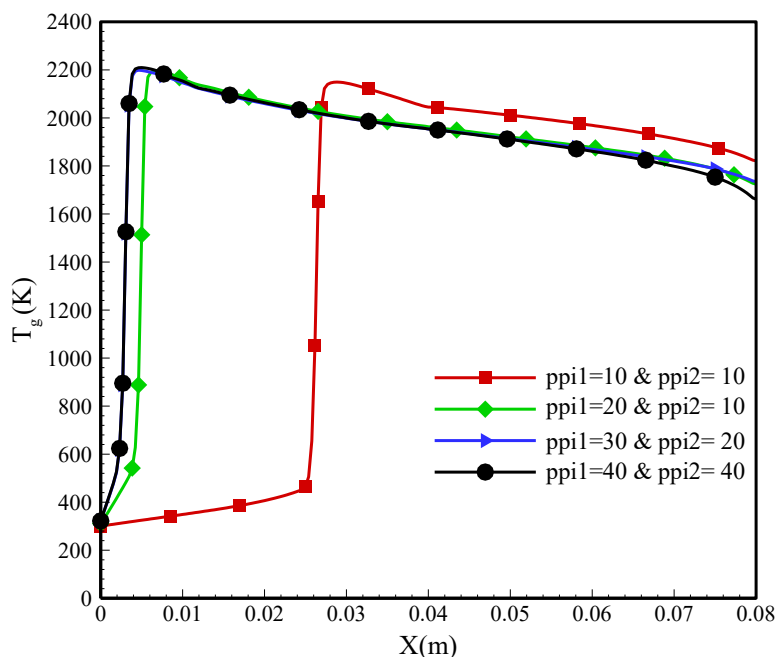


Figure 6- Gas phase temperature diagram at different porosity density

شکل ۶- نمودار دمای فاز گاز در چگالی تخلخل مختلف

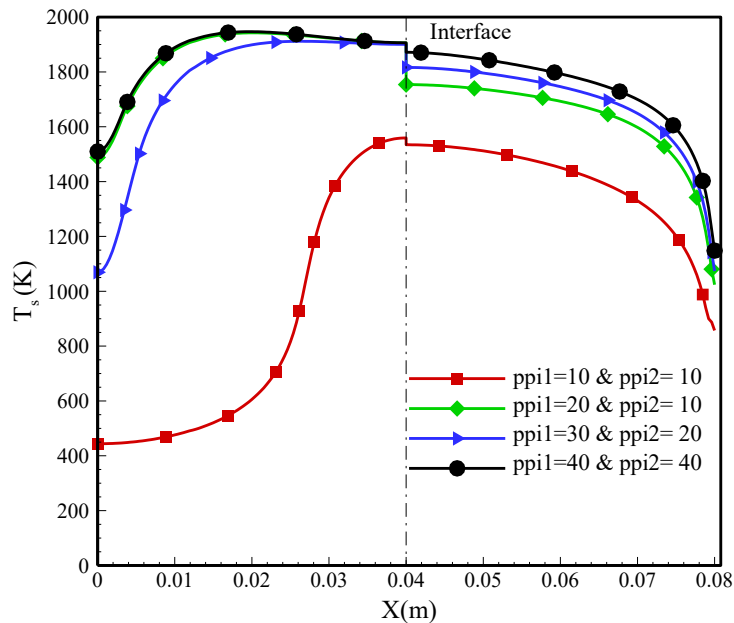


Figure 7- Solid phase temperature diagram at different porosity density
 شکل ۷- نمودار دمای فاز جامد در چگالی تخلخل مختلف

تخلخل

درواقع تخلخل نسبت حجم خالی محیط متخلخل به کل حجم محیط است که مقدار آن بین بازه صفر و یک است و یک ویژگی توصیف‌کننده‌ی ساختار هندسی محیط متخلخل است. برای بررسی تأثیر آن بر روی عمل کرد پارامترهای توزیع دمای گاز و جامد و در مشعل متخلخل آمونیاک-متان در نسبت هم ارزی $\phi = 0.8$ و سرعت ورودی مخلوط سوخت و هوا، 0.2 m/s و درصد آمونیاک $70\% \text{ NH}_3$ ، سه حالت مختلف طبق جدول ۴ بررسی می‌شود.

جدول ۴- حالت‌های مختلف تخلخل لایه‌ها

Table 4- Different states of porosity of layers

states	porosity of upper layer (ϵ)	porosity of the downstream layer (ϵ)
1	0.9	0.9
2	0.7	0.9
3	0.7	0.7

تغییر در کمیت تخلخل از طریق معادلات (۵) و (۱۲) بر روی پارامتر ضریب انتقال حرارت حجمی اثر می‌گذارد بدین‌صورت که با افزایش تخلخل، d_p متناسب با $\epsilon^{1/2}$ زیاد می‌شود. متعاقباً با افزایش d_p ضریب انتقال حرارت حجمی کاهش می‌یابد هم‌چنین تخلخل از طریق معادلات (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) بر روی ضریب هدایت مؤثر فاز جامد ($\lambda_{s,eff}$) تأثیر می‌گذارد. با توجه به معادلات ذکرشده در بالا در حالت کلی نمی‌توان ارتباط صریحی بین نحوه‌ی تغییرات ϵ و $\lambda_{s,eff}$ بیان کرد. این‌حال چون جمله‌ی مربوط به ضریب هدایت تابشی دارای عبارت T_s^3 است می‌توان با تقریب خوبی در دماهای به‌اندازه‌ی کافی زیاد از جمله‌ی ضریب هدایت معمولی در برابر آن صرف‌نظر نمود. در نتیجه در این وضعیت با افزایش تخلخل، ضریب هدایت مؤثر جامد زیاد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ برای فاز گاز و شکل ۹ برای فاز جامد مشاهده می‌شود با افزایش تخلخل در دو ناحیه از 0.7 به سمت 0.9 و افزایش ضریب هدایت مؤثر جامد، جبهه شعله به سمت بالادست مشعل حرکت می‌کند و درواقع هرچقدر تخلخل بیشتر شود حدود شعله‌وری و پایداری مشعل افزایش می‌یابد و از طرفی با کاهش تخلخل در

ماتریس جامد پایین‌دست، دمای حداکثر شعله و به‌تبع آن دمای خروجی فاز گاز از مشعل کاهش می‌یابند، لذا میزان آلاینده‌های منتشرشده نیز کاهش می‌یابند. در واقع می‌توان گفت هرچقدر تخلخل لایه دوم کمتر باشد میزان آلاینده‌ها در خروجی کاهش می‌یابد.

