

بررسی تأثیر پارامترهای بدون بعد بر احتراق مخلوط سوخت بدون کربن آمونیاک / متان درون محیط متخلخل

علی طلوعی^۱، آیت قره‌قانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، toloie_ali@mecheng.iust.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ayat_gharehghani@iust.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲)

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی احتراق پیش آمیخته آمونیاک / متان در محیط متخلخل و تأثیر پارامترهای مختلف بر ویژگی‌های احتراق و تولید آلاینده‌ها می‌پردازد. استفاده از آمونیاک به‌عنوان یک سوخت بدون کربن در ترکیب با متان، چالش‌هایی نظیر کاهش کیفیت احتراق، پایداری شعله و افزایش تولید اکسیدهای نیتروژن (NOx) را به‌همراه دارد. به‌منظور رفع این مشکلات، استفاده از محیط متخلخل در محفظه احتراق می‌تواند به بهبود شرایط احتراق و کاهش تولید آلاینده‌ها کمک کند. برای بررسی این ایده در این تحقیق، تأثیر پارامترهای مختلف نظیر تخلخل محیط متخلخل (۰/۵ تا ۱/۰)، کسر سوخت آمونیاک در مخلوط آمونیاک / متان (۰/۱ تا ۰/۹) و نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا (۰/۵ تا ۱/۵) به‌طور عددی بررسی و نتایج حاصل با داده‌های تجربی مقایسه شده است. برای شبیه‌سازی احتراق پیش آمیخته آمونیاک / متان از یک مدل آشفتگی $k - \epsilon$ با مکانیسم سینتیک شامل ۴۲ گونه و ۱۳۰ واکنش استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات تخلخل و نسبت سوخت، تأثیرات قابل توجهی بر دمای احتراق، انتشار گازهای آلاینده و پایداری شعله دارند. با کاهش سهم متان در سوخت با افزودن آمونیاک به ترکیب سوخت، کسر جرمی تولید دی‌اکسید کربن در محیط بدون تخلخل از ۳۹ درصد برای متان خالص به ۲۴ درصد برای ترکیب آمونیاک / متان کاهش می‌یابد که نشان‌گر کاهش ۳۸ درصد در کسر جرمی تولید دی‌اکسید کربن است. همچنین با استفاده از محیط متخلخل برای احتراق آمونیاک / متان در مقایسه با محیط بدون تخلخل کسر جرمی NOx از ۲۵۲۷ پی‌پی‌ام به ۲۳۱۹ پی‌پی‌ام کاهش می‌یابد که کاهش ۸/۲ درصد را نشان می‌دهد. همچنین در محیط متخلخل این کاهش در کسر جرمی تولید دی‌اکسید کربن برابر با ۳۳ درصد است. این نتایج اهمیت بهینه‌سازی هم‌زمان تخلخل، نسبت سوخت و نسبت هم‌ارزی در سیستم‌های احتراقی را برای کاهش آلاینده‌ها و افزایش کارایی فرایندهای احتراقی نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: احتراق محیط متخلخل، آمونیاک، متان، اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسید کربن

مقدمه

گرمایش جهانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی عصر حاضر مطرح و نیازمند اجرای برنامه‌های مؤثر برای کاهش آن امری حیاتی است. گازهای گلخانه‌ای که عمدتاً ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی نظیر نفت، گاز طبیعی و زغال‌سنگ هستند، نقش قابل توجهی در تشدید بحران گرمایش جهانی دارند. به‌ویژه، دی‌اکسید کربن تولید شده از سوختن سوخت‌های فسیلی، سهمی اساسی در افزایش دمای زمین دارد [۱]. با توجه به نقش مهمی که احتراق سوخت‌های فسیلی در انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کنند، جایگزینی سوخت‌های هیدروکربنی سنتی با سوخت‌های بدون کربن همچون آمونیاک پتانسیلی برای

کاهش عوامل مؤثر در گرمایش جهانی دارند. اما استفاده از آمونیاک به عنوان سوخت بدون کربن در مقایسه با متان چالش‌هایی را به همراه دارد. یکی از مشکلات اصلی، کاهش دما و سرعت شعله در هنگام احتراق آمونیاک است که می‌تواند منجر به کاهش کارایی سیستم‌های احتراقی شود. علاوه بر این، نیتروژن موجود در آمونیاک باعث انتشار بیش از حد اکسیدهای نیتروژن (NOx) می‌شود که از آلاینده‌های اصلی هوا محسوب می‌شوند. در حالی که متان به طور معمول تولید NOx کمتری دارد. بنابراین، با وجود اینکه آمونیاک یک سوخت پاک از نظر انتشار دی‌اکسید کربن است، مسائل مربوط به احتراق آن و تولید آلاینده‌ها می‌تواند مانع از استفاده گسترده آن به عنوان سوخت جایگزین شود. از این رو، بررسی پارامترهای مؤثر بر احتراق سوخت‌های بدون کربن مانند آمونیاک به عنوان جایگزین سوخت‌های هیدروکربنی بسیار مهم می‌شود [۲].

آمونیاک به عنوان یک سوخت بدون کربن پتانسیل تولید انرژی بدون آزاد کردن دی‌اکسید کربن را دارد؛ بنابراین در حال حاضر دانشمندان، صنایع و دولت‌ها سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی در توسعه راه‌حل‌های جامع برای تبدیل آمونیاک به سوختی مناسب برای سیستم‌های انرژی احتراقی انجام می‌دهند [۳]. در این راستا، یک مطالعه مروری جامع انجام شده [۴] که به چالش‌های اولیه مرتبط با احتراق آمونیاک می‌پردازد. این چالش‌ها شامل زمان تأخیر احتراق طولانی‌مدت، سرعت انتشار آهسته شعله (تقریباً پنج برابر کمتر از متان [۵]) و انتشار قابل توجه اکسید نیتروژن است [۶]. برای مقابله با این مسائل، راه‌حل‌های مختلفی از جمله ترکیب سوخت و استفاده از محیط‌های متخلخل در احتراق‌ها ارائه شده است. همچنین در این مطالعه سوخت ترکیبی آمونیاک با متان به عنوان یک سیستم سوخت هیبریدی به عنوان یک رویکرد عملی و امیدوارکننده ظاهر می‌شود که البته نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد. مطالعه مروری دیگری [۷] بینش‌هایی را در مورد پیشرفت‌های اخیر در احتراق آمونیاک، پوشش مکانیسم‌های واکنش، مکانیسم‌های تشکیل اکسید نیتروژن، استراتژی‌های کاهش و تأثیر افزودن آمونیاک بر تشکیل دوده ارائه می‌دهد. این مطالعه با بررسی دقیق مطالعات سینتیک بنیادی در مورد مکانیسم‌های اکسیداسیون و پیرو لیز آمونیاک آغاز می‌شود و به بحث در مورد استراتژی‌های مؤثر مختلف برای مهار انتشار اکسید نیتروژن می‌پردازد. سپس تأثیر افزودن آمونیاک بر تشکیل دوده در احتراق مبتنی بر هیدروکربن را بررسی می‌کند و مکانیسم‌های اساسی را روشن می‌کند. این مطالعه با پرداختن به چالش‌های فنی و ترسیم چشم‌انداز تحقیقات آینده در مورد احتراق آمونیاک با کاهش انتشار اکسید نیتروژن، دیدگاه‌های ارزشمندی را در این زمینه ارائه می‌کند. مطالعه دیگری [۸] روش‌های مختلفی را برای مقابله با چالش‌های احتراق آمونیاک ارائه می‌دهد. در این مطالعه اشاره شده است که احتراق غنی شده با اکسیژن و احتراق با ترکیبی از سوخت‌های دیگر همچون متان می‌تواند به طور قابل توجهی ویژگی‌های احتراق آمونیاک را بهبود بخشد.

محیط متخلخل تأثیر قابل توجهی بر عملکرد احتراق، رفع چالش‌ها و دستیابی به شعله آمونیاک پایدار را امکان‌پذیر می‌کند. با توجه به پیچیدگی احتراق در محیط متخلخل، نیاز به معادلات یکپارچه‌ای است که هم انتقال حرارت و هم سینتیک شیمیایی را در بر بگیرد. به طور کلی، احتراق در محیط متخلخل، بر خلاف احتراق غیر متخلخل، مزایای مختلفی مانند دامنه گسترده پایداری شعله، کاهش ناپایداری‌ها [۹] و افزایش انتقال حرارت [۱۰، ۱۱] را ارائه می‌دهد. استفاده از محیط متخلخل در احتراق بر پایداری شعله با مکانیسم چرخش گرما تأثیر می‌گذارد [۱۲، ۱۳]. به طور کلی، مرور منابع نشان می‌دهد که عملکرد احتراق با استفاده از محیط متخلخل بهبود یافته است [۱۴]. علاوه بر این، بررسی فاز سیال و جامد نیاز به توجه در معادلات حاکم برای اثر دقیق هر فاز دارد [۱۵]. در این راستا، مطالعه‌ای [۱۶] برای غلبه بر معایب و چالش‌های سوخت آمونیاک، استفاده از احتراق تثبیت شده در یک محیط متخلخل مورد بررسی قرار داده است. در این تحقیق، احتراق در یک فوم سرامیکی خنثی رخ می‌دهد و گرما با هدایت حرارتی و تابشی از محیط متخلخل به ناحیه پیش گرم به گردش در می‌آید که سرعت شعله و پایداری احتراق را افزایش می‌دهد و امکان احتراق را در طیف وسیعی از نسبت‌های هم ارزی فراهم می‌کند. در تحقیقات دیگری [۱۷، ۱۸] پیشرفت و کاربردهای احتراق محیط متخلخل بررسی شده است و ویژگی‌های محیط متخلخل معرفی شده است و بر اهمیت استفاده از محیط متخلخل در احتراق برای بهبود خواص احتراقی تأکید شده است. همچنین این مطالعات به رویکردهای

مدل‌سازی و پیش‌بینی پیشرفت‌های آینده احتراق در محیط متخلخل پرداخته‌اند. در تحقیق دیگری [۱۹] کاربردهای مشعل‌های متخلخل تشریح شده است که بر اصول اساسی توسعه و درک احتراق محیط متخلخل متمرکز شده است. تثبیت شعله به‌عنوان یک نقطه کانونی در مطالعه احتراق در محیط متخلخل در این تحقیقات برجسته است [۲۰]. بسیاری از محققان [۲۱] به تثبیت شعله پرداخته‌اند و قابلیت احتراق محیط متخلخل را برای دستیابی به عملکرد شعله پایدار در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف تأیید کرده‌اند. همچنین در مطالعات مختلف، محققان حرکت شعله را با استفاده از طرح‌های متنوعی از سیستم‌های احتراق محیط متخلخل، شامل ماتریس‌های متخلخل همگن [۲۲] و پیکربندی‌های چند لایه، آزمایش کرده‌اند. در حالی که محققان به طرح‌های متنوعی برای مشعل‌های جدید دست‌یافته‌اند، یکی از پیشرفت‌های اساسی ارائه‌شده [۲۳]، همبستگی بین ناحیه پیش‌گرمایش و ناحیه احتراق است. همچنین مطالعات اخیر تمرکز را به جنبه‌های دیگری از استفاده از محیط متخلخل مانند ضخامت [۲۴] و استفاده از هوای پیش‌گرم شده [۲۵] برای تصمیم‌گیری در مورد هندسه سیستم‌های احتراق متمرکز معطوف کرده است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، استفاده هم‌زمان محیط متخلخل و ترکیب سوخت آمونیاک / متان برای دستیابی به یک احتراق کارآمد و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده همچنان نیاز به بررسی بیشتر دارد.

مطالعه حاضر به بررسی احتراق پیش‌آمیخته آمونیاک / متان / اکسیژن در محیط متخلخل و پارامترهای تأثیرگذار در این احتراق می‌پردازد. همان‌طور که در منابع بررسی شده ذکر شده است، استفاده از آمونیاک به‌عنوان جایگزینی بدون کربن برای سوخت‌های هیدروکربنی، چالش‌های خاصی را به‌همراه دارد. یکی از مسائل مهم کاهش دما و سرعت شعله است که می‌تواند مانع انتقال حرارت کارآمد در سیستم‌های احتراقی شود. علاوه بر این، نیتروژن موجود در آمونیاک می‌تواند منجر به انتشار بیش از حد NOx شود که یک آلاینده اصلی هوا است. برای غلبه بر این چالش‌ها، استفاده مؤثر از محیط متخلخل در محفظه احتراق می‌تواند مفید باشد که نیاز به بررسی بیشتر دارد؛ لذا در کار حاضر اثر پارامترها بر احتراق مذکور به‌صورت عددی بررسی می‌شود و نتایج با داده‌های آزمایش‌های تجربی صحت‌سنجی می‌شود. بدین‌منظور اثر تخلخل محیط متخلخل (۰/۵ تا ۱/۰)، اثر کسر سوخت آمونیاک در سوخت ترکیبی آمونیاک / متان (۰/۱ تا ۰/۹) و اثر نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا (۰/۵ تا ۱/۵) بررسی می‌شود.

روش حل عددی

مدل عددی نقش مهمی در تأثیرگذاری بر همگرایی دینامیک سیالات محاسباتی، دقت راه‌حل‌ها و هزینه‌های محاسباتی ایفا می‌کند. در فرایند احتراق، مش‌ها باید دارای کیفیت بالایی باشند. پرداختن به معادلات حاکم بر جریان سیال و معادلات انتقال گونه‌ها در شبیه‌سازی احتراق ضروری است. در نتیجه، استفاده از یک روش عددی مناسب با یک شبکه قابل انطباق کارآمد بسیار مهم است.

در تحقیق حاضر، برای تحلیل احتراق از نرم‌افزار انس‌یس فلونت استفاده شده است. جریان پیش‌آمیخته آمونیاک / متان / اکسیژن با کسر مولی مختلف به‌صورت پیش‌آمیخته و با سرعت جریان ۰/۴۵ متر بر ثانیه وارد محفظه احتراق می‌شود. همچنین مدل‌سازی در حالت پایا اجرا می‌شود و از الگوریتم سیمپل برای حل کردن فشار و سرعت استفاده می‌شود و از معادلات آشفستگی $k - \epsilon$ استفاده شده است. معادلات حاکم در دامنه محاسباتی با استفاده از یک طرح مرتبه دوم گسسته می‌شود. همگرایی زمانی حاصل می‌شود که باقی‌مانده معادلات انرژی و معادلات حاکم دیگر به ترتیب به زیر 10^{-6} و 10^{-3} کاهش یابد تا از دقت نتایج اطمینان حاصل شود. مدل دقیق مکانسیم سینتیک ترکیب آمونیاک / متان که شامل ۴۲ گونه و ۱۳۰ واکنش است، استفاده شده است [۲۶]. جریان سیال پیش‌آمیخته در این تحقیق به‌طور تراکم‌پذیر و گاز ایده‌آل فرض می‌شود. شرایط مرزی در جدول ۱ به تفصیل شرح داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای استفاده شده در شرایط مرزی

Description [units]	Value
Inlet flow velocity magnitude [m/s]	0.45
Inlet flow Temperature [K]	300
Ambient pressure [KPa]	101
Wall thermal conductivity [W/mK]	20

شکل ۱ مدل فیزیکی سه بعدی محفظه احتراق در مقیاس مزو را نشان می‌دهد که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است. اصطلاح احتراق در مقیاس مزو نیز برای مواردی استفاده می‌شود که مقیاس‌های طول مشخصه بزرگ‌تر از ۱ میلی‌متر هستند؛ اما با ویژگی‌های احتراق در مقیاس میکرو سنجیده می‌شوند. دیواره احتراق دارای ضخامت ۰/۵ میلی‌متر است و طول و قطر محفظه احتراق ۶۰ میلی‌متر و ۶ میلی‌متر است. همچنین محفظه احتراق با کاربرد سیلیکون پر شده است که به‌عنوان محیط متخلخل وارد محفظه احتراق می‌شود.

