نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۱۳۲ – ۱۱۹

تست تجربی اکسیداسیون جزیی متان در میکرو راکتور محیط متخلخل جهت تولید هیدروژن

[۱] حمید رضا لاری*، [۲] محمدرضا شاه نظری

چکیده

یکی از تکنولوژی‌های آتی تأمین انرژی در صنعت برق و خودرو استفاده از پیل‌های سوختی می‌باشد. هیدروژن به عنوان منبع اصلی سوخت در پیل‌های سوختی می‌باشد. رفرمینگ متان از طریق اکسیداسیون جزیی متان از روش‌های تولید هیدروژن می‌باشد. در این مقاله این فرایند جهت تولید گاز هیدروژن که به عنوان منبع انرژی این پیل‌های سوختی می‌باشد به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا مدل‌سازی برای یک راکتور محیط متخلخل انجام و سپس پایلوت آزمایشگاهی جهت تست تجربی ساخته شد. جهت ایجاد محیط متخلخل در راکتور از گرانول‌ها اکسید آلومینیوم استفاده شده است. با هدف ماکزیمم تولید هیدروژن، چگونگی تأثیر تغییرات نسبت هم‌ارزی هوا به سوخت برای مقادیر نسبت‌های ۱/۵ و ۲ انجام و نتایج ارائه شده است. همچنین پروفیل‌های درجه حرارت در محور مرکز راکتور در سه مقطع اندازه‌گیری و نتایج به همراه مقادیر غلظت منوکسید کربن و هیدروژن در خروجی راکتور ارائه شده است.

تاریخ دریافت:
۱۳۹۶ / ۱۰ / ۰۴

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۸ / ۰۳ / ۱۸

کلمات کلیدی:
رفرمینگ متان، اکسداسیون جزیی، پیل سوختی، محیط متخلخل، هیدروژن

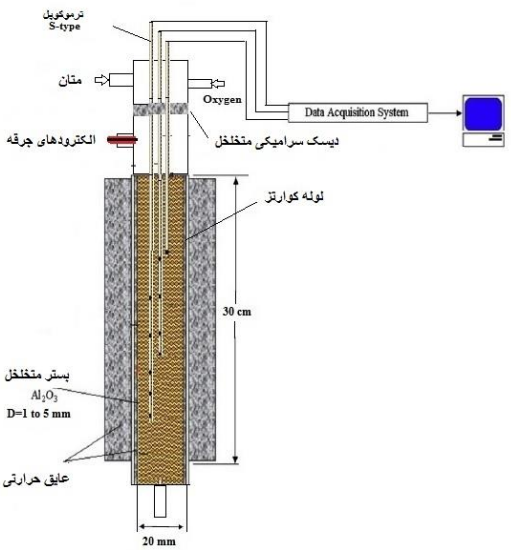
۱. رئیس مرکز توسعه فناوری توربین‌های بادی –پژوهشگاه نیرو (نویسنده مسئول) hlari@nri.ac.ir
۲. دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک – دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی shahnazari@kntu.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

۱. مقدمه

هیدروژن به عنوان یکی از منابع مهم انرژی نقش بسزایی در توسعه تکنولوژی پیل‌های سوختی خواهد داشت. با توجه به فرایندهای مختلف صنعتی برای تولید هیدروژن, اخیراً توجه به‌سزایی به فرایندهای با ظرفیت کوچک شده است. فرایند اکسیداسیون جزیی گاز متان در محیط متخلخل از جمله این فرایند می‌باشد که از دیدگاه اقتصادی جایگاه مناسبی دارد. طی یک دهه گذشته تحقیقات زیادی بر روی توسعه تکنولوژی این فرایند انجام شده است که در حال حاضر نیز توسعه تکنولوژی این سیستم ادامه دارد. این فرایند شامل راکتوری با بستر محیط متخلخل می‌باشد که با استفاده از فرایند احتراق ناقص متان گاز سنتز تولید و با کنترل شرایط فرایندی در راکتور تولید هیدروژن ممکن می‌شود (شکل ۱) . در این فرایند گاز سنتز و در نهایت با کنترل فرایند هیدروژن تولید می‌شود. واکنش تبدیل گاز متان به هیدروژن یک واکنش گرمازا بوده و به‌صورت زیر است.