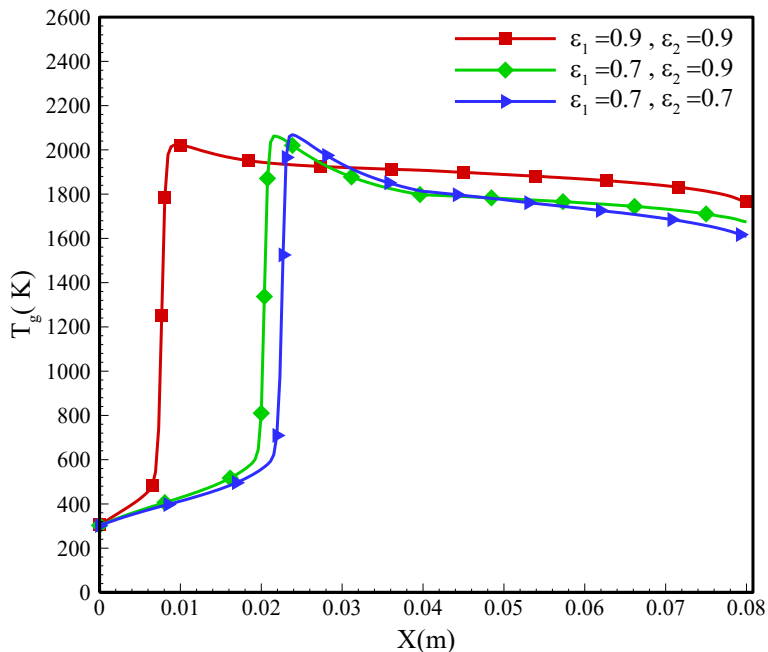


Figure 8- Gas phase temperature diagram at different porosity

شکل ۸- نمودار دمای فاز گاز در تخلخل مختلف

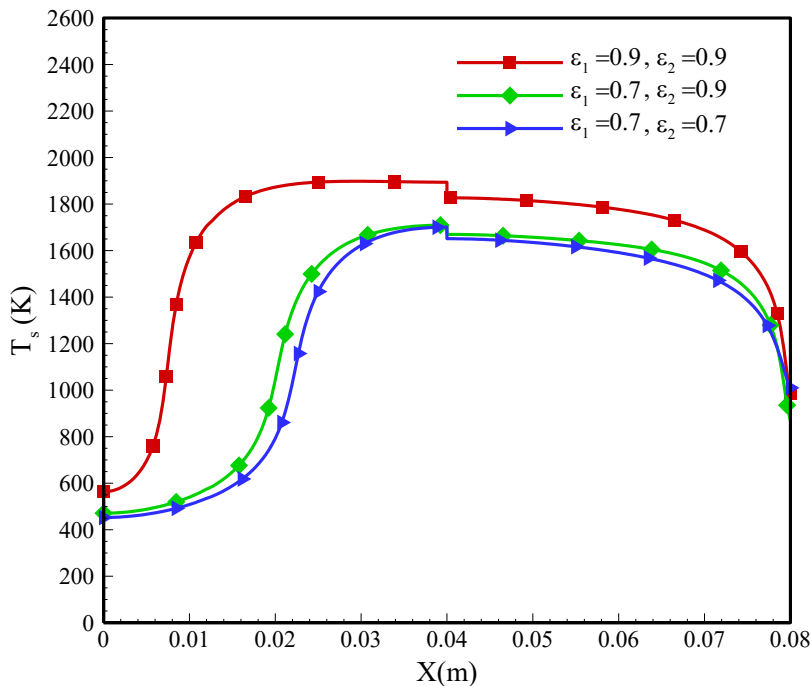
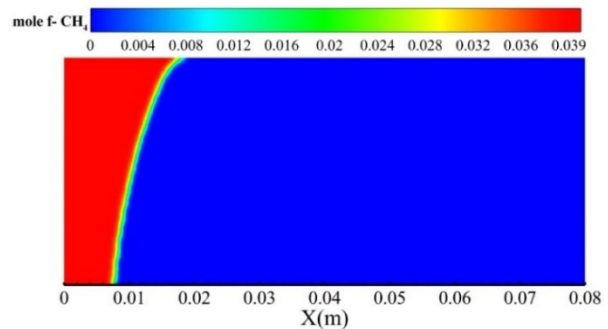
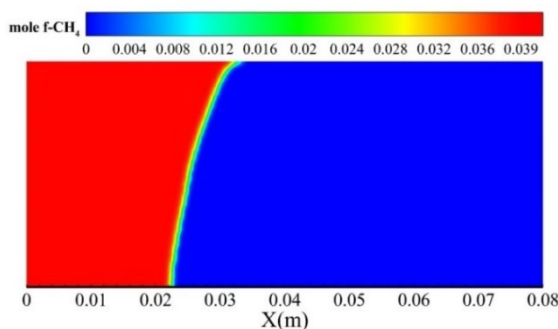
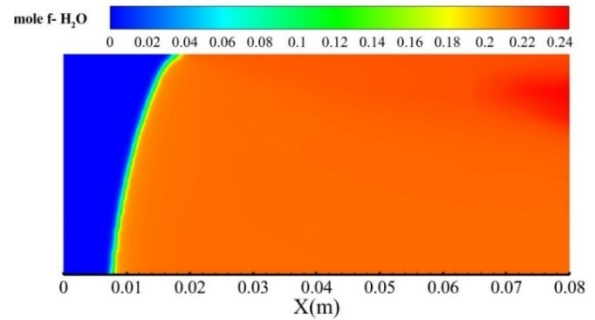
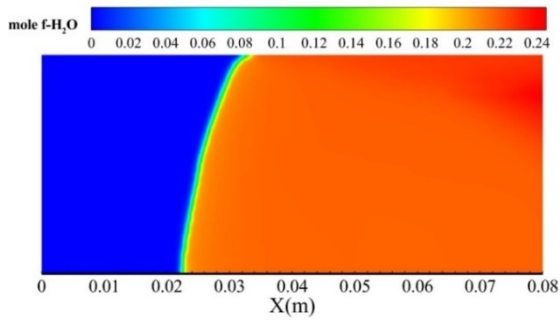