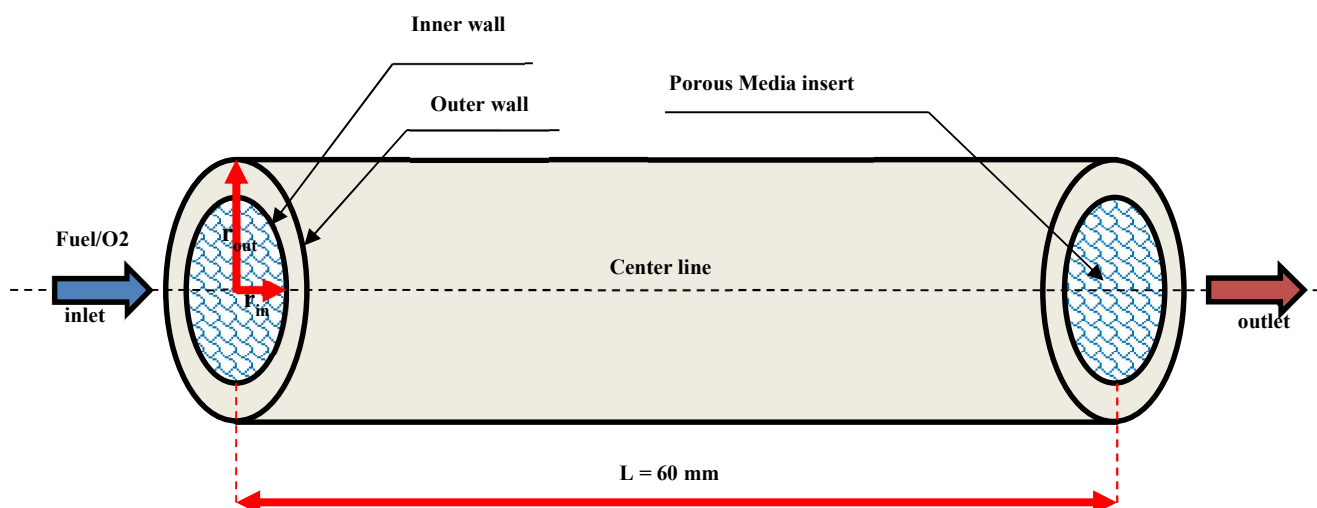


Figure 1- 3D physical model of the combustion chamber

شکل ۱- مدل فیزیکی سه بعدی محفظه احتراق

در مطالعه فعلی، کاربرد سیلیکون به‌عنوان محیط متخلخل استفاده شده است و خواص آن [۲۷] در جدول ۲ به تفصیل آمده است.

جدول ۲- خواص کاربرد سیلیکون [۲۷]

Table 2- Properties of silicon carbide [27]

Description [units]	SiC
Pore density ω [PPI]	10
Pore diameter D_p [mm]	1.34
Hydraulic diameter d_h [mm]	3.4
Cell size d_c [mm]	3.1
Specific surface s [1 / m]	978
thermal conductivity [W/mK]	400
specific heat [J/KgK]	750
Density [gr/cm ³]	3.1

استقلال از شبکه

حوزه محاسباتی با شبکه‌های دکارتی ساختار یافته برای دستیابی به هندسه دقیق مش‌بندی شده است. برای اطمینان از دقت شبیه‌سازی‌های عددی در پیکربندی‌های شبکه مختلف، یک مطالعه استقلال از مش با استفاده از سه شبکه محاسباتی مجزا

انجام شده است (۶۹۱۲ سلول، ۷۱۹۹۵ سلول و ۳۳۲۲۸۰ سلول). در شکل ۲ پروفیل‌های دمای دیوار نشان داده شده است. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که شبکه ۷۱۹۹۵ سلولی مناسب است، زیرا که پروفیل‌های دمایی شبکه‌های ۷۱۹۹۵ سلولی و شبکه‌های ۳۳۲۲۸۰ سلولی همپوشانی قابل توجهی دارند. این موضوع نشان می‌دهد که ۷۱۹۹۵ سلول دقت کافی برای مطالعه حاضر را ارائه می‌دهد. در نتیجه، یک مش با تراکم 0.75 میلی‌متر در هر سه جهت اتخاذ شده است که در مجموع ۷۱۹۵۵ سلول را برای شبیه‌سازی‌های بعدی تشکیل می‌دهد.

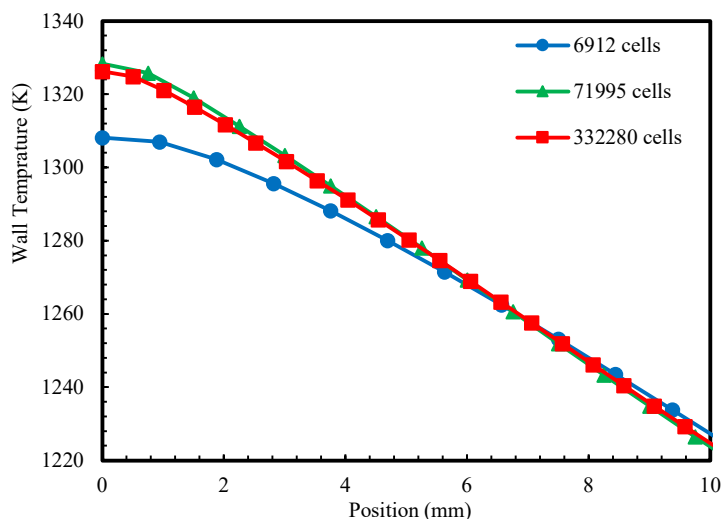


Figure 2- Checking network independence

شکل ۲- بررسی استقلال از شبکه

معادلات حاکم

استفاده از معادلات حاکم بی‌بعد شده در تحلیل پدیده‌های مهندسی، از جمله احتراق در محیط‌های متخلخل، دارای مزایای متعددی است. یکی از مهم‌ترین این مزایا، کاهش تعداد پارامترهای مستقل است که معادله‌ها را کنترل می‌کنند. با بی‌بعدسازی، تمامی پارامترهای فیزیکی و هندسی مسئله در قالب اعداد بی‌بعد ترکیب می‌شوند. این اعداد، به‌عنوان پارامترهای کلیدی، امکان مطالعه تأثیر هر عامل فیزیکی بر رفتار سیستم را به‌طور مستقل فراهم می‌کنند. به‌عنوان مثال، اعدادی مانند عدد رینولدز، عدد نسبت، و عدد دارسی در معادلات بی‌بعد شده می‌توانند اثر جریان، انتقال حرارت و نفوذپذیری محیط متخلخل را به‌صورت مشخص نمایان کنند.

مزیت دیگر بی‌بعدسازی، تعمیم‌پذیری نتایج و کاهش هزینه‌های محاسباتی و تجربی است. با استفاده از معادلات بی‌بعد شده، نتایج حاصل از یک آزمایش یا شبیه‌سازی می‌توانند برای گستره وسیعی از شرایط فیزیکی به کار روند، زیرا وابستگی به مقیاس‌های فیزیکی خاص از بین می‌رود. این ویژگی به مهندسان و پژوهشگران امکان می‌دهد که بدون نیاز به اجرای آزمایش‌های متعدد، رفتار سیستم را برای شرایط مختلف پیش‌بینی کنند. به‌طور خاص، در احتراق در محیط متخلخل، بی‌بعدسازی به فهم بهتر مکانیزم‌های ترکیبی مانند تأثیر نسبت سوخت به اکسیدکننده، اثر هدایت حرارتی، و واکنش‌های سطحی در مقیاس‌های مختلف کمک می‌کند. در این تحقیق از معادلات بی‌بعد با توجه به شرایط مفروض استفاده می‌شود. شرایط مفروض به کار گرفته شده در این تحقیق به شرح زیر است:

- ۱- محیط متخلخل همسانگرد، همگن و بدون هیچ‌گونه اثرات کاتالیزوری در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- احتراق در حالت پایا بررسی می‌شود.
- ۳- شرایط مرزی بدون لغزش در نظر گرفته می‌شود.

۴- جریان تحت تأثیر نیروهای گرانشی قرار نمی‌گیرد.

در این مطالعه، توصیف تخلخل (ϕ) شامل نسبت حجم منافذ به حجم کل داخل محفظه احتراق است. با فرض شرایط مذکور، معادلات حاکم بر معادلات بقای سیال و جامد در محیط متخلخل را می‌توان با معادله داری توسعه یافته برینک-فورچهایمر [۲۸] به صورت زیر مدل کرد:

معادله بی بعد شده پیوستگی

$$\frac{\partial \rho U}{\partial X} = 0 \quad (۱)$$

معادله بی بعد شده تکانه:

$$\frac{1}{\phi} \frac{2}{Re} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} - \frac{1}{\phi^2} \frac{\partial \rho U^2}{\partial X} - CP \frac{\partial P^*}{\partial X} - \frac{U}{Re Da} - \frac{c_0 \rho U^2}{\sqrt{Da}} = 0 \quad (۲)$$

معادله بی بعد شده آشفتگی k :

$$\frac{\phi}{Re} \frac{\partial^2 k}{\partial X^2} - \frac{\partial \rho U k}{\partial X} + \frac{2c_3 \phi}{Re} \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 - \frac{2\phi}{3} \rho k \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\phi}{\sqrt{Da}} \rho U k - \phi c_4 \rho \varepsilon = 0 \quad (۳)$$

معادله بی بعد شده آشفتگی ε :

$$\frac{\phi}{Re} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial X^2} - \frac{\partial \rho U \varepsilon}{\partial X} + \frac{2c_3 \phi}{Re} \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 c_1 \frac{\varepsilon}{k} - \frac{2}{3} \phi \rho k \frac{\partial U}{\partial X} c_1 \frac{\varepsilon}{k} + \frac{c_2 \phi}{\sqrt{Da}} \rho U \varepsilon - \phi c_4 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} = 0 \quad (۴)$$

معادله بی بعد شده انرژی:

$$\frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 T^*}{\partial X^2} - \frac{\partial U T^*}{\partial X} + \frac{L}{\rho_{f0} c_p u_0 T_0} \Delta H S_{fu} = 0 \quad (۵)$$

معادله بی بعد شده انتقال گونه‌ها:

$$\frac{1}{Le Pe} \frac{\partial}{\partial X} \left(\rho \frac{\partial Y_i^*}{\partial X} \right) - \frac{\partial \rho U Y_i^*}{\partial X} - \frac{L \phi}{\rho_{f0} u_0 Y_{i0}} R_i S_{fu} = 0 \quad (۶)$$

پارامترهای در نظر گرفته شده برای بی بعدسازی:

$$U = \frac{u}{u_0}, \quad X = \frac{x}{L}, \quad \rho = \frac{\rho_f}{\rho_{f0}}, \quad \mu + \mu_{t\phi} = \mu_t, \quad \mu_{t\phi} = \rho_f c_\mu \frac{k_x^2}{\varepsilon_x}, \quad Re = \frac{\rho_{f0} u_0 L}{\mu_t}, \quad Da = \frac{K}{L^2}, \quad P^* = \frac{P}{P_0}, \quad CP = \frac{P_0}{\rho_{f0} u_0^2}, \quad k = \frac{k_x}{k_{x0}}, \quad \varepsilon = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{x0}}, \quad T^* = \frac{T}{T_0}, \quad \alpha_T = \frac{\lambda_{eff}}{L \rho_{f0} c_p u_0}, \quad \alpha_M = \frac{D_{eff}}{L u_0}, \quad Le = \frac{\alpha_T}{\alpha_M}, \quad Y_i^* = \frac{Y_i}{Y_{i0}}, \quad Pe = \frac{u_0 L}{\alpha_T}, \quad c_3 = \frac{u_0^2}{k_{x0}}, \quad c_4 = \frac{L \varepsilon_{x0}}{u_0 k_{x0}} \quad (۷)$$

ضریب انتقال حرارت هدایتی مؤثر

$$\lambda_{eff} = \phi \lambda_f + (1 - \phi) \left(\lambda_p + \frac{16\sigma T^3}{3\beta_r} \right) + \lambda_{tortuosity} + \lambda_{dispersion} + \lambda_{turbulence} \quad (۸)$$

معادله فوق شامل اثرات مختلفی است که هر یک به مکانیزم خاصی از انتقال حرارت مربوط هستند. ترم اول مربوط به سهم انتقال حرارت هدایتی سیال موجود در محیط متخلخل است. ترم دوم به انتقال حرارت در فاز جامد (محیط متخلخل) مرتبط است که شامل دو بخش انتقال حرارت هدایتی و تابشی می‌شود. ترم سوم مربوط به اثر مسیرهای پیچ‌درپیچ (تورتوسیتی) بر انتقال حرارت است. در محیط‌های متخلخل، گرما مسیرهای غیرمستقیم را طی می‌کند که باعث کاهش مؤثر انتقال حرارت می‌شود. ترم چهارم نمایانگر انتقال حرارت ناشی از پراکندگی حرارتی است. در جریان‌های جابه‌جایی در محیط متخلخل، به دلیل تغییرات سرعت سیال، گرما به صورت پراکنده انتقال می‌یابد. این مکانیزم زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که جریان با سرعت‌های مختلف در تخلخل‌ها رخ دهد. ترم آخر به انتقال حرارت ناشی از آشفتگی جریان اشاره دارد. اگر جریان سیال در محیط متخلخل به صورت آشفته باشد، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

چگالی سیال با استفاده از قانون گاز ایده‌آل محاسبه می‌شود:

$$p = \rho_f RT_f \quad (9)$$

در مدل‌سازی محیط متخلخل به کار رفته در این مطالعه، ناحیه تعیین‌شده به عنوان محیط متخلخل به عنوان سیال مشخص می‌شود. در عین حال، نفوذپذیری میزان آسانی حرکت مخلوط سیال در محیط متخلخل را اندازه‌گیری می‌کند. برای این همبستگی از طریق معادله کلاسیک اقتباس شده کار من-کوزنی ارائه شده در زیر استفاده شده است [۲۹]:

$$K = C \frac{\phi^{2+m}}{(1-\phi)^2} \quad (10)$$

در نتیجه، تعیین ضرایب نفوذپذیری و مقاومت اینرسی با استفاده از معادلات نرم‌افزار [۳۰] انجام می‌شود که در زیر فرموله شده است:

$$K = \frac{D_p^2}{150} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (11)$$

$$c_0 = \frac{3.5(1-\phi)}{D_p \phi^3} \quad (12)$$

که در آن قطر منافذ را می‌توان بر اساس همبستگی زیر به دست آورد [۳۱]:

$$D_p = \frac{0.0254}{\omega} \times \sqrt{\frac{4\phi}{\pi}} \quad (13)$$

با توجه به ترکیب سوخت و اکسیدکننده، نمایش کسر مولی نسبت هم ارزی نشان دهنده نسبت سوخت مصرف شده در فرایند احتراق است. این تحقیق نسبت هم ارزی را بر حسب کسرهای مولی بیان می‌کند که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi = \frac{\left(\frac{n_{\text{fuel}}}{n_{\text{oxidizer}}}\right)_{\text{actual}}}{\left(\frac{n_{\text{fuel}}}{n_{\text{oxidizer}}}\right)_{\text{stoichiometric}}} \quad (14)$$

که در اینجا، n مول‌ها را در شرایط واقعی و استوکیومتری نشان می‌دهد.