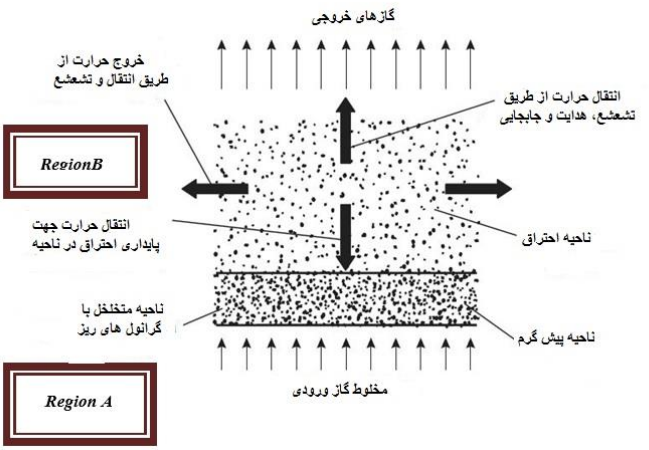
$$CH_4 + 0.5O_2 \leftrightarrow CO + 2H_2 \qquad (۱)$$



شکل ۱. شماتیک طرح راکتور محیط متخلخل تولید گاز سنتز

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

ساختار کلی احتراق و انتقال حرارت در این راکتورها مشابه مشعل‌های محیط متخلخل می‌باشد. انتقال حرارت در یک محفظه احتراق با متخلخل توسط هر سه مکانیزم تابش، هدایت و جابجایی انجام می‌شود، که البته نقش هدایت و تابش به مراتب بیشتر از جابجایی است. شکل ۲ شماتیک انتقال حرارت در یک محفظه محیط متخلخل نشان می‌دهد. پایداری منطقه احتراق تحت شرایط Steady – State به شدت تابع خواص اجسام متخلخل مانند میزان تخلخل، ضریب هدایت حرارتی، ضریب صدور و... واقع در نواحی B و A می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، حرارت تولید شده در منطقه احتراق از طریق مکانیزم جابجایی به قالب متخلخل منتقل شده و سپس از طریق تابش و هدایت به محیط اطراف انتقال می‌یابد. البته مقداری از این حرارت توسط مکانیزم‌های هدایت و تابش به قسمت ورودی مشعل (ناحیه A) منتقل می‌شود.



شکل ۲. چگونگی انتقال حرارت در داخل یک مشعل متخلخل [۲]

کنترل این فرایندها تأثیر به‌سزایی در تولید گاز سنتز و در نتیجه تولید هیدروژن دارد. ارائه یک مدل دقیق از فرایند احتراق در محیط متخلخل و واکنش‌های شیمیایی مربوطه که به صورت یک سازوکار برگشت انرژی بر روی یکدیگر اثرگذار هستند، از روش‌های مناسب در پیش‌بینی این فرایند می‌باشد. در این مقاله جهت انجام تست تجربی پایلوت آزمایشگاهی راکتور لوله‌ای محیط متخلخل طراحی و ساخته شد. جهت مقایسه نتایج تست مدل‌سازی برای این راکتور انجام شده و سپس نتایج حاصل با نتایج تست تجربی مقایسه می‌شود. جهت ایجاد محیط متخلخل در این راکتور از گرانول‌های

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

اکسید آلومینیوم استفاده شده است. در تست‌های انجام شده اثرات شرایط محیط متخلخل شامل ویژگی ساختاری مواد مانند قطر ذرات، میزان تخلخل و همچنین تغییرات فیزیکی راکتور شامل قطر و طول راکتور، و در نهایت نسبت هم‌ارزی سوخت و هوا و دبی جریان ورودی با رویکرد بر تولید بیشتر هیدروژن بررسی می‌شود.