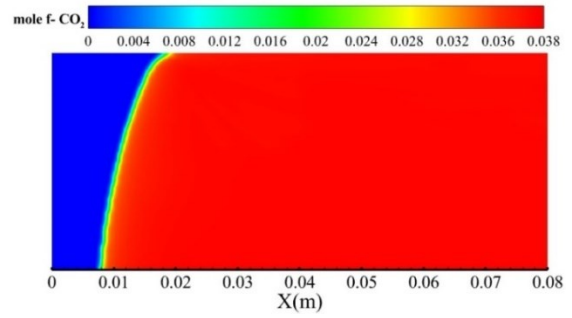
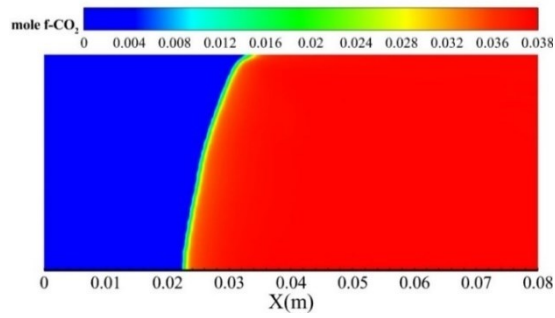
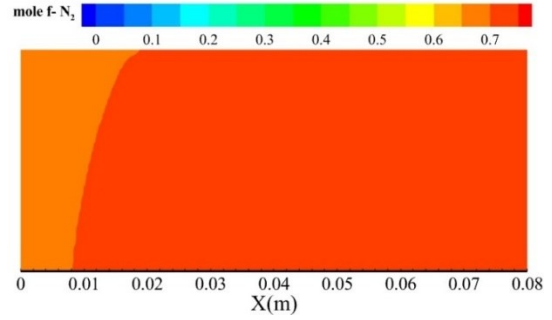
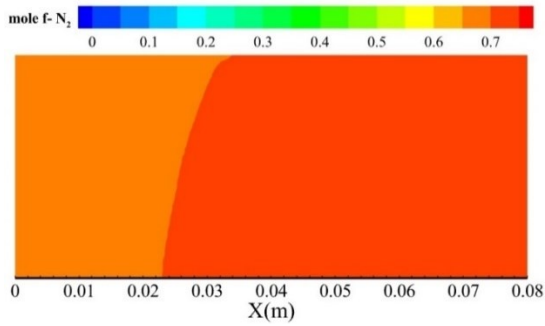
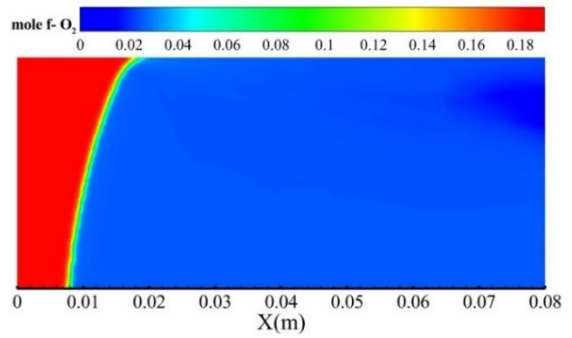
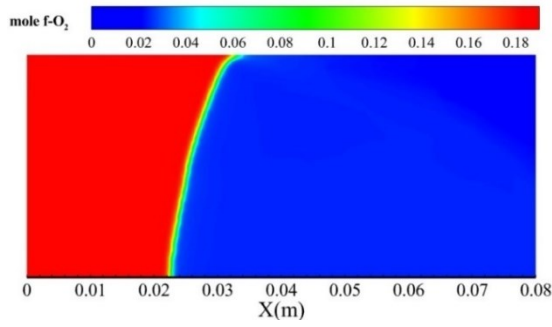
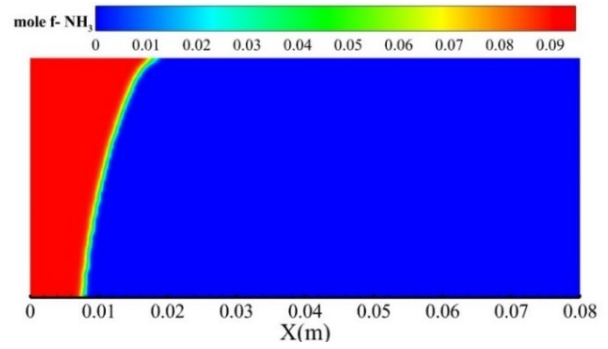
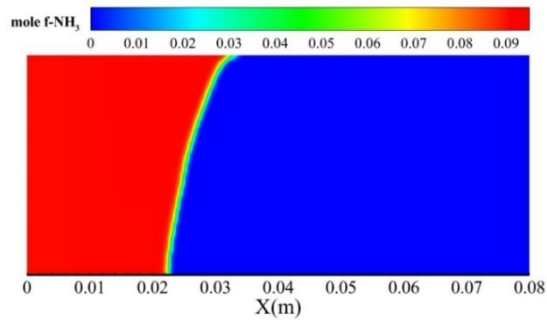