صحت‌سنجی مدل‌سازی

برای اعتبارسنجی دقت و سازگاری مدل عددی مورد استفاده در مطالعه حاضر، نتایج شبیه‌سازی برای توزیع دمای دیوار و تولید اکسیدهای نیتروژن با تحقیقی آزمایشگاهی و عددی [۳۲] مقایسه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، تطابق قابل توجهی در توزیع دما و اکسیدهای نیتروژن بین دو تحقیق مشهود است. حداکثر خطا مشاهده شده ۴/۵ درصد است. به‌طور کلی، هم از نظر کمیت و هم از نظر کیفیت، شبیه‌سازی با یافته‌های داده‌های مرجع مطابقت نزدیکی دارد.

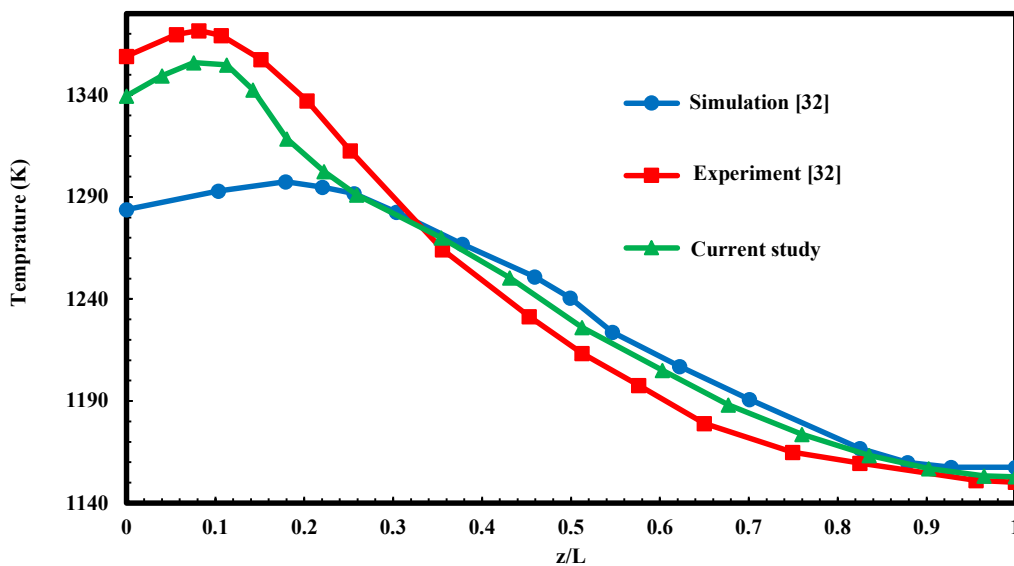
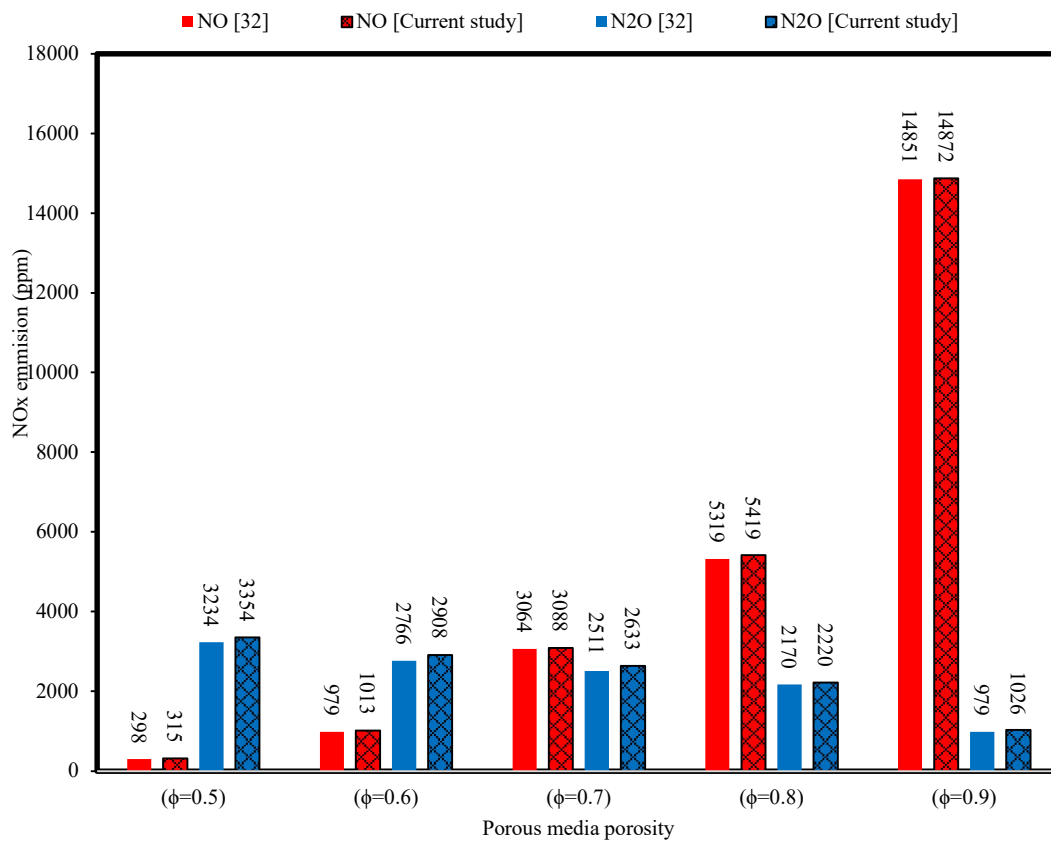


Figure 3- Modeling validation with reference article [32]
 شکل ۳- صحت‌سنجی مدل‌سازی با مقاله مرجع [۳۲]

بحث روی نتایج

مطالعه حاضر بر روی احتراق پیش آمیخته آمونیاک / متان در محیط متخلخل تمرکز دارد. سه پارامتر کسر مولی آمونیاک بین ۰/۱ تا ۰/۹، نسبت هم ارزی بین ۰/۵ به ۱/۵ و تخلخل محیط متخلخل بین ۰/۵ تا ۰/۹ بررسی می‌شوند تا به بالاترین دمای دیواره، کمترین انتشار دی‌اکسید کربن و اکسید نیتروژن دست یابیم. در این راستا تأثیر اعداد بی‌بعد را نیز بررسی می‌کنیم. عدد رینولدز محیط متخلخل (Re_p) در تعیین رژیم جریان (آهسته، انتقالی یا آشفته) در محفظه‌های احتراق، تأثیرگذاری بر اختلاط سوخت و هوا، پایداری شعله و انتقال حرارت بسیار مهم است. اعداد رینولدز پایین منجر به اختلاط کندتر و احتراق ناکارآمد می‌شود که باعث احتراق ناقص و انتشار بیشتر می‌شود، در حالی که اعداد رینولدز بالاتر باعث بهبود اختلاط و راندمان احتراق می‌شود اما ممکن است منجر به ناپایداری شعله و افزایش انتشار NOx شود. عوامل طراحی محفظه احتراق مانند اندازه، شکل، نوع سوخت و سرعت جریان بر عدد رینولدز تأثیر می‌گذارند و باید به‌دقت مدیریت شوند. شرایط عملیاتی مانند فشار و دما نیز بر عدد رینولدز تأثیر می‌گذارد و بر خواص سیال تأثیر می‌گذارد. مدیریت صحیح عدد رینولدز برای عملکرد مؤثر مشعل، شعله‌های پایدار، انتقال حرارت مؤثر و به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای ضروری است. رژیم‌های جریان در محیط متخلخل به‌صورت (الف) رژیم جریان داریسی یا خزشی ($Re_p \leq 1$)، (ب) رژیم جریان فورشه‌ایمر ($1 < Re_p \leq 150$)، (ج) رژیم پس از رژیم جریان فورشه‌ایمر (جریان آرام ناپایدار، $150 < Re_p \leq 300$)، و (د) جریان کاملاً آشفته ($Re_p > 300$) تقسیم بندی می‌شوند که در شکل ۴ آمده است.

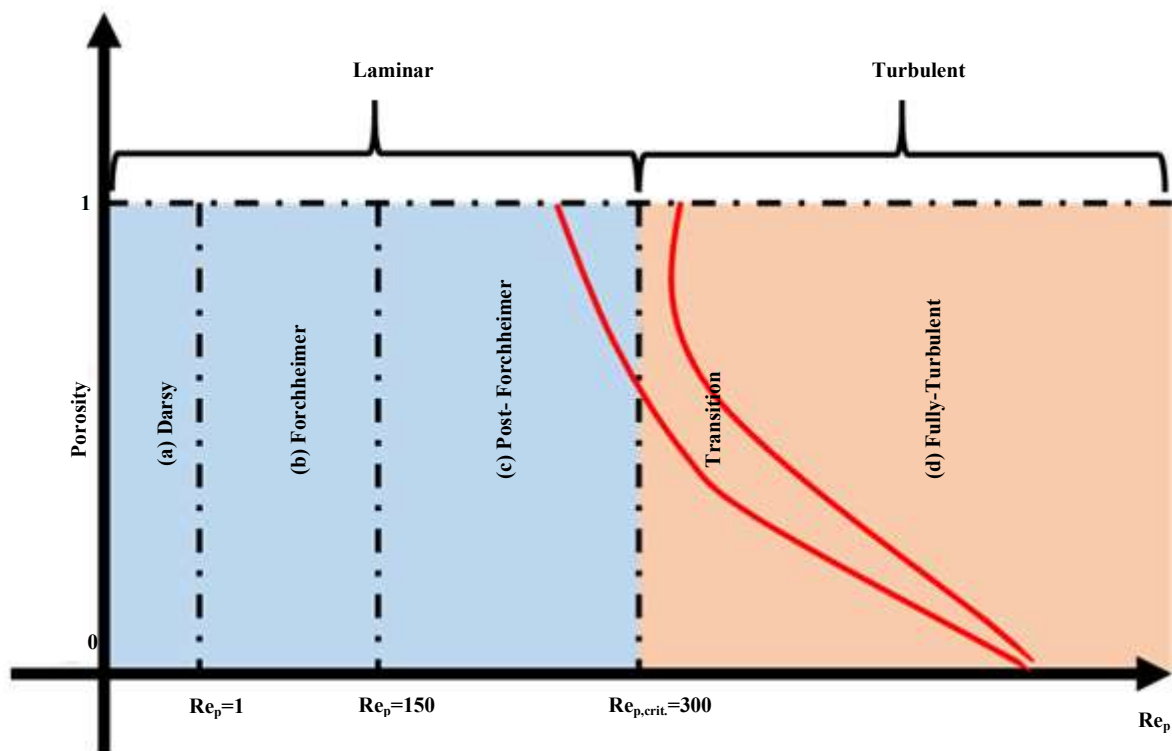


Figure 4- Flow regimes over permeable porous media
 شکل ۴- رژیم‌های جریان بر روی محیط‌های متخلخل نفوذپذیر

عدد پکلت (Pe) نشان‌دهنده نسبت انتقال جابه‌جایی به انتقال رسانشی (یا نفوذی) است و در محیط‌های متخلخل نقش

مهمی در توصیف انتقال حرارت و جرم دارد. در معادلات انتقال، عدد پکلت به شکل معکوس ظاهر می‌شود و مقدار آن تعیین می‌کند که آیا انتقال جابه‌جایی (ناشی از جریان سیال) غالب است یا انتقال رسانی / نفوذی (ناشی از مکانیزم‌های مولکولی). در محیط متخلخل، خاموشی شعله به تعادل بین انتقال گرما (برای پیش‌گرمایش مخلوط واکنش‌پذیر) و مصرف گرما در واکنش شیمیایی بستگی دارد. اگر عدد پکلت خیلی بزرگ باشد، جریان سریع سیال ممکن است گرمای تولید شده توسط واکنش را به سرعت از ناحیه واکنش دور کند، و این می‌تواند منجر به خاموشی شعله شود، چرا که پیش‌گرمایش کافی برای ادامه واکنش فراهم نمی‌شود. از سوی دیگر، اگر عدد پکلت بسیار کوچک باشد، گرما عمدتاً از طریق رسانش منتقل می‌شود، و در این حالت نیز ممکن است شعله خاموش شود، زیرا گرمای تولیدی نمی‌تواند به‌طور مؤثر به مخلوط واکنش‌پذیر برسد. در محیط‌های متخلخل، اگر $Pe \leq 65$ شعله خاموش شود زیرا گرما سریع‌تر از تولید شده توسط واکنش‌های شیمیایی به ماتریکس متخلخل منتقل می‌شود. با توجه به این موضوع و با توجه به اینکه عدد پکلت به قطر محفظه متخلخل بستگی دارد که به نوبه خود تحت تأثیر تخلخل است، در شرایط این مدل تخلخل را نمی‌توان زیر $0/5$ بهینه کرد. علاوه بر این، بر اساس ادبیات موجود، تخلخل محیط متخلخل معمولاً بیش از $0/9$ در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین مقدار $0/9$ به عنوان حد بالایی برای تخلخل انتخاب می‌شود. عدد دارسی (Da) نسبت نرخ واکنش شیمیایی به نرخ انتقال جرم است و در محیط‌های متخلخل، تأثیر کلیدی بر انتقال گرما، جرم، و پایداری شعله دارد. این عدد به‌طور مستقیم به نفوذپذیری محیط (K) و قطر مشخصه سیستم وابسته است و بیانگر این است که جریان در محیط متخلخل چقدر توسط ساختار آن کنترل می‌شود. نفوذپذیری به‌طور مستقیم به تخلخل و ساختار محیط متخلخل وابسته است. محیط‌های با تخلخل بالاتر معمولاً نفوذپذیری بیشتری دارند، زیرا فضای باز بیشتری برای جریان سیال وجود دارد. رابطه نفوذپذیری و تخلخل معمولاً از مدل‌هایی مانند معادله کارمن-کوزنی استخراج می‌شود. به این ترتیب، عدد دارسی با افزایش تخلخل افزایش می‌یابد و رفتار جریان و انتقال در محیط متخلخل را تغییر می‌دهد. در محیط‌های با عدد دارسی کوچک (نفوذپذیری کم)، جریان سیال به شدت محدود شده و انتقال جرم و گرما عمدتاً از طریق رسانش و نفوذ صورت می‌گیرد. این می‌تواند باعث کندی در تأمین مواد واکنش‌پذیر به جبهه شعله و در نتیجه خاموشی شعله شود. در مقابل، عدد دارسی بزرگ نشان‌دهنده محیطی با نفوذپذیری بالا است که در آن انتقال جابه‌جایی غالب است، اما اگر جریان خیلی سریع باشد، گرمای لازم برای پیش‌گرمایش مخلوط واکنش‌پذیر ممکن است از دست برود.

عدد لوئیس (Le) نسبت نفوذ حرارتی به نفوذ مولکولی یک گونه شیمیایی است و تأثیر مستقیم بر رفتار انتقال حرارت و جرم در فرایند احتراق دارد. در معادلات انتقال در محیط متخلخل، عدد لوئیس تعیین می‌کند که آیا انتقال حرارت سریع‌تر از انتقال جرم رخ می‌دهد یا بالعکس. اگر $(Le > 1)$ ، انتقال حرارت نسبت به جرم غالب است، در حالی که اگر $(Le < 1)$ ، انتقال جرم بر انتقال حرارت غالب خواهد بود. در احتراق محیط‌های متخلخل، عدد لوئیس نقش کلیدی در تعیین ساختار شعله، پایداری آن، و فرایند خاموشی ایفا می‌کند. این اثرات به دلیل پیچیدگی مسیرهای انتقال (تورتوسیتی) و پراکندگی حرارتی و جرمی تشدید می‌شود. بنابراین، عدد لوئیس یکی از پارامترهای مهم برای طراحی و تحلیل سیستم‌های احتراقی در محیط متخلخل است و نقش آن در پایداری شعله به‌ویژه در شرایط مرزی و نزدیک به خاموشی اهمیت بیشتری دارد.