۲. ادبیات موضوع

تحقیق‌های تجربی و عددی زیادی در زمینه تولید هیدروژن در محیط متخلخل انجام شده‌اند. در بحث تولید هیدروژن در محیط متخلخل اثر طراحی راکتور، ماده محیط متخلخل و ساختار آن، نسبت هم‌ارزی و دبی جریان فرایند اکسیداسیون جزیی در محیط متخلخل بررسی شده است. بابکین احتراق ناقص گرمایی متان در دو محیط متخلخل متفاوت با خواص رسانایی و تشعشع گرمایی متفاوت، شامل فوم سیلیسیم کاربید و اکسید آلومینیوم AL_2O_3 مطالعه نموده است [۲]. پدرسون و همکاران در یک آزمایش تجربی با استفاده از معیار پایداری عدد پکلت، احتراق غنی متانول، متان، اکتان و بنزین درجه خودرو داخل یک محیط متخلخل خنثی در داخل یک لوله کوارتز یا چینی برای تحقیق امکان تولید هیدروژن، بررسی نمودند [۹، ۱۰]. سو و همکاران دریافتند که ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضرایب تشعشعی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در پیش‌بینی میدان دمای فاز گاز و جامد در محیط متخلخل دارد [۴]. برای دستیابی به نتایج صحیح در شبیه‌سازی عددی، لازم است خواص محیط متخلخل بر اساس داده‌های تجربی دقیق مورد استفاده قرار گیرد. هاول و همکاران خواصی نظیر ضریب هدایت مؤثر، ضرایب نفوذپذیری و ضریب اضمحلال را برای برخی از محیط‌های متخلخل بر اساس آزمایش‌ها تجربی بیان کرده‌اند [۳].

میگوئل و همکاران مدل‌سازی برای راکتور های با محیط متخلخل انجام دادند و در شرایط احتراق ناقص بهینه‌ترین نسبت هوا به سوخت را با توجه به شرایط تولید دوده و راندمان تبدیل متان به‌دست آوردند [۶]. پن و همکاران با بهره‌گیری از آزمایش‌های تجربی و نتایج عددی ضریب هدایت مؤثر محیط متخلخل را برای برخی از انواع سرامیک‌ها به‌دست آوردند [۸]. مالیکو و پریرا به بررسی تأثیر خواص تشعشعی محیط متخلخل بر عملکرد مشعل‌های متخلخل استوانه‌ای شکل در حالت دو بعدی پرداختند [۵]. آنها دریافتند که توزیع دما به شدت تابع پارامترهای تشعشعی خصوصاً تابع فاز تفرق می‌باشد و اگر از تشعشع صرف‌نظر شود نتایج با داده‌های تجربی موجود انطباق خوبی نخواهد داشت.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

یک مرور جامع برای احتراق رقیق اکسیژن در محیط‌های متخلخل توسط سوسی و الموجیب در مراجع [۷، ۱۱] ارائه شده است که شامل قوانین پایه حاکم بر فرایندهای احتراقی، مشخصات معمولی مشعل‌های متخلخل و مثال‌های خاص از عملکرد مشعل‌ها می‌باشد. نتایج مهم به دست آمده از فرایندهای احتراق رقیق اکسیژن در محیط متخلخل، دری به سوی استفاده از این تکنولوژی در جهت تولید هیدروژن باز کرده‌اند. در محیط متخلخل، شبکه متخلخل که ظرفیت گرمایی بالایی دارد، در یک راکتور خود بازیاب، گرمایی محصولات داغ را برای واکنش‌دهنده‌های نسوخته بازیابی می‌کند. بنابراین یک واکنش متکی به خود، در رنج گسترده‌ای از نسبت‌های هم‌ارزی انجام می‌گردد. دماهای ماکزیمم در این راکتور از دمای تعادل آدیاباتیک (شرایط احتراق سوپر–آدیاباتیک) بالاتر می‌روند.