Figure 9- Solid phase temperature diagram at different porosity

شکل ۹- نمودار دمای فاز جامد در تخلخل مختلف

برای درک بهتر این پدیده در شکل ۱۰ کانتور کسر مولی گونه‌های اصلی احتراق و همچنین کانتور دما و سرعت در دو درصد تخلخل در دو ناحیه محیط متخلخل برابر ۰/۷ و ۰/۹ نشان داده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمانی که تخلخل برابر ۰/۷ است احتراق در نزدیکی ۰/۰۲۴ متر از محفظه احتراق شروع می‌شود، در حالی که زمانی تخلخل برابر ۰/۹ است شروع احتراق در نزدیکی شروع محفظه احتراق و در فاصله ۰/۰۰۹ متری اتفاق می‌افتد و جبهه شعله به سمت بالادست کشیده می‌شود. در دو حالت مشاهده می‌شود که در ناحیه نزدیکی شعله گونه‌های CH_4 و O_2 و NH_3 شروع به مصرف می‌شوند ولی از آنجایی که احتراق کامل صورت نمی‌گیرد و نسبت هم ارزی برابر ۰/۸ است مقداری از این گونه‌ها تا پایان احتراق باقی می‌مانند و البته این موضوع نیز قابل انتظار است در مقابل H_2O و CO_2 شروع به تولید می‌شوند. مشاهده شد زمانی که تخلخل برابر ۰/۹ است کسر مولی H_2O برابر ۰/۲۴۳ است که به نسبت زمانی که تخلخل برابر ۰/۷ است و کسر مولی H_2O برابر ۰/۲۳۷ است بیشتر است. در واقع می‌توان گفت افزایش تخلخل تا حدودی باعث افزایش نرخ تولید H_2O می‌شود. از طرفی مشاهده شد که افزایش تخلخل از ۰/۷ به ۰/۹ تا حدودی باعث کاهش کسر مولی گونه CO_2 از ۰/۰۳۸ به ۰/۰۳۷ و بهبود کاهش آلاینده‌گی شد، لازم به ذکر است بیشتر H_2O به نسبت CO_2 ناشی از بزرگ‌تر بودن ضریب استوکیومتری آن در واکنش کلی سوختن متان نشأت می‌گیرد. همان‌طور که می‌دانیم کسر مولی N_2 نسبت به سایر گونه‌های اصلی به مراتب بزرگ‌تر است، همچنین می‌توان گفت به‌طور کلی میزان تغییرات N_2 نسبت به سایر گونه‌ها خیلی کم‌تر است. همان‌طور که در شکل می‌بینیم در محل شعله مقدار اندکی N_2 مصرف می‌شود و این مقدار N_2 عمدتاً در واکنش‌های مربوط به تولید اکسیدهای نیتروژن مصرف می‌شود. باین حال در پایین دست شعله مجدداً میزان آن زیاد می‌شود. کسر مولی N_2 در خروجی مشعل برابر برای تخلخل ۰/۷ و ۰/۹ به ترتیب برابر ۰/۷۰۸۹ و ۰/۷۰۹۹ است در واقع زمانی که تخلخل برابر ۰/۹ است نیتروژن کمتری مصرف شده است. این نشان می‌دهد که بخش اصلی مخلوط گازها در خروجی از N_2 تشکیل یافته است. حضور N_2 تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر گرمای محسوس حاصل از احتراق دارد. چون نیتروژن با نسبت بزرگ و دمای پایین وارد مشعل می‌شود و تقریباً با همان میزان ولی در دمای بالا خارج می‌شود، می‌توان گفت که این جز بخش زیادی از انرژی آزاد شده ناشی از واکنش‌های شیمیایی را به خود اختصاص می‌دهد. به همین سبب است که در فرآیندهایی که نیاز به دماهای خیلی زیاد است، مانند برش و جوش کاری، از اکسیژن خالص به جای هوا به‌عنوان اکسیدکننده استفاده می‌شود. همچنین در کانتورهای دما و سرعت زمانی که تخلخل برابر ۰/۹ است مشاهده می‌شود که توزیع دما و سرعت به نسبت زمانی که تخلخل برابر ۰/۷ است در سرتاسر محیط متخلخل تا انتهای مشعل، شکل یکنواخت‌تر و بهتری دارد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تخلخل باعث انتقال حرارت بهتر در مشعل می‌شود.