تخلخل محیط متخلخل (ϕ) تأثیر قابل توجهی بر فرایند احتراق دارد، زیرا بر توزیع جریان، انتقال حرارت و نرخ واکنش‌های شیمیایی تأثیر می‌گذارد. افزایش تخلخل معمولاً باعث کاهش سطح تماس جامد-گاز شده و در نتیجه میزان تبادل حرارتی بین شعله و ساختار متخلخل را کاهش می‌دهد. این امر می‌تواند دمای شعله را افزایش داده و تأثیر به سزایی بر پایداری احتراق داشته‌باشد. از سوی دیگر، تخلخل کمتر موجب افزایش هدایت حرارتی و توزیع یکنواخت‌تر دما در محیط شده که می‌تواند به بهبود عملکرد احتراقی و کاهش تشکیل آلاینده‌هایی مانند NOx منجر شود. بنابراین، انتخاب میزان تخلخل مناسب در طراحی سیستم‌های احتراقی با محیط متخلخل نقش کلیدی در کنترل ویژگی‌های شعله و بهره‌وری احتراق ایفا می‌کند. شکل ۵ تأثیر حضور محیط متخلخل را بر میزان تولید دی‌اکسید کربن در فرایند احتراق متان و مخلوط آمونیاک / متان نشان می‌دهد. نتایج

نشان می‌دهد که استفاده از محیط متخلخل باعث افزایش تولید دی‌اکسید کربن در هر دو حالت شده است. در احتراق متان با اکسیژن، کسر جرمی تولید دی‌اکسید کربن در محیط متخلخل ۴۴ درصد و در محیط بدون تخلخل ۳۹ درصد است که بیانگر بهبود تبدیل کربن به دی‌اکسید کربن در حضور محیط متخلخل است. به‌طور مشابه، در احتراق ترکیب آمونیاک / متان، کسر جرمی تولید دی‌اکسید کربن در محیط متخلخل ۲۸ درصد و در محیط بدون تخلخل ۲۴ درصد است. این نتایج نشان می‌دهد که محیط متخلخل می‌تواند احتراق را به سمت فرآیند کامل‌تر سوق دهد و تولید گازهای احتراقی را تحت‌تأثیر قرار دهد. همان‌طور که مشخص است با کاهش سهم متان در سوخت با افزودن آمونیاک به ترکیب سوخت، کسر جرمی تولید دی‌اکسید کربن در محیط بدون تخلخل از ۳۹ درصد برای متان خالص به ۲۴ درصد برای ترکیب آمونیاک / متان کاهش می‌یابد که نشان‌گر کاهش ۳۸ درصد در کسر جرمی تولید دی‌اکسید کربن است. همچنین در محیط متخلخل این کاهش در کسر جرمی تولید دی‌اکسید کربن برابر با ۳۳ درصد است.

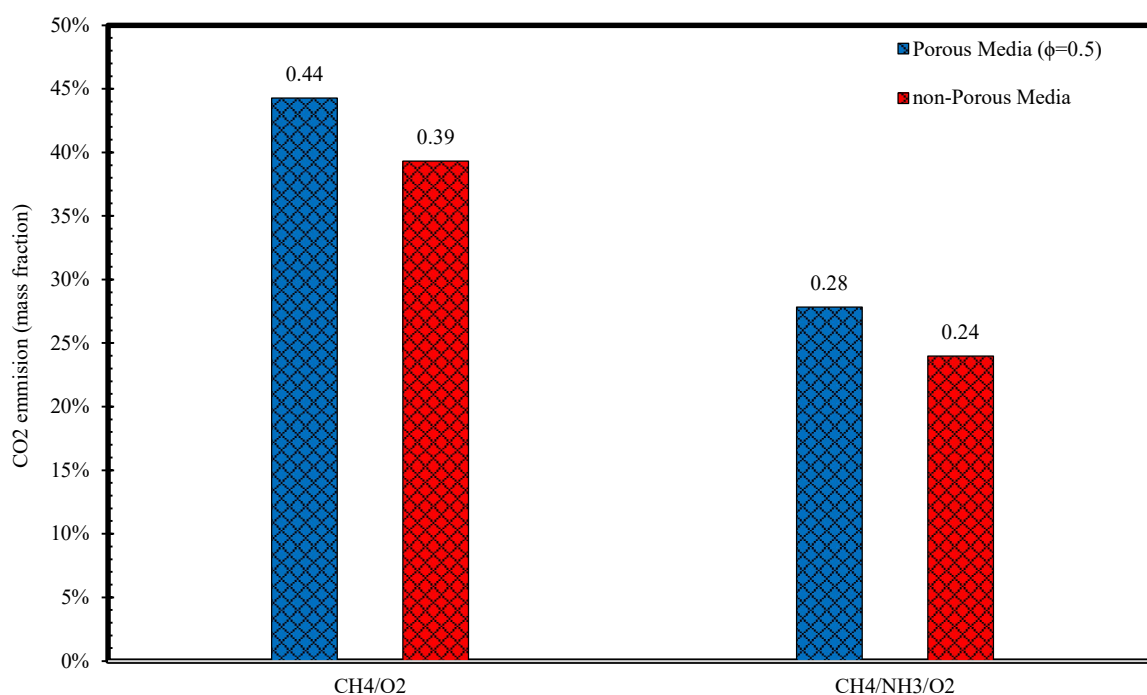


Figure 5- Comparison of methane and methane/ammonia combustion in porous and non-porous media on carbon dioxide production

شکل ۵- مقایسه احتراق متان و آمونیاک / متان در محیط متخلخل و محیط بدون تخلخل بر روی تولید کربن دی‌اکسید

شکل ۶ توزیع دما را برای احتراق مخلوط آمونیاک / متان در دو حالت محیط بدون تخلخل و محیط متخلخل نشان می‌دهد. در محیط بدون تخلخل، دمای حداکثری در نزدیکی ورودی مشاهده می‌شود و ناحیه شعله محدودتر است، به‌طوری‌که دما در طول محفظه احتراق کاهش می‌یابد. در مقابل، در محیط متخلخل، انتقال حرارت مؤثرتر بوده و توزیع دما یکنواخت‌تر است، که موجب کاهش دمای حداکثری و گسترش ناحیه واکنش می‌شود. این تفاوت نشان‌دهنده تأثیر محیط متخلخل در بهبود یکنواختی انتقال حرارت و کاهش دمای اوج است که می‌تواند منجر به کاهش تشکیل آلاینده‌ها مانند NOx شود.

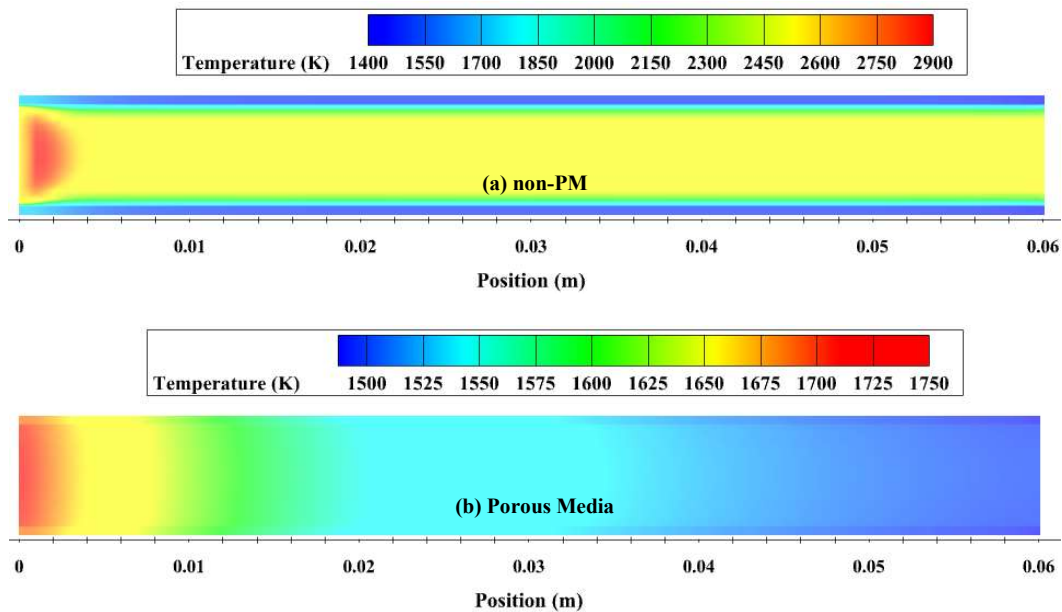


Figure 6- Temperature distribution contour for methane/ammonia combustion in (a) non-porous media and (b) porous media
 شکل ۶- کانتور توزیع دمای برای احتراق آمونیاک / متان در (الف) محیط بدون تخلخل و (ب) محیط متخلخل

شکل ۷ میزان تولید آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن (NO_x) و نیتروس اکسید (N_2O) را در احتراق مخلوط آمونیاک / متان برای دو حالت محیط متخلخل و بدون تخلخل مقایسه می‌کند. معمولاً در محیط متخلخل به دلیل بهبود انتقال حرارت و کاهش دمای حداکثری، میزان تشکیل NO_x کاهش می‌یابد. این امر به دلیل وابستگی شدید تشکیل NO_x به دمای بالا است. از سوی دیگر، توزیع دمای یکنواخت‌تر در محیط متخلخل می‌تواند بر مکانیزم‌های تولید N_2O در محیط متخلخل نسبت به محیط بدون تخلخل تأثیر گذاشته و مقدار آن را تغییر دهد و کمی افزایش دهد اما همچنان کسر جرمی تولید N_2O برای احتراق آمونیاک / متان / اکسیژن همچنان کمتر از یک پی پی ام باقی می‌ماند. همچنین همان طور که در شکل مشخص است با استفاده از محیط متخلخل برای احتراق آمونیاک / متان در مقایسه با محیط بدون تخلخل کسر جرمی NO_x از ۲۵۲۷ پی پی ام به ۲۳۱۹ پی پی ام کاهش می‌یابد که کاهش ۸/۲ درصد را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از محیط متخلخل می‌تواند رویکرد مؤثری برای کنترل آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت‌های حاوی آمونیاک باشد.

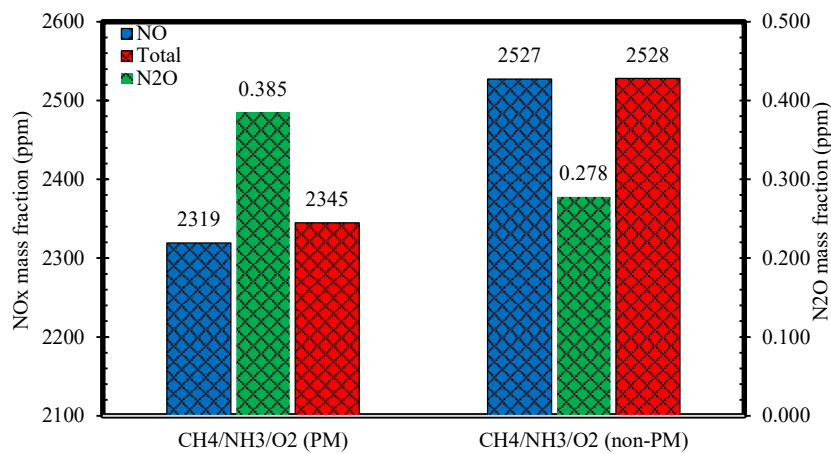


Figure 7- Comparison of NO_x and N_2O production for methane/ammonia combustion in porous and non-porous media
 شکل ۷- مقایسه تولید ناکس و نیتروس اکسید برای احتراق آمونیاک / متان در محیط متخلخل و بدون تخلخل

شکل ۸ تأثیر تخلخل بر میزان تولید آلاینده‌های NOx و N2O در احتراق مخلوط آمونیاک / متان را نشان می‌دهد. با افزایش تخلخل، معمولاً نرخ انتقال حرارت در محیط افزایش یافته و دمای حداکثری شعله کاهش می‌یابد، که این امر می‌تواند منجر به کاهش تولید NOx شود. از سوی دیگر، تغییر در دمای احتراق و نرخ واکنش‌های شیمیایی ممکن است بر مسیرهای تولید نیتروس اکسید (N2O) تأثیر گذاشته و مقدار آن را تغییر دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است کسر جرمی تولید NOx با تغییر تخلخل از ۰/۹ به ۰/۷ کاهش می‌یابد به طوری‌که از ۲۳۵۴ پی‌پی‌ام به ۲۳۴۰ پی‌پی‌ام می‌رسد. اما با کاهش بیشتر تخلخل از ۰/۷ به ۰/۵ مجدداً کسر جرمی تولید NOx افزایش می‌یابد و به ۲۳۴۵ پی‌پی‌ام می‌رسد. برای کسر جرمی تولید N2O روند متفاوت است و با تغییر تخلخل از ۰/۹ به ۰/۶ کسر جرمی تولید N2O افزایش می‌یابد و از ۰/۳۶۸ پی‌پی‌ام به ۰/۴۱۴ پی‌پی‌ام افزایش می‌یابد که البته همچنان کمتر از یک پی‌پی‌ام و ناچیز است. اما این روند با تغییر از تخلخل از ۰/۶ به ۰/۵ کاهشی می‌شود و به ۰/۳۸۵ پی‌پی‌ام می‌رسد. این نتایج بیانگر اهمیت انتخاب میزان تخلخل مناسب در طراحی سیستم‌های احتراقی برای کنترل تولید آلاینده‌ها و بهبود عملکرد زیست‌محیطی فرآیند احتراق با رویکرد کاهش گرمایش جهانی است.

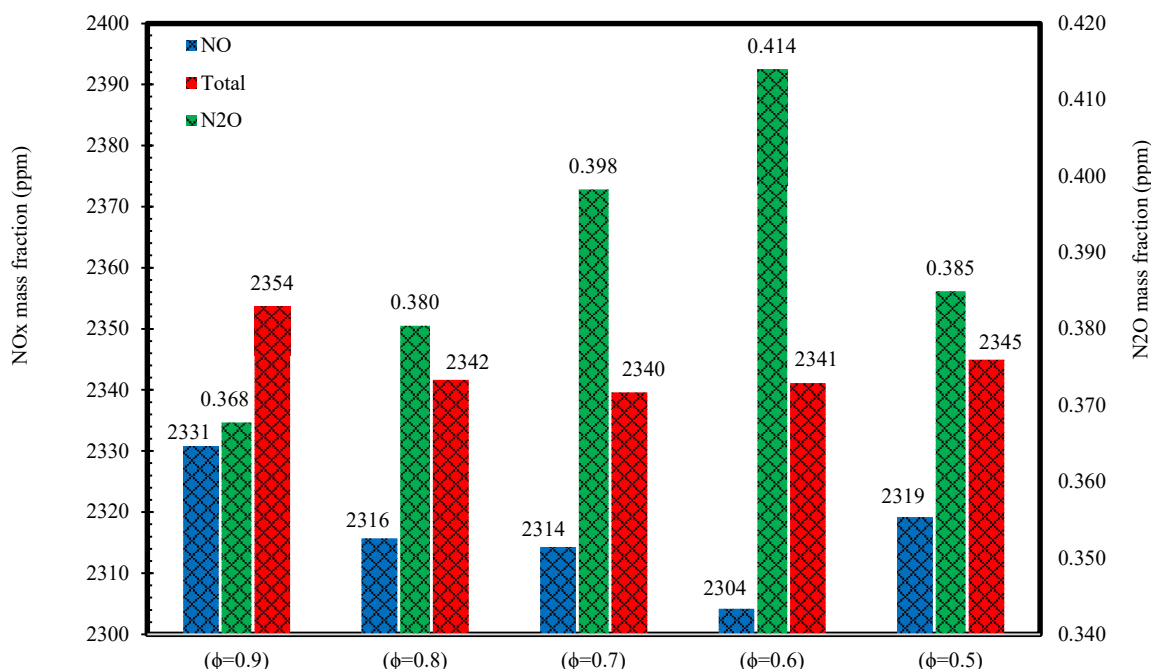


Figure 8- Comparison of the effect of porosity on NOx and N2O production for methane/ammonia combustion
شکل ۸- مقایسه تأثیر تخلخل بر تولید ناکس و نیتروس اکسید برای احتراق آمونیاک / متان

نسبت هم‌ارزی (ϕ) یکی از پارامترهای کلیدی در تعیین رفتار احتراق و پایداری شعله است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده، برای مخلوط آمونیاک / متان، احتراق در بازه‌ای از ϕ بین ۰/۸ تا ۱/۱ پایدار است. این بازه نشان‌دهنده حساسیت بالای ترکیب به غلظت‌های دقیق سوخت و اکسیدکننده است. در این بازه، دمای احتراق به صورت غیرخطی تغییر می‌کند؛ برای مقادیر کمتر از ۰/۸ (مخلوط فقیر) و بیشتر از ۱/۱ (مخلوط غنی)، دمای احتراق کاهش یافته و شعله خاموش می‌شود. این امر به دلیل کمبود انرژی لازم برای ادامه احتراق در مخلوط‌های فقیر یا محدودیت در تأمین اکسیدکننده در مخلوط‌های غنی است. افزایش تخلخل محیط متخلخل باعث بهبود انتقال حرارت و توزیع شعله می‌شود که می‌تواند بر بازه پایداری ϕ و دمای احتراق تأثیر بگذارد.