الهمر و همکاران در دیگر کارهای تجربی بر روی احتراق ناقص در شبکه محیط متخلخل اثر پارامترهای دیگر شامل سرعت ورودی (بار گرمایی)، نسبت هم‌ارزی و ماده متخلخل (رسانایی گرمایی و گرمای ویژه ماده متخلخل) تحقیق شده است. در این تحقیقات، محصولات خروجی از راکتور، توسط یک مبدل خنک شده و به صورت گاز خشک وارد دستگاه گاز کروماتوگراف یا سیستم آنالیزور گاز شده‌اند [۱]. ترکیب محصولات برای گازهای H_2، CO، CO_2، N_2، O_2، CH_4و C_2H_2 آنالیز می‌شود. ژدانک آزمایش‌هایی برای مواد متخلخل متفاوت، هندسه‌های محیط متخلخل گوناگون انجام داد [۱۲].

۳. مدل‌سازی عددی در محیط متخلخل

همان‌گونه که بیان گردید پارامترهای بسیاری مانند نسبت هوا به سوخت، خواص متفاوت مواد متخلخل، دبی جرمی سوخت و هوا و پارامترهای فیزیکی راکتور در احتراق ناقص در راکتورهای محیط متخلخل مؤثر می‌باشند. در یک مطالعه تجربی انجام آزمایشات برای بررسی این موارد بسیار پرهزینه و زمان‌بر خواهد بود. با استفاده از مدل‌سازی امکان بررسی شرایط کارکرد سیستم با لحاظ نمودن کلیه پارامترها و با حداقل تلاش را به محقق می‌دهد. به علاوه با مدل عددی میتوان عملکرد سیستم را که به صورت تجربی و به راحتی قابل امتحان کردن نیستند، را انجام داد. با توجه به این امر راکتور با محیط متخلخل که در آن احتراق ناقص اتفاق می‌افتد با توجه به شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود.

این راکتور شامل پوسته استوانه‌ای از جنس کوارتز می‌باشد که با گرانول اکسید آلومینیوم که به عنوان محیط متخلخل است پر شده است. مخلوط اکسیژن و متان غنی بعد از عبور از یک صفحه متخلخل سرامیکی به محفظه اصلی وارد می‌گردد. در این مرحله با جرقه حاصل از الکترودها، احتراق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

آغاز شده و با شرایط ورودی سوخت و هوا فرایند اکسیداسیون جزیی صورت می‌گیرد. برای جبران انبساط حرارتی در بستر فشرده شده و سیلندر و جهت جلوگیری از واکنش‌های حرارتی بین این دو، قطر داخلی لوله استوانه‌ای را با عایق حرارتی سرامیکی پوشیده می‌شود. که این امر باعث می‌شود تلفات حرارتی هدایت از دیواره لوله بدلیل پوشش عایقی در بیرون سیلندر به حداقل می‌رسد. در مدل‌سازی انجام شده معادلات بقای جرم، ممنتوم، انرژی و واکنش‌ها برای جریان آرام[1] و غیر همدمای یک مخلوط واکنش‌دهنده شیمیایی استفاده شده جهت مدل‌سازی برای پیش‌بینی رفتار احتراق ناقص در محیط متخلخل هستند. دو روش متفاوت در مدل کردن انتقال حرارت در محیط متخلخل به نام‌های، مدل تعادل حرارتی و عدم تعادل حرارتی وجود دارد. در این تحقیق در مدل‌سازی عدم تعادل حرارتی بین فاز سیال و فاز جامد محیط متخلخل لحاظ شده است.