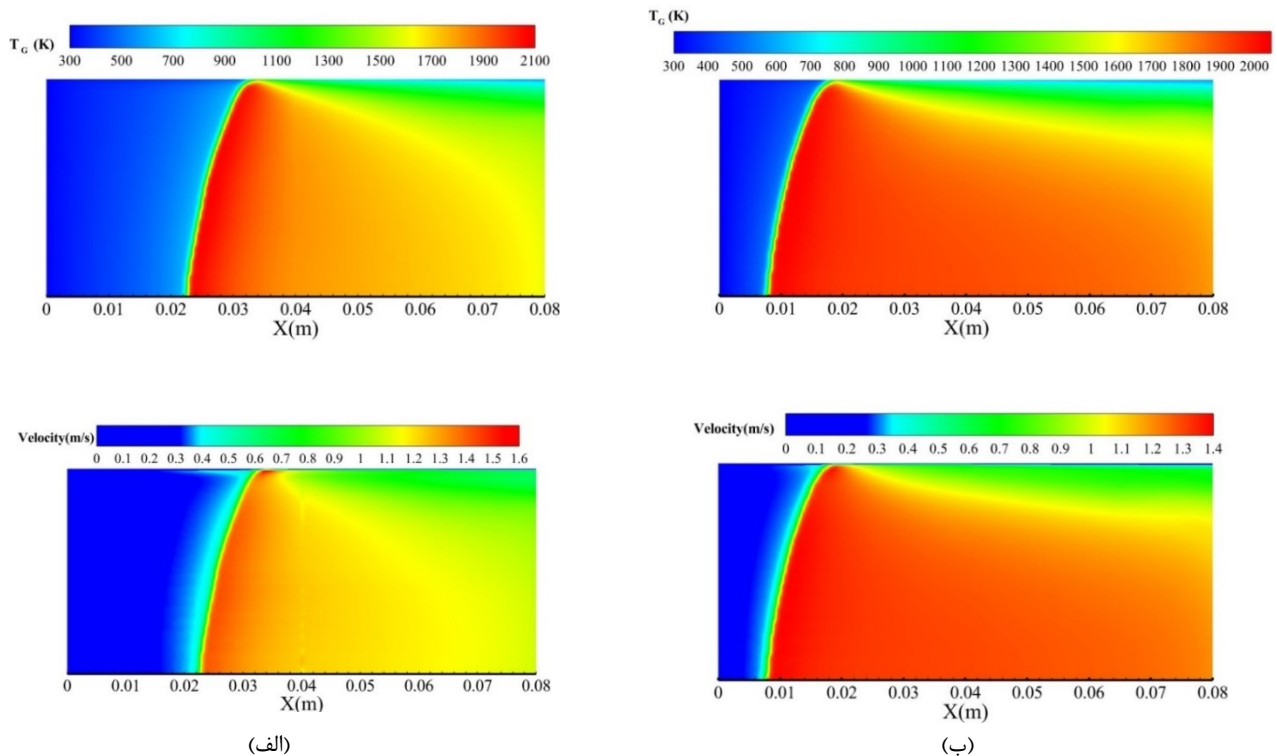


Figure 10- Contour of mole fraction of species and gas temperature and velocity in a: porosity percentage 0.7 b: porosity percentage 0.9

شکل ۱۰- کانتور کسر مولی گونه‌ها و دمای گاز و سرعت در الف: درصد تخلخل ۰/۷ ب: درصد تخلخل ۰/۹

نسبت هم ارزی و دمای ورودی مخلوط گازها

دمای مخلوط سوخت و هوای ورودی به مشعل می‌تواند به دلایلی از دمای معمول محیط (۲۹۸K) کم‌تر یا بیش‌تر باشد. مثلاً ممکن است صفحه‌ی ورودی مشعل در یک محیط سرد واقع‌شده باشد یا مخلوط پیش از داخل شدن به مشعل در یک مبدل حرارتی گرم شده باشد. به همین دلیل بهتر است که تأثیر این کمیت بر عمل کرد مشعل بررسی شود. به این منظور احتراق آمونیاک- متان را در سرعت ورودی ۰/۲۵m/s و درصد سوخت آمونیاک ۶۰درصد و درصد تخلخل در دو ناحیه متخلخل برابر ۰/۸، در ۳ نسبت هم ارزی ۰/۷، ۱ و ۱/۱ و در بازه دمایی ۵۰۰K-۳۰۰K مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

نمودارهای دمای فازهای گاز و جامد و مقادیر پارامترهای به‌دست‌آمده برای سه نسبت هم ارزی ۰/۷، ۱ و ۱/۱ به ترتیب در شکل‌های ۱۲، ۱۱ و ۱۳ و جداول ۷-۵ مشاهده می‌شود. در نسبت هم ارزی ثابت طبیعی است که با افزایش دمای مخلوط سوخت و هوای ورودی، دمای فاز گاز در قسمت ابتدایی مشعل و در ادامه در ناحیه‌ی پیش‌گرمایش افزایش بیاید و به دمای اشتعال نزدیک‌تر شود. به تبع آن دمای فاز گاز در محل شروع واکنش‌ها نیز زیاد می‌شود؛ بنابراین مطابق شکل‌ها، آزادسازی انرژی بزرگ‌تر می‌شود. این امر سبب می‌شود که دمای فاز گاز در ناحیه‌ی واکنش نیز افزایش یابد، همان‌طور که در شکل‌ها و جداول مشاهده می‌شود در تمام نسبت هم‌ارزی‌ها با افزایش دمای مخلوط ورودی دمای گاز در ناحیه پیش‌گرمایش زیاد می‌شود به طوری که در نسبت هم ارزی ۱/۱ و دمایی ورودی ۵۰۰ K دمای گاز به بالاترین مقدار خود یعنی ۲۲۵۰ K می‌رسد. این روند افزایشی دمای مخلوط گازها تا انتهای مشعل ادامه دارد. به دلیل این‌که دماهای دو فاز توسط پدیده‌ی انتقال حرارت حجمی باهم در ارتباط‌اند و چون خواص ماتریس‌های جامد در همه‌ی حالات یکسان است، نمودار دمای فاز جامد نیز رفتاری مشابه نمودار دمای فاز گاز از خود بروز می‌دهد و بالاترین دمای فاز جامد در نسبت هم ارزی ۱/۱ و دمای مخلوط ورودی ۵۰۰ K برابر ۲۰۰۰ K مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل‌ها و جداول مشاهده می‌شود با افزایش دمای ورودی از ۳۰۰

کلوین به ۵۰۰ کلوین دمای گاز خروجی کاهش و با افزایش نسبت هم ارزی موقعیت جبهه شعله هم در فاز گاز و هم فاز جامد به سمت بالادست مشعل کشیده می‌شود و پایداری مشعل افزایش می‌یابد و در نسبت هم ارزی ۱/۱ و دمای ورودی ۵۰۰ K جبهه و موقعیت مشعل در نزدیکی ابتدای مشعل و در فاصله ۰/۰۰۱ متری مشاهده می‌شود. در واقع می‌بینیم که در یک دمای ثابت با افزایش نسبت هم ارزی از ۰/۷ به سمت ۱/۱ موقعیت جبهه شعله و پایداری مشعل افزایش یافته است. از آنجایی که نرخ سرعت سوزش تابع نرخ رهایش انرژی و دمای گاز است، در جداول ۵-۷ مشاهده می‌شود با افزایش هم‌زمان نسبت هم ارزی و دمای ورودی مخلوط، حداکثر سرعت شعله هم افزایش می‌یابد.