بازه احتراقی مخلوط آمونیاک / متان $0.8 \leq \phi \leq 1.1$ در مقایسه با بازه احتراقی آمونیاک خالص و متان خالص تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد. آمونیاک خالص به دلیل ویژگی‌های حرارتی و نرخ واکنش پایین‌تر، بازه احتراقی باریک‌تر و به شدت محدودتری دارد و معمولاً برای (ϕ) نزدیک به ۱ (استوکیومتری) پایدار است. از طرف دیگر، متان خالص به دلیل انرژی آزاد شده بیشتر و نرخ واکنش بالاتر، بازه احتراقی گسترده‌تری دارد و حتی در مخلوط‌های نسبتاً فقیر و غنی نیز پایدار است. ترکیب آمونیاک / متان به‌عنوان یک مخلوط ترکیبی از خواص این دو سوخت عمل می‌کند؛ آمونیاک باعث کاهش دمای شعله و تولید آلاینده‌های کمتر (مانند NOx) می‌شود، در حالی که متان پایداری شعله و گستره بازه احتراقی را بهبود می‌بخشد. تخلخل بالاتر در محیط متخلخل به توزیع بهتر گرما و پیش‌گرمایش مخلوط کمک کرده و این بازه را پایداری‌تر می‌کند.

برای مخلوط‌هایی با نسبت هم‌ارزی (ϕ) کمتر از ۱ (مخلوط فقیر)، تخلخل نقش مهمی در انتقال حرارت و توزیع واکنش‌های شیمیایی دارد. افزایش تخلخل از ۰/۵ به ۰/۷ ابتدا باعث کاهش دمای احتراق می‌شود. این کاهش به دلیل افزایش سطح تماس محیط متخلخل است که موجب افزایش انتقال حرارت هدایتی و دفع گرما از ناحیه واکنش می‌شود. در این مرحله، انرژی کافی برای نگهداشتن دمای شعله در سطح بالا وجود ندارد و شعله ضعیف‌تر می‌شود. با این حال، با ادامه افزایش تخلخل، اثرات مثبت انتقال حرارت جابه‌جایی و پراکندگی غالب می‌شود و گرما بهتر توزیع می‌شود. این امر موجب بهبود شرایط احتراق و افزایش مجدد دمای احتراق می‌شود.

برای مخلوط‌هایی با نسبت هم‌ارزی بیشتر از ۱ (مخلوط غنی)، روند تغییرات دمای احتراق برعکس است. افزایش تخلخل از ۰/۵ به ۰/۷ ابتدا باعث افزایش دمای احتراق می‌شود. در مخلوط‌های غنی، افزایش تخلخل به بهبود انتقال جرم و تأمین اکسیدکننده به ناحیه واکنش کمک می‌کند. این امر باعث تشدید واکنش‌های شیمیایی و افزایش دما می‌شود. اما با افزایش بیشتر تخلخل، دفع گرمای تولیدی به محیط اطراف افزایش می‌یابد و انتقال حرارت هدایتی غالب می‌شود. این مسئله موجب کاهش دمای احتراق در تخلخل‌های بالاتر می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده تعادل پیچیده میان انتقال حرارت و جرم در محیط‌های متخلخل و تأثیر قابل توجه تخلخل بر پایداری و شدت احتراق است.

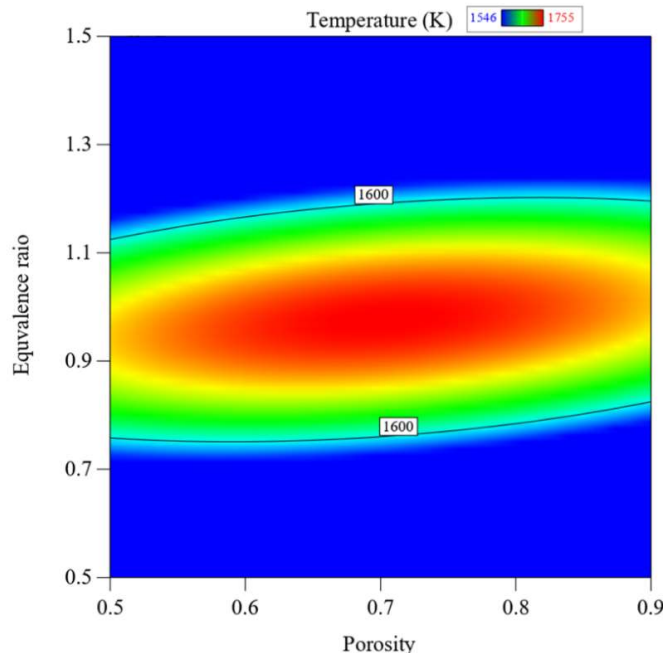


Figure 9- Temperature contour in terms of equivalence ratio and porosity

شکل ۹- کانتور دما بر حسب نسبت هم‌ارزی و تخلخل

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، افزایش نسبت متان در مخلوط آمونیاک / متان، دمای احتراق را به‌طور کلی افزایش می‌دهد. این موضوع به‌دلیل انرژی بالاتر متان است که در هنگام احتراق انرژی بیشتری آزاد می‌کند و به افزایش دمای شعله کمک می‌کند. علاوه بر این، متان به‌دلیل سرعت واکنش بالاتر و تشکیل رادیکال‌های فعال‌تر می‌تواند به شعله‌ای پایدارتر و دمای بالاتر منجر شود. همچنین، افزایش نسبت متان تأثیر ویژگی‌های آمونیاک مانند گرمای نهان بالاتر و انتقال حرارت قابل‌توجه به محیط را خنثی کرده و موجب افزایش دما می‌شود.

در نسبت‌های بسیار پایین متان، یعنی کمتر از ۰/۲، با کاهش متان و افزایش آمونیاک در سوخت، دمای احتراق اندکی افزایش می‌یابد. این رفتار ممکن است به‌دلیل اثر انتقال حرارت پایین‌تر آمونیاک باشد که گرمای تولید شده در ناحیه شعله را بهتر حفظ می‌کند. کاهش تأثیر احتراق ناقص متان نیز می‌تواند در این افزایش اندک دما مؤثر باشد، زیرا در این شرایط انرژی کمتری از دست می‌رود. علاوه بر این، واکنش‌های ثانویه آمونیاک در حضور اکسیژن ممکن است گرمای بیشتری آزاد کرده و به افزایش دما کمک کنند. این تغییرات نشان‌دهنده تعامل پیچیده میان نسبت سوخت‌ها و رفتار ترمودینامیکی مخلوط است که در طراحی سیستم‌های احتراقی اهمیت دارد.

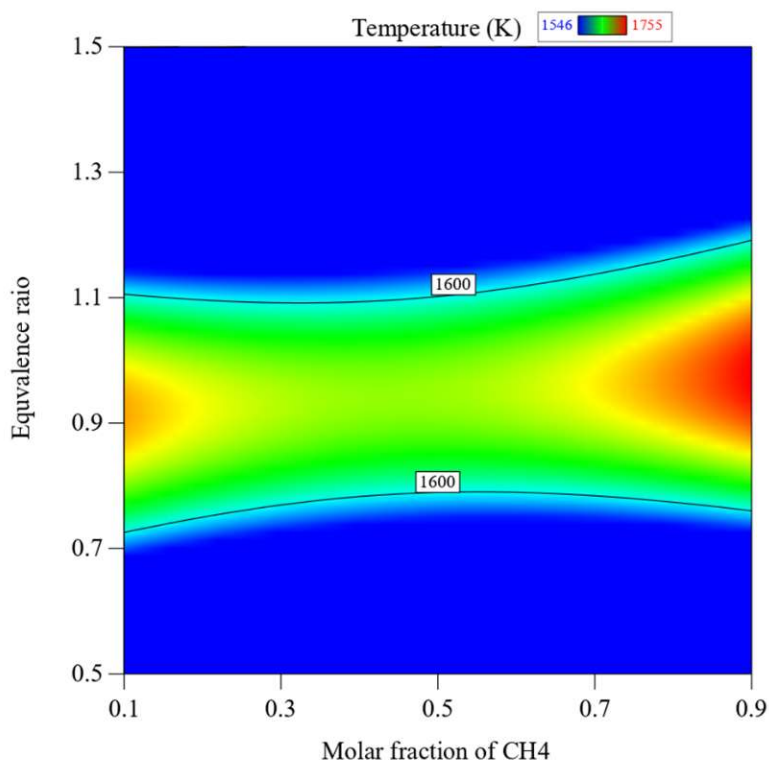


Figure 10- Temperature contour in terms of equivalence ratio and fuel ratio

شکل ۱۰- کانتور دما بر حسب نسبت هم‌ارزی و نسبت سوخت

بررسی هم‌زمان اثر تخلخل و نسبت سوخت بر دمای احتراق، همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده، نشان‌دهنده تعامل پیچیده‌ای میان این دو پارامتر است. در محیط‌هایی با تخلخل کمتر از ۰/۶، احتراق به نسبت سوخت حساس‌تر می‌شود. این حساسیت ناشی از کاهش فضای خالی و سطح تماس موجود در محیط متخلخل است که انتقال حرارت و توزیع واکنش‌های شیمیایی را محدود می‌کند. در چنین شرایطی، توزیع غیریکنواخت مخلوط و کاهش فرصت برای پیش‌گرمایش باعث می‌شود که تغییرات کوچک در نسبت سوخت تأثیر قابل‌توجهی بر دمای احتراق داشته باشد.

در تخلخل‌های کمتر از ۰/۶، کاهش تخلخل به حدی می‌رسد که مخلوط سوخت برای نسبت سوخت‌های متان پایین‌تر از حدود ۰/۶ امکان احتراق پیدا نمی‌کند. این امر به دلیل کاهش نرخ واکنش و ناتوانی محیط در حفظ دمای لازم برای شعله‌ور شدن مخلوط است. در این شرایط، احتراق به شدت به وجود مقادیر کافی متان در مخلوط وابسته است تا بتواند گرمای کافی برای جبران محدودیت‌های انتقال حرارت ایجاد کند. این رفتار تأکید می‌کند که طراحی محیط‌های متخلخل و انتخاب نسبت سوخت باید به گونه‌ای انجام شود که این حساسیت به حداقل برسد و امکان احتراق پایدار فراهم شود.

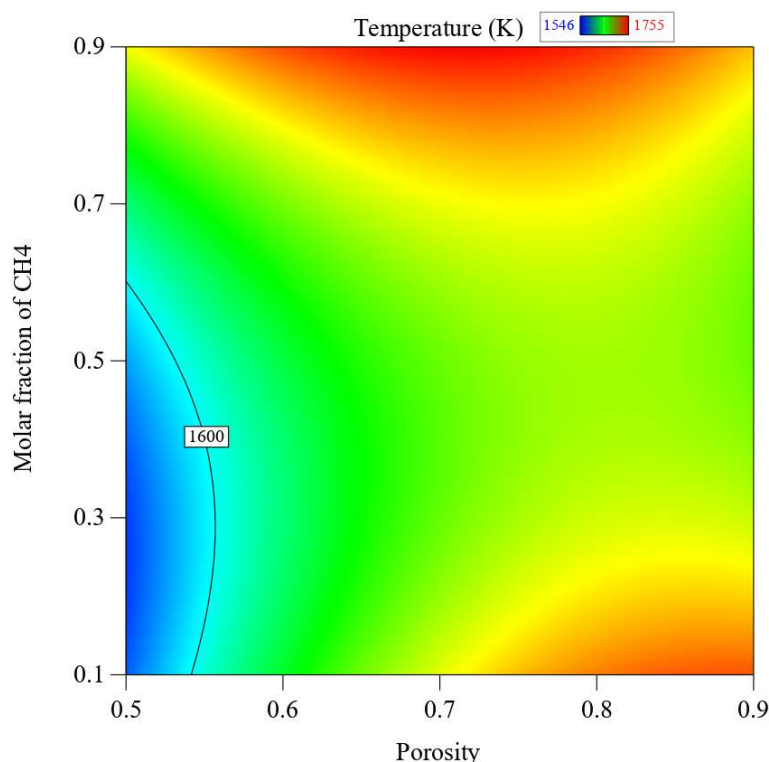


Figure 11- Temperature contour as a function of fuel ratio and porosity

شکل ۱۱- کانتور دما بر حسب نسبت سوخت و تخلخل

کانتور انتشار دی‌اکسید کربن بر حسب نسبت هم‌ارزی و تخلخل در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که تغییر این دو پارامتر به طور مستقیم بر میزان محصولات احتراق تأثیر می‌گذارد. با کاهش نسبت هم‌ارزی از ۱/۱ به ۰/۸، یعنی حرکت به سمت مخلوط‌های فقیرتر، میزان تولید منوکسید کربن کاهش می‌یابد و در عوض انتشار دی‌اکسید کربن افزایش می‌یابد. این رفتار به این دلیل است که در مخلوط‌های فقیرتر، اکسیژن بیشتری برای احتراق کامل در دسترس است و این امر تشکیل CO_2 را به عنوان محصول نهایی اکسیداسیون کربن افزایش می‌دهد. در مقابل، در مخلوط‌های غنی، کمبود اکسیژن منجر به تشکیل محصولات ناقص مانند CO می‌شود.

با افزایش نسبت هم‌ارزی و حرکت به سمت مخلوط‌های غنی‌تر، اثر تخلخل در انتشار دی‌اکسید کربن چشمگیرتر می‌شود. در تخلخل‌های بالاتر، انتقال جرم و جابه‌جایی بهتر گازها موجب افزایش توزیع اکسیژن و واکنش‌های احتراقی می‌شود که به تولید بیشتر CO_2 کمک می‌کند. این در حالی است که در تخلخل‌های پایین‌تر، محدودیت انتقال جرم می‌تواند تشکیل CO را افزایش داده و از تولید بهینه CO_2 جلوگیری کند.