٤. دستگاه تست



شکل ۳. راکتور احتراقی با طول و قطرهای مختلف

بر اساس شکل شماتیک ۱ جهت انجام آزمایش‌های تجربی سیستم تست ساخته شد. این دستگاه‌ها شامل یک راکتور لوله‌ای از جنس کوارتز می‌باشد که با یک محیط متخلخل از نوع اکسید آلومینیوم پر شده است. ضخامت دیواره لوله کوارتز ۲ میلیمتر می‌باشد. جهت اندازه‌گیری دما در سه

1. Laminar flow

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

نقطه داخلی راکتور از ترمومتر استفاده گردید. در تست‌های انجام شده از لوله‌های احتراق با سه قطر داخلی و سه طول مختلف استفاده شد (شکل ۳). سطح داخلی لوله احتراق با یک لایه ۲ میلیمتر از کاغذ سرامیکی پوشیده شده بود. همچنین برای جلوگیری از تلفات حرارتی و دستیابی به پروفیل‌های درجه حرارت شبه یکنواخت، عایق با درجه حرارت بالا با ضخامت ۲۰ میلیمتر بر روی قطر خارجی راکتور اعمال شد.

همان‌گونه که بیان شد در این راکتور از اکسید آلومینیوم به عنوان محیط متخلخل استفاده شد. به منظور بررسی میزان تخلخل و تأثیر آن در عملکرد احتراق از گرانول‌های ۱، ۳ و ۵ میلیمتر (شکل ۴) استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری دبی ورودی واکنش دهنده‌ها و ایجاد مخلوط قابل اشتعال شامل متان و اکسیژن از فلومترهای با دقت ۰/۱ استفاده گردید. برای اطمینان از ترکیب دو گاز اکسیژن و متان در بدو ورود در محفظه اولیه مخلوط شده و بعد از عبور از یک لایه سرامیکی به بخش جرقه‌زنی وارد می‌شود. محصولات احتراق در خروجی راکتور پس از عبور از سیستم خنک‌کننده گاز به یک مخزن جمع‌آوری وارد شده تا امکان آزمایش نمونه را فراهم کند. در خروجی، با استفاده از ابزار اندازه‌گیری به صورت همزمان میزان اکسیژن، منواکسید کربن و متان اندازه‌گیری شد. در شکل ۵ مجموعه کامل آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل ۴. گرانول‌های اکسید آلومینیوم با قطرهای ۱،۳ و ۵ میلیمتر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل ۵. سیستم آزمایشگاهی تست احتراق ناقص در محیط متخلخل

۵. بحث و نتیجه‌گیری

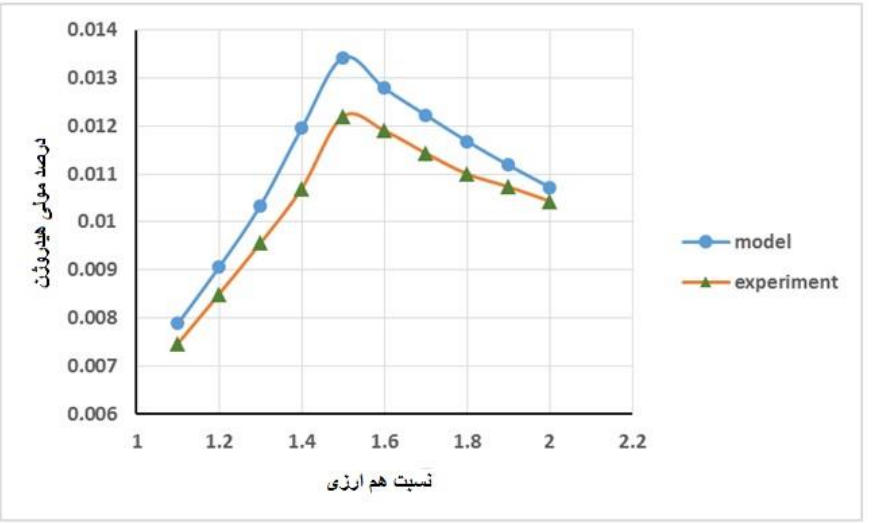
همان‌گونه که بیان گردید در این مقاله جهت بررسی اکسیداسیون جزیی متان در محیط متخلخل، نتایج تجربی برای یک راکتور لوله‌ای پر شده از مواد محیط متخلخل، انجام می شود. در این بررسی اثرات شرایط محیط متخلخل شامل ویژگی ساختاری مواد مانند قطر ذرات ، میزان تخلخل و همچنین تغییرات فیزیکی راکتور شامل قطر از ۲۰ میلیمتر تا ۴۰ میلیمتر و طول راکتور از ۲۰ سانتیمتر تا ۴۰سانتیمتر، و در نهایت نسبت هم‌ارزی سوخت و هوا و دبی جریان ورودی با رویکرد بر تولید بیشتر هیدروژن انجام شده و نتایج ارائه می‌گردد.