جدول ۵- مقایسه‌ی بعضی از کمیت‌ها در حالات مختلف دمای گاز ورودی و نسبت هم ارزی ۰/۷

Table 5- Comparison of some quantities in different states of inlet gas temperature and equivalence ratio of 0.7

states	$T_{g,max}(K)$	$T_{s,max}(K)$	$T_{g,max}(K) - T_{s,max}(K)$	$T_{g,out}(K)$	flame position(m)	V_{max}
300 K	1980	1600	380	1700	0.029	1.66
400 K	2000	1770	230	1680	0.0022	1.26
500 K	2030	1800	230	1650	0.0019	1.05

جدول ۶- مقایسه‌ی بعضی از کمیت‌ها در حالات مختلف دمای گاز ورودی و نسبت هم ارزی ۱

Table 6- Comparison of some quantities in different states of inlet gas temperature and equivalence ratio of 1

states	$T_{g,max}(K)$	$T_{s,max}(K)$	$T_{g,max}(K) - T_{s,max}(K)$	$T_{g,out}(K)$	flame position(m)	V_{max}
300 K	2180	1870	310	1870	0.009	1.9
400 K	2190	1900	290	1850	0.0019	1.49
500 K	2205	2000	205	1800	0.0011	1.16

جدول ۷- مقایسه‌ی بعضی از کمیت‌ها در حالات مختلف دمای گاز ورودی و نسبت هم ارزی ۱/۱

Table 7- Comparison of some quantities in different states of inlet gas temperature and equivalence ratio of 1.1

states	$T_{g,max}(K)$	$T_{s,max}(K)$	$T_{g,max}(K) - T_{s,max}(K)$	$T_{g,out}(K)$	flame position(m)	V_{max}
300 K	2190	1980	210	1900	0.0025	2.2
400 K	2200	2000	200	1860	0.0018	1.5
500 K	2250	2050	200	1810	0.001	1.18

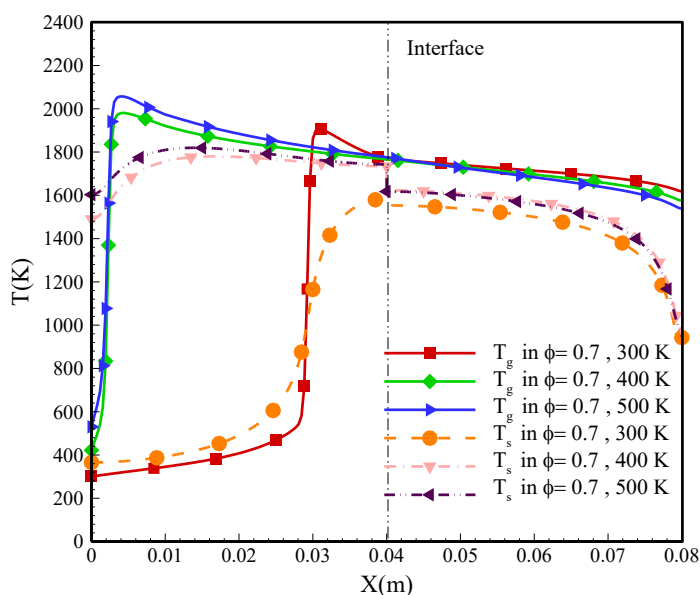


Figure 11 - Gas and solid phases temperature diagrams in equivalence ratio=0.7

شکل ۱۱- نمودارهای دمای فازهای گاز و جامد در نسبت هم ارزی ۰/۷

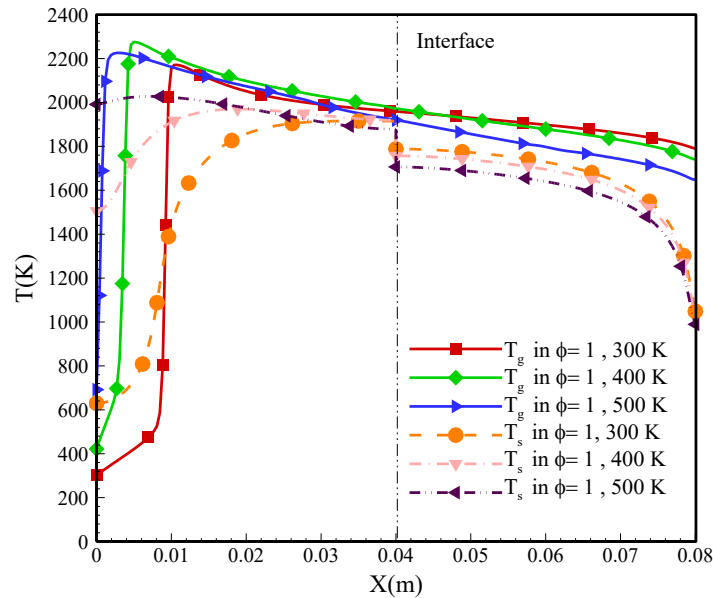


Figure 12- Gas and solid phases temperature diagrams in equivalence ratio=1
 شکل ۱۲- نمودارهای دمای فازهای گاز و جامد در نسبت هم ارزی $\phi = 1$

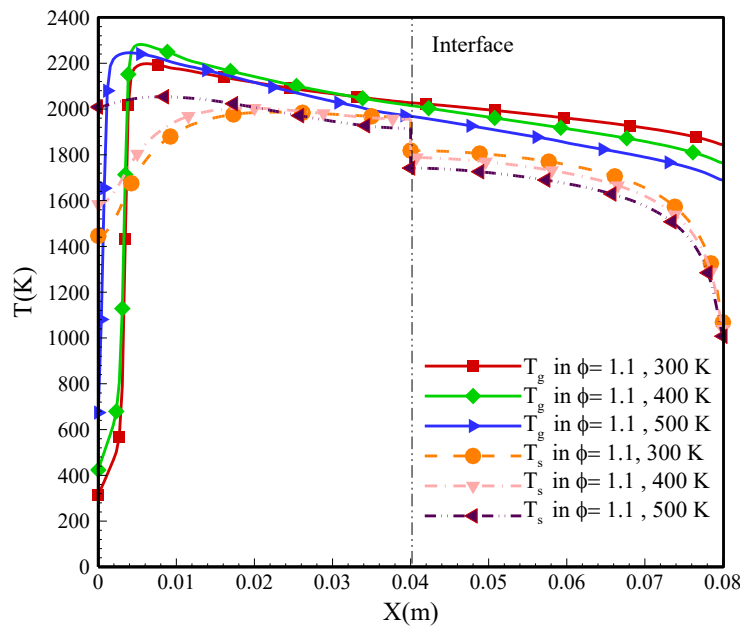


Figure 13- Gas and solid phases temperature diagrams in equivalence ratio=1.1
 شکل ۱۳- نمودارهای دمای فازهای گاز و جامد در نسبت هم ارزی $\phi = 1.1$

نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، با استفاده از شبیه سازی عددی، احتراق پیش آمیخته سوخت آمونیاک- متان در محیط متخلخل در نرم افزار فلوئنت انجام شد که هدف آن بررسی اثر تغییر چگالی حفره تخلخل، درصد تخلخل، اثر پیش گرم کردن دمای ورودی سوخت و هوا، بر پارامترهای عملکردی شعله از جمله دمای فاز گاز و جامد و پایداری مشعل بررسی شد. در این پژوهش برای اعتبار سنجی نتایج، از سینتیک شیمیایی ژو و همکاران با ۶۹ گونه و ۳۸۹ واکنش با نتایج تجربی روچا و همکاران استفاده شد که

نتایج نمودار توزیع دمای فاز گاز و جامد تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی داشت. در ادامه نتایج حاصل از مطالعات فوق به صورت خلاصه ارائه می‌شوند.

۱- با توجه به معادلات در این پژوهش مشاهده شد که ارتباط مستقیمی بین چگالی حفره تخلخل و ضریب انتقال حرارت حجمی برقرار است. به بیان دیگر هنگامی که اثر چگالی حفره تخلخل مورد مطالعه قرار می‌گیرد انگار همان اثر و ضریب انتقال حرارت حجمی بررسی می‌شود. به طور کلی با افزایش چگالی حفره تخلخل (ضریب انتقال حرارت حجمی) اختلاف دمای دو فاز کاهش و با کاهش چگالی حفره تخلخل (ضریب انتقال حرارت حجمی) اختلاف دمای فازهای گاز و جامد افزایش می‌یابد.

۲- زمانی که چگالی حفره تخلخل کمتر باشد، دمای گاز خروجی نیز بیشتر است و بالعکس با افزایش چگالی تخلخل دمای گاز خروجی کاهش و جبهه شعله به سمت بالادست حرکت می‌کند.

۳- با توجه به معادلات در این پژوهش مشاهده شد که تغییر در کمیت تخلخل بر روی پارامتر ضریب انتقال حرارت حجمی اثر می‌گذارد بدین صورت که با افزایش تخلخل، d_p متناسب با $\varepsilon^{1/2}$ زیاد می‌شود. متعاقباً با افزایش d_p ضریب انتقال حرارت حجمی کاهش می‌یابد همچنین تخلخل بر روی ضریب هدایت مؤثر فاز جامد ($\lambda_{s,eff}$) تأثیر می‌گذارد.

۴- با افزایش تخلخل، ضریب هدایت مؤثر جامد زیاد می‌شود. با افزایش تخلخل در دو ناحیه و افزایش ضریب هدایت مؤثر جامد، جبهه شعله به سمت بالادست مشعل حرکت می‌کند و در واقع هرچقدر تخلخل بیشتر شود حدود شعله‌وری و پایداری مشعل افزایش می‌یابد.

۵- افزایش تخلخل تا حدودی باعث افزایش کسر مولی آب و کاهش کسر مولی دی‌اکسید کربن در خروجی مشعل می‌شود همچنین با افزایش تخلخل توزیع دما و سرعت در محیط متخلخل یکنواخت تر می‌شود.

۶- با افزایش دمای مخلوط سوخت و هوای ورودی، دمای فاز گاز در قسمت ابتدایی مشعل و در ادامه در ناحیه‌ی پیش‌گرمایش افزایش بیاید این روند افزایشی دمای مخلوط گازها تا انتهای مشعل ادامه دارد. نمودار دمای فاز جامد نیز رفتاری مشابه نمودار دمای فاز گاز از خود بروز می‌دهد. از طرفی با افزایش دمای ورودی شعله، جبهه شعله در تمام نسبت هم‌ارزی‌ها به سمت بالادست مشعل کشیده می‌شود.

منابع

- [1] W. S. Chai, Y. Bao, P. Jin, G. Tang, and L. Zhou, "A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, vol. 147, pp.11254, 2021.
- [2] A. Yapicioglu, and I. Dincer, "A review on clean ammonia as a potential fuel for power generators," *Renewable and sustainable energy reviews.*, vol. 103, pp. 96-108, 2019.
- [3] M. T. Smucker, and J. L. Ellzey, "Computational experimental study of a two- section porous burner," *Combustion Science Technology.*, vol.176(8), pp.1171- 1189, 2004.
- [4] M. Farzaneh, M. Shafiey, R. Ebrahimi, M. Shams, and M. Shafiey, "Numerical simulation of premixed combustion in a porous burner with integrated heat exchanger," *Heat Mass Transfer.*, vol.48(7), pp.1273-1283, 2012.
- [5] S. M. Hashemi, and S. A. Hashami, "Flame stability analysis of the premixed methane- air combustion in a two- layer porous media burner by numerical simulation," *Fuel.*, vol.202, pp.56-65, 2017.
- [6] S. A. Hashemi, M. Nikfar, and S. A. Ghorashi, "Numerical study of the effect of thermal boundary conditions and porous medium properties on the combustion in a combined porous-free flame burner," *Journal of Power and Energy.*, Vol. 232(7), pp. 799-811, 2018.
- [7] E. Kroch, "Ammonia-A fuel for motor buses," *J. Inst. Pet.*, vol. 31, pp. 213-223, 1945.
- [8] C. S. Mørch, A Bjerre, M. P. Gøttrup, S. C. Sorenson, and J. Schramm, "Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system," *Fuel.*, Vol. 90, pp. 854-864, 2011.
- [9] A. Valera-Medina, Morris, S. Runyon, J. Pugh, D. G. Marsh, R. Beasley, and P. Hughes, "Ammonia, methane and hydrogen for gas turbines," *Energy Procedia.*, vol. 75, pp.118-123,2015.
- [10] O. Kurata, N. Iki, T. Matsunuma, T. Inoue, T. Tsujimura, H. Furutani, H. Kobayashi, and A. Hayakawa, "Performances and emission characteristics of NH3-air and NH3-CH4-air combustion gas-turbine power generations," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 36, pp.3351-3359, 2017