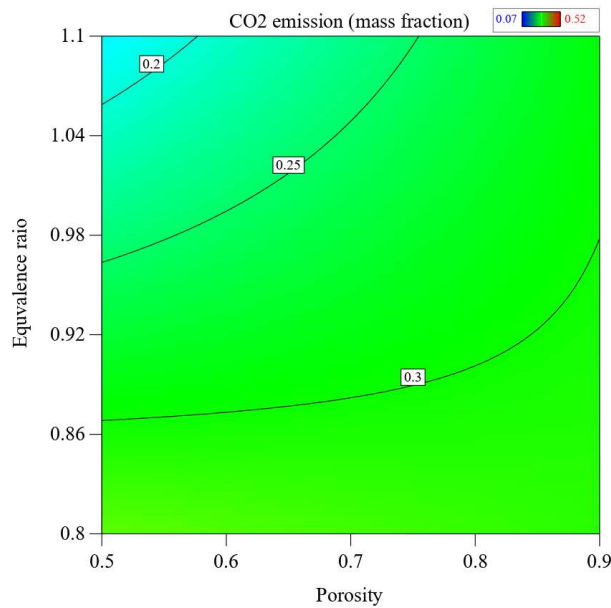


Figure 12- Carbon dioxide emission contour in terms of equivalence ratio and porosity
 شکل ۱۲- کانتور انتشار دی‌اکسیدکربن بر حسب نسبت هم ارزی و تخلخل

کانتور انتشار دی‌اکسیدکربن بر حسب نسبت هم‌ارزی و نسبت سوخت در شکل ۱۳ نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه نسبت سوخت بر میزان انتشار دی‌اکسیدکربن است. این تأثیر به‌دلیل حضور اتم‌های کربن در مولکول متان است که با افزایش نسبت متان در مخلوط سوخت، مقدار دی‌اکسیدکربن تولید شده نیز افزایش می‌یابد. متان به‌عنوان منبع اصلی کربن در فرایند احتراق، در هنگام واکنش با اکسیژن، دی‌اکسیدکربن را به‌عنوان محصول اصلی اکسیداسیون تولید می‌کند. بنابراین، افزایش سهم متان در مخلوط سوخت مستقیماً منجر به افزایش تولید دی‌اکسیدکربن می‌شود.

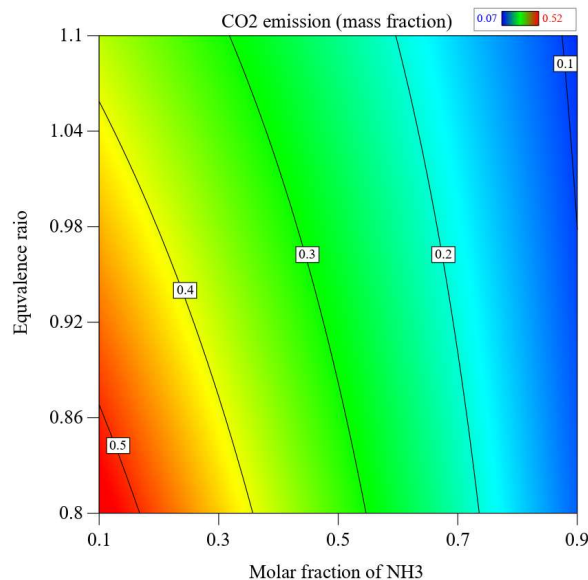


Figure 13- Carbon dioxide emission contour in terms of equivalence ratio and fuel ratio
 شکل ۱۳- کانتور انتشار دی‌اکسیدکربن بر حسب نسبت هم ارزی و نسبت سوخت

علاوه بر این، تغییرات نسبت هم‌ارزی نیز بر انتشار دی‌اکسیدکربن تأثیرگذار است. در مخلوط‌های نزدیک به استوکیومتری، شرایط برای احتراق کامل و تولید حداکثری دی‌اکسیدکربن فراهم است. در مخلوط‌های فقیر به دلیل وجود اکسیژن اضافی، واکنش‌ها به سمت تولید دی‌اکسیدکربن سوق پیدا می‌کنند. اما در مخلوط‌های غنی کمبود اکسیژن باعث تشکیل محصولات ناقص مانند منوکسید کربن می‌شود و میزان دی‌اکسیدکربن کاهش می‌یابد. این روابط نشان می‌دهد که انتخاب دقیق نسبت سوخت و نسبت هم‌ارزی می‌تواند بر کنترل میزان انتشار دی‌اکسیدکربن و بهبود کارایی احتراق تأثیر قابل توجهی داشته باشد. کانتور انتشار دی‌اکسیدکربن برحسب نسبت سوخت و تخلخل در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که افزایش تخلخل به‌طور کلی موجب افزایش میزان انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود. این رفتار به دلیل تأثیر تخلخل بر بهبود انتقال جرم و حرارت در محیط متخلخل است. در تخلخل‌های بالاتر، سطح تماس بیشتر و فضای بازتر بین ذرات باعث می‌شود اکسیژن به‌طور موثرتری به ناحیه واکنش منتقل شود که این شرایط برای احتراق کامل و تشکیل دی‌اکسیدکربن بهینه است. افزایش تخلخل همچنین به پراکندگی بهتر واکنش‌پذیرها و توزیع یکنواخت دما در محیط احتراق کمک می‌کند که این امر به کاهش احتراق ناقص و تولید محصولات میانی مانند منوکسید کربن منجر می‌شود. در نتیجه، واکنش‌ها به سمت تولید دی‌اکسیدکربن بیشتر هدایت می‌شوند. اثر تخلخل بر افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن با افزایش نسبت سوخت نیز تشدید می‌شود، زیرا حضور متان بیشتر در مخلوط، منبع غنی‌تری از کربن برای تولید دی‌اکسیدکربن فراهم می‌کند. این نتایج بر اهمیت طراحی دقیق ساختار متخلخل و تنظیم نسبت سوخت در فرایندهای احتراقی برای بهبود کارایی و کاهش آلاینده‌ها تأکید دارد.

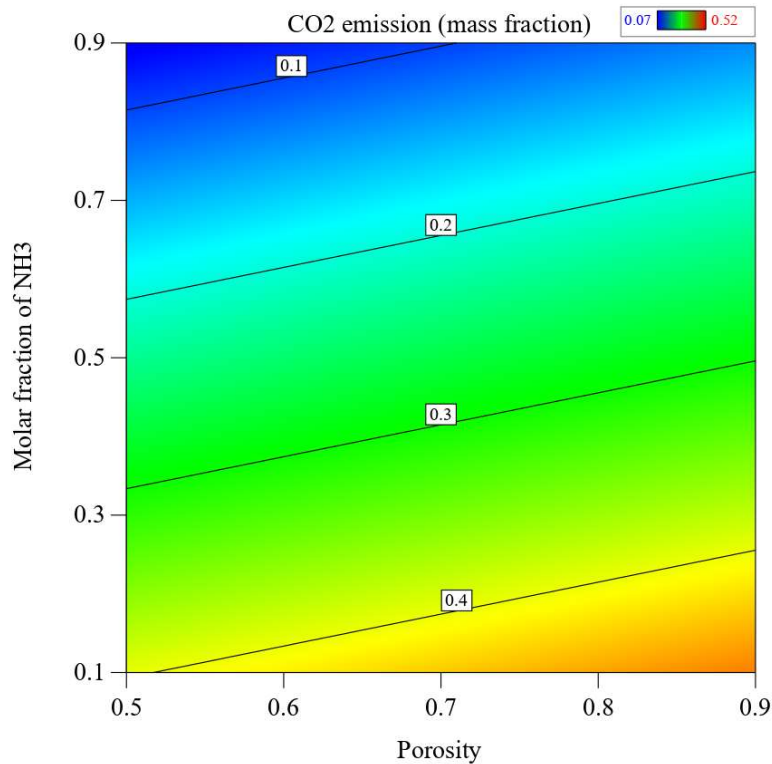


Figure 14- Carbon dioxide emission contour as a function of fuel ratio and porosity

شکل ۱۴- کانتور انتشار دی‌اکسیدکربن برحسب نسبت سوخت و تخلخل

کانتور انتشار اکسیدهای نیتروژن برحسب نسبت هم‌ارزی و تخلخل در شکل ۱۵ نشان‌دهنده تعامل پیچیده میان این دو پارامتر در تولید اکسیدهای نیتروژن است. در مخلوط‌های نزدیک به استوکیومتری و مخلوط‌های رقیق، دمای احتراق به حداکثر

مقدار خود می‌رسد که این امر به افزایش سرعت تشکیل اکسیدهای نیتروژن از طریق مکانیسم‌های گرمایی و سایر مسیرها منجر می‌شود. بنابراین، در این ناحیه، میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن به‌طور قابل توجهی بیشتر است. افزایش تخلخل نیز به افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن کمک می‌کند، زیرا در تخلخل‌های بالاتر، انتقال حرارت و جرم بهبود می‌یابد و دمای موضعی در ناحیه واکنش افزایش می‌یابد. این دماهای بالاتر شرایط مناسبی را برای واکنش‌های تولید اکسیدهای نیتروژن فراهم می‌کنند. از سوی دیگر، در تخلخل‌های پایین‌تر، به‌دلیل محدودیت انتقال حرارت و کاهش دمای احتراق، میزان اکسیدهای نیتروژن کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که کنترل دقیق تخلخل و تنظیم نسبت هم‌ارزی می‌تواند نقش مهمی در کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن و مدیریت اثرات زیست‌محیطی سیستم‌های احتراقی داشته باشد.

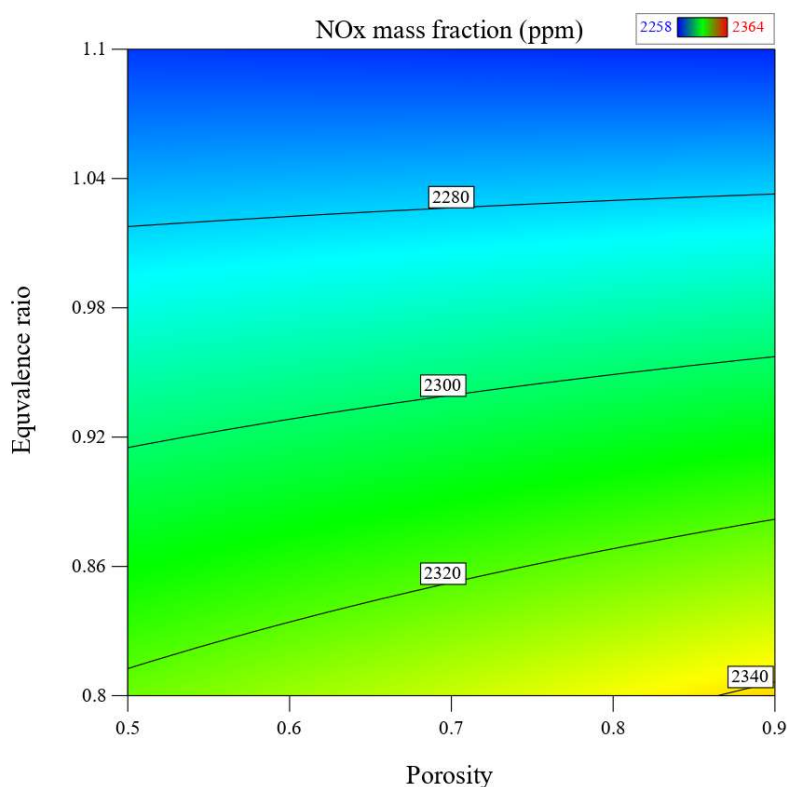


Figure 15- Nitrogen oxides emission contour in terms of equivalence ratio and porosity
 شکل ۱۵- کانتور انتشار اکسیدهای نیتروژن برحسب نسبت هم‌ارزی و تخلخل

کانتور انتشار اکسیدهای نیتروژن برحسب نسبت هم‌ارزی و نسبت سوخت در شکل ۱۶ نشان‌دهنده افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن با افزایش نسبت سوخت آمونیاک است. این رفتار به‌دلیل حضور اتم‌های نیتروژن در ساختار شیمیایی آمونیاک اکسیدهای نیتروژن است که در طول احتراق به‌عنوان منبع اصلی تولید اکسیدهای نیتروژن عمل می‌کند. با افزایش سهم آمونیاک در مخلوط سوخت، مقدار نیتروژن قابل واکنش بیشتر شده و به‌تبع آن تولید اکسیدهای نیتروژن نیز افزایش می‌یابد.

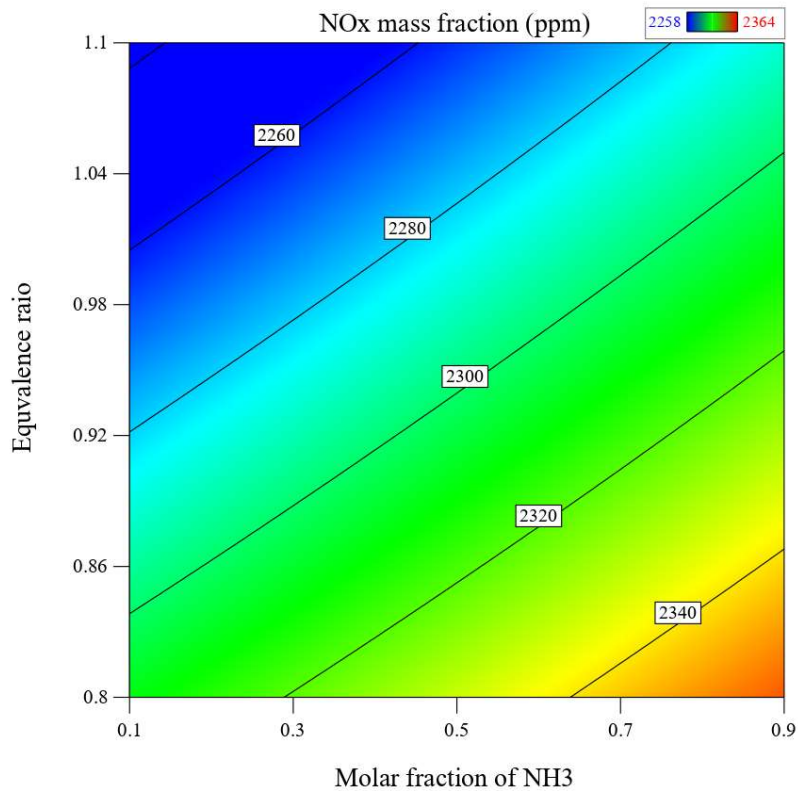


Figure 16- Nitrogen oxides emission contour in terms of equivalence ratio and fuel ratio
 شکل ۱۶- کانتور انتشار اکسیدهای نیتروژن برحسب نسبت هم ارزی و نسبت سوخت

کانتور انتشار اکسیدهای نیتروژن برحسب نسبت سوخت و تخلخل در شکل ۱۷ نشان می‌دهد که تخلخل و نسبت سوخت تأثیرات متفاوتی بر تولید اکسیدهای نیتروژن دارند. افزایش تخلخل باعث بهبود انتقال حرارت و افزایش دما در ناحیه احتراق می‌شود که این شرایط دمایی بالا برای تشکیل اکسیدهای نیتروژن از طریق مکانیسم‌های گرمایی بسیار مؤثر است؛ بنابراین، در محیط‌های با تخلخل بالا، به دلیل دمای بالاتر احتراق، میزان تولید اکسیدهای نیتروژن افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش نسبت سوخت آمونیاک که به‌عنوان منبع نیتروژن عمل می‌کند، تولید اکسیدهای نیتروژن را نیز افزایش می‌دهد. در مخلوط‌هایی که سهم بیشتری از آمونیاک دارند، به دلیل وجود نیتروژن در سوخت، واکنش‌های تشکیل اکسیدهای نیتروژن به‌طور قابل‌توجهی تشدید می‌شود. این به‌ویژه در تخلخل‌های بالاتر که انتقال حرارت بهتر صورت می‌گیرد، بیشتر به چشم می‌آید. در تخلخل‌های پایین‌تر، به دلیل محدودیت در انتقال حرارت، دما کمتر می‌شود و در نتیجه میزان تولید اکسیدهای نیتروژن کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که تنظیم دقیق تخلخل و نسبت سوخت می‌تواند به کنترل بهتر میزان تولید اکسیدهای نیتروژن و کاهش آلاینده‌ها در فرایندهای احتراقی کمک کند.