۵-۱. بررسی نسبت هم ارزی

نسبت هم‌ارزی (λ) نسبت هم‌ارزی هوا – سوخت/۱=(φ) یک اثر قابل توجه روی ترکیب محصولات، سطح دما در راکتور و پایداری واکنشی دارد. گستره عملکرد پایدار با افزایش φ کوچکتر می‌شود. همان‌طور که φ افزایش می‌یابد، انرژی آزاد شده توسط واکنش در واحد جرم سوخت کاهش می‌یابد زیرا اکسیژن کمتری برای تکمیل واکنش در دسترس است. این پدیده منجر می‌شود که انرژی کمتری برای پیش گرم کردن گازهای وارد شونده در دسترس باشد و در نتیجه سرعت‌های شعله کاهش یافته و در نهایت رنج نقاط عملکرد پایدار را محدود می‌کند. همچنین، چون مقدار کمتری O_2 برای اکسیداسیون هیدروکربن در دسترس است، اکسیداسیون ناقص اتفاق می‌افتد که منجر به تشکیل

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

CO، H_2 و هیدروکربن‌های با وزن مولکولی پایین می‌گردد. در شکل ۶ نتایج حاصل از تست تجربی و مقایسه آن با نتایج مدل‌سازی برای طول راکتور ۳۰ سانتیمتری ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد بیشترین میزان هیدروژن خروجی در شرایطی که نسبت هم‌ارزی برابر ۱/۵ می‌باشد به‌دست می‌آید. از طرفی ملاحظه می‌گردد نتایج تجربی با نتایج مدل‌سازی مطابقت خوبی را دارد.

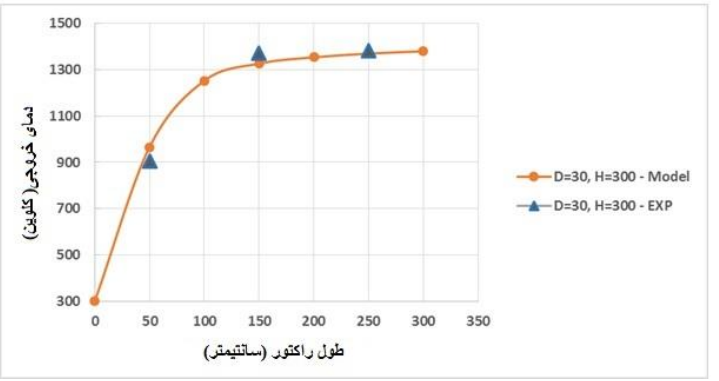


شکل ۶. نتایج تجربی و مدل‌سازی تغییرات درصد مولی هیدروژن با نسبت هم‌ارزی

۵-۲. توزیع دما در راکتور

در شکل ۷ نتایج مدل‌سازی و تجربی توزیع دما در داخل راکتور نشان داده شده است. برای مدل نتایج را در بخش‌های مختلف نشـــان می‌دهد. در مجموعه تســـت ۳ ترمومتر برای اندازه گیری دما در طول راکتور نصب شـده اسـت. لازم به ذکر اسـت که نتایج آزمون برای دبی جرمی متان و اکسـیژن در ۱۰۰ لیتر در ساعت می‌باشد. نسبت هم‌ارزی در این مدل مقدار ثابت ($\varphi = 2$) است. با توجه به نمودار نتایج تطابق خوبی با مدل‌سـازی انجام شـده دارد. در مدل‌سـازی میزان تلفات انتقال حرارت در راکتور لحاظ شده است که حاکی از مدل‌سازی مناسب در طرح می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