- [11] Z. Tian, Y. Li, L. Zhang, P. Glarborg, and F. Qi, "An experimental and kinetic modeling study of premixed NH₃/CH₄/O₂/Ar flames at low pressure. *Combust, " Flame.*, vol. 156, pp.1413–1426, 2009.
- [12] E. C. Okafor, Y. Naito, S. Colson, A. Ichikawa, T. Kudo, A. Hayakawa, and H. Kobayashi, "Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of CH₄-NH₃-air premixed flames. *Combust, " Flame.*, vol. 187, pp.185–198, 2018.
- [13] H. Xiao, A. Valera-Medina, and P. J. Bowen, "Study on premixed combustion characteristics of co-firing ammonia/methane fuels. " *Energy.*, vol. 140, pp.125–135, 2017.
- [14] C. F. Ramos, R. C. Rocha, P. M. R. Oliveira, M. Costa, and X. S. Bai, "Experimental and kinetic modelling investigation on NO, CO and NH₃ emissions from NH₃/CH₄/air premixed flames, " *Fuel.*, vol. 254, pp.115693, 2019.
- [15] H. Nozari, O. Tuncer, and A. Karabeyoglu, "Evaluation of ammonia-hydrogen-air combustion in SiC porous medium based burner, " *Energy Procedia.*, vol. 142, pp. 674–679, 2017.
- [16] C. Brackmann, V. A. Alekseev, B. Zhou, E. Nordström, P. E. Bengtsson, Z. Li, M. Aldén, and A. A. Konnov, "Structure of premixed ammonia + air flames at atmospheric pressure: Laser diagnostics and kinetic modeling, " *Combustion and Flame.*, vol. 163, pp. 370–38, 2016.
- [17] C. Rodolfo, C. Rocha, Filipe Ramos, Mário Costa, and X. S. Bai. "Combustion of NH₃/CH₄/Air and NH₃/H₂/Air Mixtures in a Porous Burner: Experiments and Kinetic Modeling," *Energy & Fuels.*, vol. 33 (12), pp. 12767-12780, 2019.
- [18] S. M. Hashemi, P. Wang, C. Mao, K. Cheng, Y. Sun, and Z. Yin, "Combustion Performance of the Premixed Ammonia-Hydrogen-Air Flame in Porous Burner," *Combustion Science and Technology.*, 2023.
- [19] R. C. Catapan, A. A. M. Oliveira, and M. Costa, "Non-uniform velocity profile mechanism for flame stabilization in a porous radiant burner, " *Experimental Thermal and Fluid Science.*, vol. 35, pp. 172-179, 2011.
- [20] V. Zanganeh, and A. Alipoor, "Stability study of hydrogen-air flame in a conical porous burner, " *Energy.*, vol. 215, pp.119140, 2021.
- [21] S. Ergun, "Fluid flow through packed columns, " *Chem. Eng. Progress.*, vol. 48, pp. 89-94, 1952.
- [22] D. A. Nield, and A. Bejan, 3rd edition., *Convection in Porous Media*. New York:Springer Science Business Media, 2006.
- [23] X. Fu, R. Vistanka, and J. P. Gore, "Measurement and correlation of volumetric heat transfer coefficient of cellular ceramics," *Experimental Thermal and Fluid Science.*, vol. 17, pp. 285- 293, 1998.
- [24] X. Fu, "Modeling of A Submerged Flame Porous Burner/Radiant Heater," Ph.D. Thesis, Dept. Mech. Eng., Purdue Univ., USA, 1997.
- [25] S. Gauthier, A. Nicolle, and D. Baillis, "Investigation of flame structure and nitrogen oxides formation in lean porous premixed combustion of natural gas/ hydrogen blends," *International Journal of Hydrogen Energy.*, vol. 33, pp. 4893-4905, 2008.
- [26] L. Xu, Y. Chang, M. Treacy, Y. Zhou, M. Jia, and X. S. Bai, "A skeletal chemical kinetic mechanism for ammonia/n-heptane combustion, " *Fuel.*, vol. 331,2023.

English Abstract

Numerical investigation on the effect of porosity geometric parameter in ammonia-methane porous media burner

Mehdi Sepahvand¹, Seyed Abdolmehdi Hashemi^{2*}, Ali Arefmanesh³

1- Mechanical Engineering Department, Kashan University, Kashan, Iran, Mehdisepahvand97@grad.kashanu.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kashan, Iran, Hashemi@kashanu.ac.ir

3- Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kashan, Iran, Arefmanesh@kashanu.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2024/08/14, Received in revised form: 2024/09/08, Accepted: 2024/09/15)

The purpose of this study is to investigate the effect of geometric properties of porosity, including the pore density ranging 10-40 ppi, percentage of porosity 0.7 and 0.9, and the effect of air preheating in the range of 300-500 K at three different equivalence ratios of 0.7, 1, 1.1 on the temperature distribution and burner stability of a porous medium in ammonia-methane fuel. For this purpose, finite volume method and SIMPLE algorithm were used in Fluent 22 software and a chemical kinetics including 69 species and 389 reactions. According to the relation of pore density and porosity with volumetric heat transfer coefficient, changes in two first parameters lead changes in heat transfer coefficient. The results showed that the temperature difference between the gas and solid phases decreases as pore density increases. At the density of 10 ppi, the highest gas temperature was observed at the outlet, and the maximum temperature difference between the gas and solid phase in this case is about 590 K, and at highest density, the lowest gas temperature was observed, and the temperature difference between the phases Gas and solid in this case is about 243 K. By increasing the porosity from 0.7 to 0.9, heat transfer coefficient decreases and the limits of flammability and burner stability increase. Finally, it was observed that at a fixed equivalence ratio, with an increase in the inlet temperature up to 500 K, the flame front is drawn to the upstream side of the burner. Also, at a fixed inlet temperature, with an increase in the equivalence ratio from 0.7 to 1.1, the stability has increased and flame position is drawn upstream.

Keywords: Porous burner, Ammonia fuel, Flame stability, Porosity, Equivalence Ratio