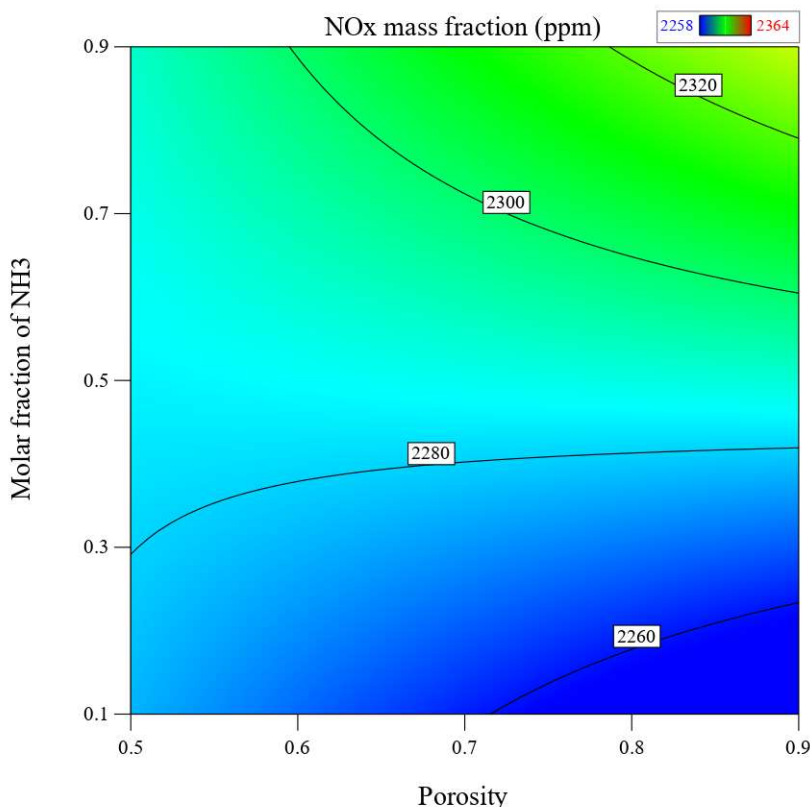


Figure 17- Nitrogen oxides emission contour as a function of fuel ratio and porosity
 شکل ۱۷- کانتور انتشار اکسیدهای نیتروژن برحسب نسبت سوخت و تخلخل

بر اساس نتایج آنالیز حساسیت در شکل ۱۸، مقدار پایه برای کسر جرمی انتشار کربن‌دی‌اکسید در احتراق آمونیاک / متان / اکسیژن در محیط متخلخل با تخلخل ۰/۷ و نسبت هم ارزی استوکیومتری برابر ۰/۲۵ محاسبه شده است. وقتی تخلخل در حالت کم بازه یعنی عدد ۰/۵ قرار می‌گیرد، انتشار کربن‌دی‌اکسید به ۰/۲۸ می‌رسد که نسبت به مقدار پایه ۴ درصد افزایش دارد. در حالت زیاد بازه تخلخل یعنی عدد ۰/۹ نیز به ۰/۲۴ کاهش می‌یابد که بیانگر ۱۲ درصد کاهش نسبت به پایه است. برای کسر مولی آمونیاک در سوخت، در حالت زیاد بازه یعنی عدد ۰/۹ کاهش از ۰/۲۵ به ۰/۰۵ نشان‌دهنده ۸۰ درصد کاهش و در حالت کم بازه یعنی عدد ۰/۱ افزایش تا ۰/۵ برابر با ۱۰۰ درصد افزایش است. همچنین در مورد نسبت هم‌ارزی، در حالت کم بازه یعنی عدد ۰/۵ مقدار ۰/۲۸ (افزایش ۱۲ درصدی) و در حالت زیاد بازه یعنی عدد ۱/۵ مقدار ۰/۱ (کاهش ۶۰ درصدی) گزارش شده است.

با مقایسه درصد تغییرات مشاهده می‌شود که کسر مولی آمونیاک در سوخت بیشترین بازه تغییر را در انتشار کربن‌دی‌اکسید ایجاد کرده است (از ۸۰ درصد کاهش تا ۱۰۰ درصد افزایش) و بعد از آن نسبت هم ارزی با دامنه ۶۰ درصد کاهش تا ۱۲ درصد افزایش قرار می‌گیرد. در نهایت تخلخل کمترین حساسیت را نشان می‌دهد (از ۴ درصد کاهش تا ۱۲ درصد افزایش). بنابراین، در فرآیندهایی که کنترل یا کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید اهمیت دارد، توجه ویژه به کسر مولی آمونیاک در سوخت در اولویت قرار می‌گیرد و سپس باید به مقدار نسبت هم ارزی دقت کرد.

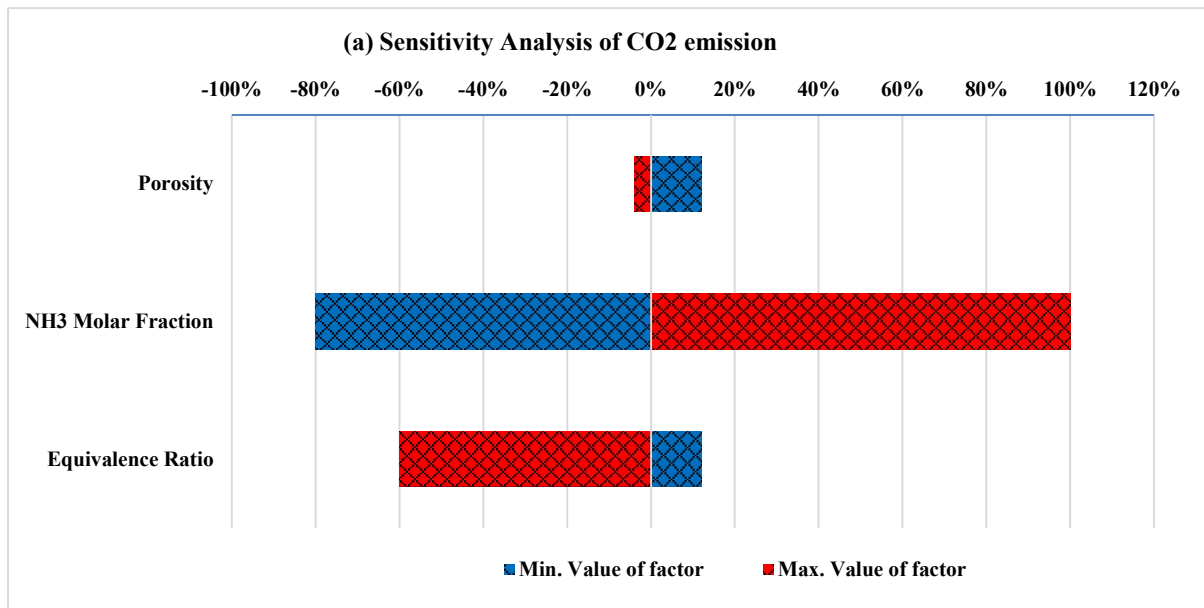
دمای پایه در احتراق آمونیاک / متان / اکسیژن در محیط متخلخل با تخلخل ۰/۷ و نسبت هم ارزی استوکیومتری برابر ۱۶۹۱ کلوین محاسبه شده است. کاهش تخلخل به ۰/۵، دما را به ۱۵۴۶ کلوین می‌رساند که ۹ درصد کاهش نشان می‌دهد. در حالت تخلخل ۰/۹، دما تا ۱۷۵۵ کلوین بالا می‌رود (افزایش ۴ درصدی). برای کسر مولی آمونیاک در سوخت، کمترین دما ۱۵۶۶

کلوین (۷ درصد کاهش) و بیشترین دما ۱۷۵۵ کلوین (۴ درصد افزایش) است. نسبت هم‌ارزی نیز بین ۱۵۷۸ کلوین (۷ درصد کاهش) تا ۱۷۲۵ کلوین (۲ درصد افزایش) نوسان دارد.

با توجه به درصد تغییرات، تخلخل بیشترین کاهش دما (۹ درصد) و بیشترین افزایش (۴ درصد) را به‌همراه دارد و تقریباً در کنار آن کسر مولی آمونیاک قرار می‌گیرد که کاهش ۷ درصدی و افزایش ۴ درصدی دارد. نسبت هم‌ارزی کمی اثر کمتری روی دما داشته و تغییرات آن بین ۷ درصد کاهش تا ۲ درصد افزایش است. بنابراین، برای مدیریت دمای دیواره، کنترل تخلخل و سپس کسر مولی آمونیاک در اولویت قرار دارد.

در بخش انتشار ناکس، مقدار پایه در احتراق آمونیاک / متان / اکسیژن در محیط متخلخل با تخلخل ۰/۷ و نسبت هم‌ارزی استوکیومتری برابر ۲۲۹۶ پی پی‌ام است. برای تخلخل، کمترین مقدار ۲۲۵۸ پی پی‌ام است که ۲ درصد کاهش نشان می‌دهد و بیشترین مقدار ۲۳۶۴ پی پی‌ام است که ۳ درصد افزایش دارد. کسر مولی آمونیاک هم بین ۲۲۷۳ پی پی‌ام (۱ درصد کاهش) و ۲۳۶۴ پی پی‌ام (۳ درصد افزایش) در نوسان است. در نهایت، نسبت هم‌ارزی از ۲۲۸۷ پی پی‌ام (بدون تغییر) تا ۲۳۵۴ پی پی‌ام (۳ درصد افزایش) متغیر است.

با مقایسه درصد تغییرات، ملاحظه می‌شود که همه عوامل نهایتاً می‌توانند انتشار ناکس را حدود ۲ تا ۳ درصد کاهش یا افزایش دهند. تخلخل بیشترین کاهش (۲ درصد) و در کنار کسر مولی بالاترین افزایش (۳ درصد) را نشان می‌دهد. نسبت هم‌ارزی در مقدار کم تقریباً تغییری نسبت به پایه ندارد ولی در مقدار زیاد ۳ درصد افزایش دارد. به‌طور کلی، حساسیت ناکس به این سه فاکتور کمتر از کربن‌دی‌اکسید است، اما در میان آن‌ها، تخلخل کاهش بیشتر بر ناکس داشته است.



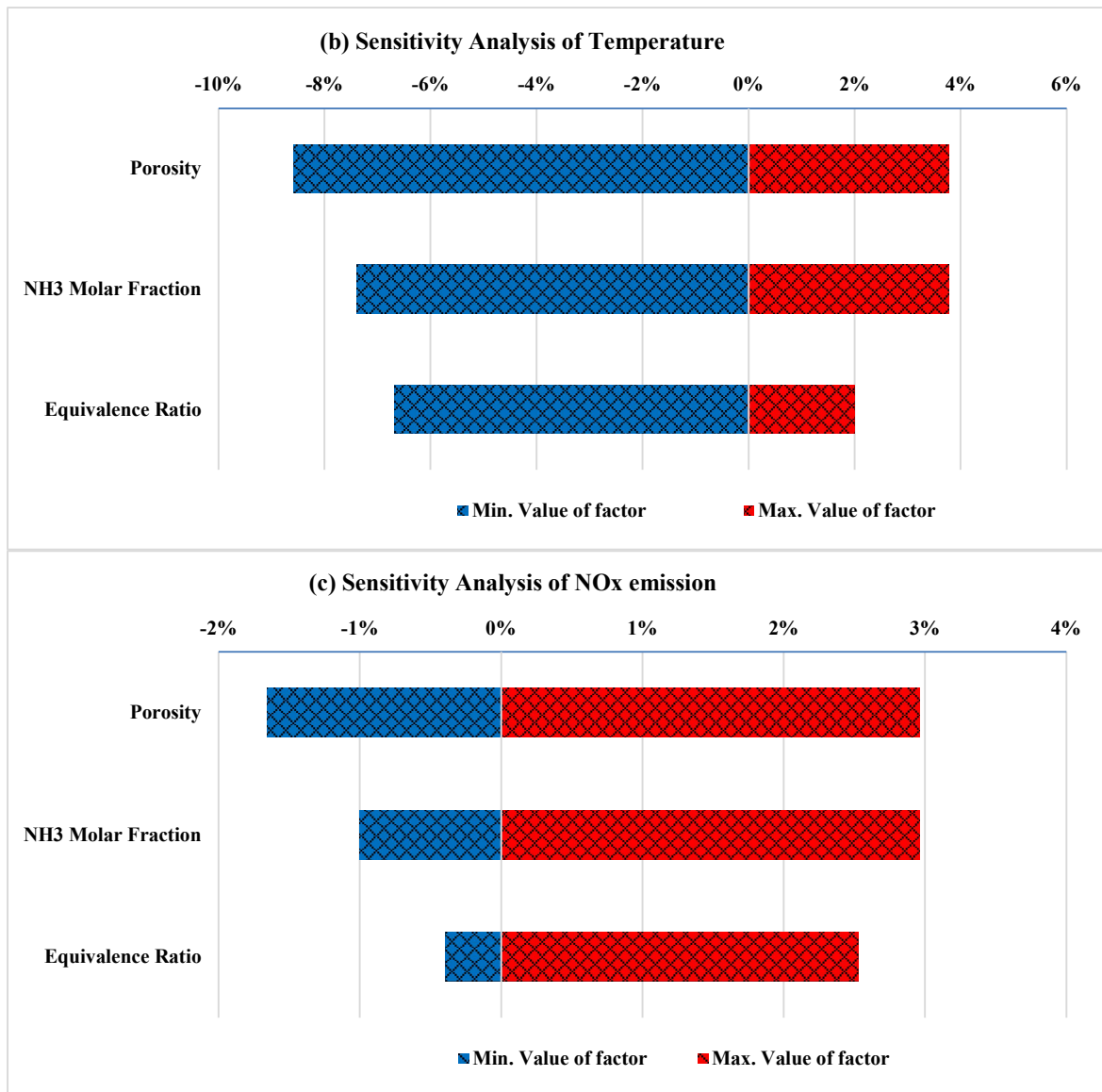


Figure 18- Sensitivity analysis of (a) CO₂ emission, (b) temperature, (c) NO_x emission in terms of porosity, fuel fraction, and equivalence ratio

شکل ۱۸- آنالیز حساسیت برای (الف) انتشار کربن دی‌اکسید، (ب) توزیع دما، (ج) انتشار اکسیدهای نیتروژن بر حسب تخلخل، کسر سوخت و نسبت هم‌ارزی

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از محیط‌های متخلخل تأثیرات قابل توجهی بر فرآیندهای احتراقی و تولید آلاینده‌ها دارد. در اینجا، نتایج به‌طور دقیق با استفاده از اعداد و ارقام مورد به‌مورد بیان شده است:

- تولید دی‌اکسید کربن (CO₂):

○ اثر محیط متخلخل:

در احتراق متان با اکسیژن در محیط متخلخل، کسر جرمی CO₂ برابر با ۴۴ درصد است و در محیط بدون تخلخل، کسر جرمی CO₂ برابر با ۳۹ درصد است. در احتراق ترکیب آمونیاک / متان در محیط متخلخل، کسر جرمی CO₂ برابر با ۲۸

درصد است و در محیط بدون تخلخل، کسر جرمی CO_2 برابر با ۲۴ درصد است. این نتایج نشان می‌دهند که در حضور محیط متخلخل، تبدیل کربن به دی‌اکسید کربن بهبود یافته است و احتراق بیشتر به سمت کامل شدن میل پیدا می‌کند و تولید گازهای مضر همچون منواکسید کربن کاهش می‌یابد.