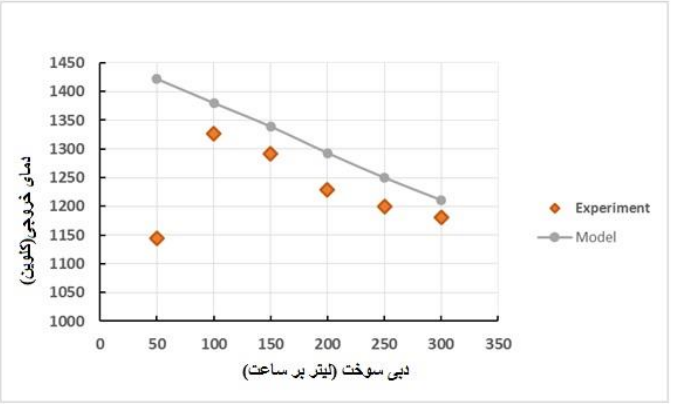
شکل ۷. نتایج مدل‌سازی و تجربی توزیع دما در طول راکتور
برای نسبت هم‌ارزی ۲و دبی جرمی متان و اکسیژن در ۱۰۰ لیتر در ساعت

۵-۳. اثر دبی جریان سوخت و اکسیدکننده

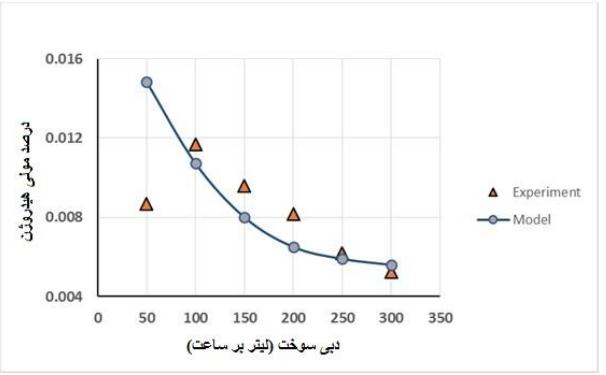
دبی جرمی جریان از جنبه‌های مختلفی بر فرایند احتراق ناقص گرمایی در محیط متخلخل تأثیر می‌گذارد: زمان سکون، درجه توزیع و بار گرمایی. می‌دانیم که دبی جرمی بالا منجر به زمان سکون کوتاه در راکتور می‌گردد. این بدین معنی است که واکنش‌دهنده زمان کمتری برای انجام واکنش دارد. همچنین، دبی جرمی بالای مخلوط سوخت/ هوا با درجه بالایی از توزیع همراه شده و یک بار گرمایی بالاتر از دبی‌های جرمی کم در بر می‌گیرد.