○ تأثیر کسر مولی متان:

با کاهش حداکثری سهم متان در ترکیب آمونیاک / متان، کسر جرمی CO_2 در محیط بدون تخلخل کاهش ۳۸ درصد و در محیط متخلخل کاهش ۳۳ درصد را نشان می‌دهد.

- تولید اکسیدهای نیتروژن (NO_x):

○ تأثیر محیط متخلخل:

در احتراق آمونیاک / متان / اکسیژن در محیط متخلخل کسر جرمی NO_x در محیط متخلخل با تخلخل ۰/۷ و نسبت هم‌ارزی استوکیومتری برابر ۲۳۲۶ پی پی‌ام است. در محیط بدون تخلخل، کسر جرمی NO_x برابر ۲۵۲۷ پی پی‌ام است. این کاهش ۸/۲ درصد در تولید NO_x نشان‌دهنده اثر مثبت محیط متخلخل در کنترل آلاینده‌ها است.

○ تأثیر تخلخل:

با کاهش تخلخل از ۰/۹ به ۰/۷، کسر جرمی NO_x از ۲۳۵۴ پی پی‌ام به ۲۳۴۰ پی پی‌ام کاهش می‌یابد. با کاهش بیشتر تخلخل از ۰/۷ به ۰/۵، کسر جرمی NO_x به ۲۳۴۵ پی پی‌ام افزایش می‌یابد.

- تولید نیتروس اکسید (N_2O):

○ تأثیر تخلخل:

در احتراق آمونیاک / متان / اکسیژن در محیط متخلخل با تغییر تخلخل از ۰/۹ به ۰/۶، کسر جرمی N_2O از ۰/۳۶۸ پی پی‌ام به ۰/۴۱۴ پی پی‌ام افزایش می‌یابد. اما با تغییر تخلخل از ۰/۶ به ۰/۵، کسر جرمی N_2O به ۰/۳۸۵ پی پی‌ام کاهش می‌یابد.

- دمای احتراق:

○ تأثیر تخلخل:

دمای احتراق پایه در احتراق آمونیاک / متان / اکسیژن در محیط متخلخل با تخلخل ۰/۷ و نسبت هم‌ارزی استوکیومتری برابر ۱۶۹۱ کلوین است. با کاهش تخلخل به ۰/۵، دما به ۱۵۴۶ کلوین کاهش می‌یابد. با افزایش تخلخل به ۰/۹، دما به ۱۷۵۵ کلوین افزایش می‌یابد.

○ تأثیر کسر مولی آمونیاک:

برای کسر مولی آمونیاک زیاد، دما به ۱۵۶۶ کلوین کاهش می‌یابد. در حالت کسر مولی آمونیاک کم، دما به ۱۷۵۵ کلوین افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان‌دهنده تأثیر مثبت محیط‌های متخلخل بر فرآیند احتراق و تولید گازهای آلاینده است. استفاده از محیط متخلخل باعث افزایش تولید دی‌اکسید کربن در هر دو حالت احتراق متان با اکسیژن و ترکیب آمونیاک / متان می‌شود، که این امر نشان‌دهنده بهبود تبدیل کربن به دی‌اکسید کربن در حضور محیط متخلخل است. به‌ویژه در احتراق ترکیب آمونیاک / متان، استفاده از محیط متخلخل منجر به کاهش تولید NO_x به میزان ۸/۲ درصد می‌شود که رویکرد مؤثری برای کنترل آلاینده‌ها

به‌ویژه در سوخت‌های حاوی آمونیاک است. همچنین، تأثیر تخلخل بر تولید آلاینده‌ها نظیر NO_x و N_2O نشان می‌دهد که تغییرات تخلخل می‌تواند به بهبود یا بدتر شدن وضعیت آلاینده‌ها منجر شود، بنابراین نیاز به کنترل دقیق تخلخل در فرآیندهای احتراقی وجود دارد. در این مطالعه، کسر مولی آمونیاک در سوخت بیشترین تأثیر را بر انتشار دی‌اکسید کربن داشته و پس از آن نسبت هم‌ارزی اهمیت دارد. این نتایج نشان‌دهنده این است که برای کاهش انتشار کربن دی‌اکسید باید توجه ویژه‌ای به ترکیب سوخت و نسبت هم‌ارزی در فرآیندهای احتراقی معطوف شود. در زمینه دما، تغییرات تخلخل و کسر مولی آمونیاک بیشترین تأثیر را بر دمای احتراق دارند. بنابراین، کنترل تخلخل و سپس کسر مولی آمونیاک باید در فرآیندهای مدیریت دما و بهینه‌سازی احتراق در اولویت قرار گیرد. در نهایت، یافته‌ها تأکید دارند که طراحی دقیق محیط‌های متخلخل و تنظیم مناسب نسبت‌های سوخت و تخلخل می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد احتراق، کاهش آلاینده‌ها، و بهبود کارایی سیستم‌های احتراقی کمک کند. این مطالعه همچنین بر اهمیت پارامترهایی همچون عدد پکلت، عدد دارسی و عدد لوئیس در فرآیند احتراق تأکید کرده و نشان می‌دهد که تنظیم این پارامترها به‌ویژه در محیط‌های متخلخل می‌تواند به بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌ها کمک کند.

فهرست علائم

K	نفوذپذیری [m^2]
C	عامل تشکیل
c_p	گرمای ویژه [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
c_0	مقاومت اینرسی [m^{-1}]
D_p	قطر منافذ [m]
λ	رسانایی گرمایی [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
m	عامل پیچ‌خوردگی
P	فشار [Pa]
Pr	عدد پراندتل
r	شعاع لوله [m]
Re	عدد رینولدز
T	دما [K]
S_{fu}	شار انتشار گونه‌ها
R_i	نرخ خالص تولید گونه
Y_i	کسر جرمی گونه‌ها

نمادهای یونانی

ϕ	تخلخل
μ	ویسکوزیته دینامیکی [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$]
ρ	چگالی [kg m^{-3}]
σ	ثابت استفان – بولتزمن
φ	نسبت هم‌ارزی
ω	تراکم منافذ

هازیر نویسی

e	مؤثر
f	سیال
in	ورودی
s	جامد
w	دیواره

منابع

- [1] J. Chen, Y. Fei, and Z. Wan, "The relationship between the development of global maritime fleets and GHG emission from shipping," *J Environ Manage*, vol. 242, pp. 31–39, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.136.
- [2] Y. Kojima, "Hydrogen storage materials for hydrogen and energy carriers," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 33, pp. 18179–18192, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.119.
- [3] A. Valera-Medina, F. Amer-Hatem, A. K. Azad, I. C. Dedoussi, M. de Joannon, R. X. Fernandes, P. Glarborg, H. Hashemi, X. He, S. Mashruk, J. McGowan, C. Mounaim-Rousellet, A. Ortiz-Prado, A. Ortiz-Valera, I. Rossetti, B. Shu, M. Yehia, H. Xiao, M. Costa., "Review on ammonia as a potential fuel: From synthesis to economics," *Energy and Fuels*, vol. 35, no. 9, pp. 6964–7029, May 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c03685.
- [4] T. Li, Y. Duan, Y. Wang, M. Zhou, and L. Duan, "Research progress of ammonia combustion toward low carbon energy," *Fuel Processing Technology*, vol. 248, p. 107821, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.fuproc.2023.107821.
- [5] A. Hayakawa, T. Goto, R. Mimoto, Y. Arakawa, T. Kudo, and H. Kobayashi, "Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames at various pressures," *Fuel*, vol. 159, pp. 98–106, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2015.06.070.
- [6] H. Kobayashi, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somaratne, and E. C. Okafor, "Science and technology of ammonia combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 1, pp. 109–133, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.proci.2018.09.029.
- [7] T. Cai, D. Zhao, and E. Gutmark, "Overview of fundamental kinetic mechanisms and emission mitigation in ammonia combustion," *Chemical Engineering Journal*, vol. 458, p. 141391, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ccej.2023.141391.
- [8] L. Kang, W. Pan, J. Zhang, W. Wang, and C. Tang, "A review on ammonia blends combustion for industrial applications," *Fuel*, vol. 332, p. 126150, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126150.
- [9] C. S. Dowd and J. W. Meadows, "Thermoacoustic instability model with porous media: linear stability analysis and the impact of porous media," *J Eng Gas Turbine Power*, vol. 141, no. 4, 2019, doi: 10.1115/1.4041025.
- [10] R. Fursenko, S. Minaev, K. Maruta, H. Nakamura, and H. Yang, "Characteristic regimes of premixed gas combustion in high-porosity micro-fibrous porous media," *Combustion Theory and Modelling*, vol. 14, no. 4, pp. 571–581, 2010, doi: 10.1080/13647830.2010.502249.
- [11] H. Yang, S. Minaev, E. Geynce, H. Nakamura, and K. Maruta, "Filtration combustion of methane in high-porosity micro-fibrous media," *Combustion Science and Technology*, vol. 181, no. 4, pp. 654–669, Apr. 2009, doi: 10.1080/00102200802646748.
- [12] Y. Liu, A. Fan, H. Yao, and W. Liu, "Numerical investigation of filtration gas combustion in a mesoscale combustor filled with inert fibrous porous medium," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 91, pp. 18–26, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.100.
- [13] A. J. Barra and J. L. Ellzey, "Heat recirculation and heat transfer in porous burners," *Combust Flame*, vol. 137, no. 1–2, pp. 230–241, 2004, doi: 10.1016/j.combustflame.2004.02.007.
- [14] Q. Peng, E. Jiaqiang, J. Chen, W. Zuo, ... X. Z.-E. C. and, and undefined 2018, "Investigation on the effects of wall thickness and porous media on the thermal performance of a non-premixed hydrogen fueled cylindrical micro combustor," *Elsevier*, Accessed: Nov. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417310282>
- [15] M. A. Mujeebu, M. Z. Abdullah, A. A. Mohamad, and M. Z. A. Bakar, "Trends in modeling of porous media combustion," *Prog Energy Combust Sci*, vol. 36, no. 6, pp. 627–650, Dec. 2010, doi: 10.1016/J.PECS.2010.02.002.
- [16] G. Vignat, T. Zirwes, E. R. Tor, K. Younes, E. Boigné, P. Muhunthan, L. Simitz, D. Trimis, M. Ihme, "Experimental and numerical investigation of flame stabilization and pollutant formation in matrix stabilized ammonia-hydrogen combustion," *Combust Flame*, vol. 250, p. 112642, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.combustflame.2023.112642.
- [17] M. A. Mujeebu, A. A. Mohamad, and M. Z. Abdullah, "Applications of Porous Media Combustion Technology," in *The Role of Colloidal Systems in Environmental Protection*, 2014, pp. 615–633. doi: 10.1016/B978-0-444-63283-8.00024-7.
- [18] A. A. M. Oliveira and M. Kaviany, "Nonequilibrium in the transport of heat and reactants in combustion in porous media," 2001. doi: 10.1016/S0360-1285(00)00030-7.
- [19] S. Wood and A. T. Harris, "Porous burners for lean-burn applications," 2008. doi: 10.1016/j.pecs.2008.04.003.
- [20] V. Bubnovich, M. Toledo, L. Henríquez, C. Rosas, and J. Romero, "Flame stabilization between two beds of alumina balls in a porous burner," *Appl Therm Eng*, vol. 30, no. 2–3, pp. 92–95, 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2009.04.001.
- [21] L. A. Kennedy, J. P. Bingue, A. V. Saveliev, A. A. Fridman, and S. I. Foutko, "Chemical structures of methane-air filtration combustion waves for fuel-lean and fuel-rich conditions," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, no. 1, pp. 1431–1438, 2000, doi: 10.1016/S0082-0784(00)80359-8.
- [22] A. Banerjee and A. V. Saveliev, "High temperature heat extraction from counterflow porous burner," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 127, pp. 436–443, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.027.
- [23] S. M. Hashemi and S. A. Hashemi, "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, doi: 10.1016/j.fuel.2017.04.008.
- [24] S. N. Hoda, S. A. Gandjalikhan Nassab, and J. J. Ebrahim, "Three dimensional numerical simulation of combustion and heat transfer in porous radiant burners," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 145, 2019, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106024.

- [25] G. Wang, P. Tang, Y. Li, J. Xu, and F. Durst, "Flame front stability of low calorific fuel gas combustion with preheated air in a porous burner," *Energy*, vol. 170, pp. 1279–1288, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.128.
- [26] E. C. Okafor, Y. Naito, S. Colson, A. Ichikawa, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, "Measurement and modelling of the laminar burning velocity of methane-ammonia-air flames at high pressures using a reduced reaction mechanism," *Combust Flame*, vol. 204, pp. 162–175, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.combustflame.2019.03.008.
- [27] G. Vignat, B. Akoush, E. R. Toro, E. Boigné, and M. Ihme, "Combustion of lean ammonia-hydrogen fuel blends in a porous media burner," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 4, pp. 4195–4204, 2023, doi: 10.1016/j.proci.2022.07.054.
- [28] B. Straughan, *Convection in porous media*, vol. 165. 2008. doi: 10.1007/978-0-387-76543-3_4.
- [29] A. Costa, "Permeability-porosity relationship: A reexamination of the Kozeny-Carman equation based on a fractal pore-space geometry assumption," *Geophys Res Lett*, vol. 33, no. 2, Jan. 2006, doi: 10.1029/2005GL025134.
- [30] Ansys Inc., "ANSYS fluent user's guide, Canonsburg, PA, 2011"
- [31] X. Fu, R. Viskanta, and J. P. Gore, "Measurement and correlation of volumetric heat transfer coefficients of cellular ceramics," *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 17, no. 4, pp. 285–293, 1998, doi: 10.1016/S0894-1777(98)10002-X.
- [32] S. Ni and D. Zhao, "NOx emission reduction in ammonia-powered micro-combustors by partially inserting porous medium under fuel-rich condition," *Chemical Engineering Journal*, vol. 434, p. 134680, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.134680.

English Abstract

Impact of Dimensionless Parameters on the Combustion of the Carbon-Free Fuel of Ammonia/Methane blend in Porous Media

Ali Tolouei¹, Ayat Ghareghani^{2*}

1- School of Mechanical Engineering, Iran university of science and technology, Tehran, Iran, toloei_ali@mecheng.iust.ac.ir

2- School of Mechanical Engineering, Iran university of science and technology, Tehran, Iran, ayat_ghareghani@iust.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2025/01/14, Received in revised form: 2025/02/19, Accepted: 2025/03/02)

The present study investigates the combustion of an ammonia/methane mixture in a porous medium and the impact of various parameters on the stability and intensity of this process. The use of ammonia as a carbon-free fuel presents challenges such as reduced flame temperature and speed, which may hinder effective heat transfer in combustion systems. Additionally, the nitrogen present in ammonia can lead to increased production of nitrogen oxides (NO_x), which are major air pollutants. To address these issues, the use of a porous medium in the combustion chamber can help improve combustion conditions and reduce pollutant emissions. In this study, the effects of various parameters, such as the porosity of the porous medium (ranging from 0.5 to 1.0), the ammonia fuel fraction in the ammonia/methane mixture (ranging from 0.1 to 0.9), and the fuel-to-air equivalence ratio (ranging from 0.5 to 1.5), were numerically investigated and compared with experimental data. The results show that variations in porosity and fuel ratio have significant effects on combustion temperature, pollutant emissions, and flame stability. An increase in porosity enhances heat and mass transfer, thereby improving flame stability and combustion temperature. Furthermore, increasing the methane fraction in the fuel mixture raises the combustion temperature, while increasing the ammonia share can result in lower temperature and higher NO_x production. These findings highlight the importance of optimizing the porosity, fuel ratio, and equivalence ratio simultaneously in combustion systems to reduce pollutants and enhance the efficiency of combustion processes.

Keywords: Porous medium combustion, ammonia, methane, nitrogen oxide emissions, carbon dioxide emissions