اگرچه، اگر راکتور برای یک رنج نوسان وسیع ساخته شده باشد، همانند راکتورهای محیط متخلخل، تأثیر زمان سکون بر درجه تبدیل در مقایسه با اثر توربولانس و گرمای آزاد شده در ساختار متخلخل کوچک خواهد بود. بنابراین انتظار می‌رود که با بارهای گرمایی بالا غلظت هیدروژن بیشتر از حالت بارهای گرمایی پایین باشد اگر چه که زمان سکون کمتر است. این پدیده به خاطر این واقعیت است که اتلافات گرمایی نسبی در بارهای گرمایی بالا، کمتر از حالت بارهای گرمایی پایین می‌باشد. این بدین معنی است که بخش کوچکی از حرارت برای پیش گرم کردن گازهای ورودی به سمت جریان بالا دست انتقال می‌یابد. متعاقباً در حالت توان کم، محصول هیدروژن کم و سطح دمای پایین در راکتور انتظار می‌رود. در شکل ۸ توزیع دما در راکتور با قطر ۳۰ میلیمتر و طول ۳۰ سانتیمتر با نسبت هم‌ارزی ۲ برای دبی‌های مختلف ارائه شده است. در شکل ۹ تغییرات درصد مولی هیدروژن در خروجی راکتور برای دبی‌های مختلف برای راکتور فوق‌الذکر ارائه شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل۸. تغییرات دما در راکتور با قطر ۳۰ میلیمتر و طول ۳۰ سانتیمتر با نسبت هم‌ارزی ۲ برای دبی‌های مختلف سوخت



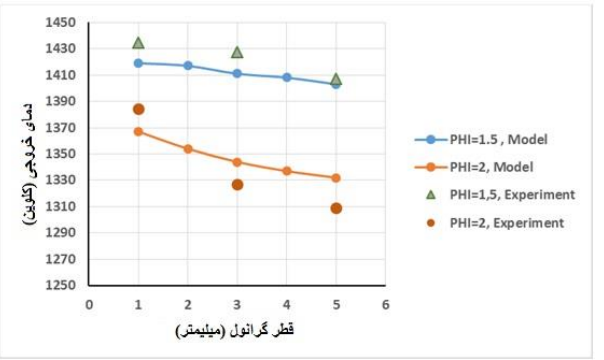
شکل۹. تغییرات هیدروژن تولیدی در خروجی راکتور با قطر ۳۰ میلیمتر و طول ۳۰ سانتیمتر با نسبت هم‌ارزی ۲ برای دبی‌های مختلف سوخت

۵-٤. اثر قطر ماده شبکه متخلخل

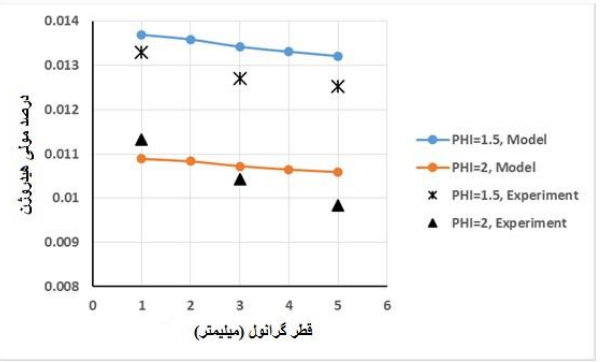
همان‌گونه که بیان شد بالا بودن میزان انتقال حرارت در اجسام متخلخل تنها به دلیل داشتن ضریب هدایت حرارتی بالا نیست، بلکه وجود خلل و فرج‌های بسیار در اجسام متخلخل موجب می‌شود تا سطح انتقال حرارت افزایش یافته و در نتیجه میزان انتقال حرارت نیز به همین نسبت زیاد می‌گردد. از پارامترهایی که در این امر مؤثر می‌باشد قطر گرانول‌های موجود در محیط متخلخل می‌باشد. در این مدلسازی با در نظر گرفتن خواص ترموفیزیکی اکسید آلومینیوم قطر ذرات از ۱ میلیمتر تا ۵ میلیمتر در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰ تغییرات دما در خروجی راکتور با قطرهای متفاوت گرانول اکسید آلومینیوم در راکتور با قطر mm ۳۰ و طول cm ۳۰ با نسبت هم‌ارزی ۱/۵ و ۲ ارائه شده است. در شکل۱۱ نیز تغییرات درصد مولی هیدروژن با تغییرات قطر گرانول نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد با کاهش قطر گرانول درصد مولی هیدروژن بیشتر می‌گردد. این امر به دلیل میزان مساحت سطح ساختار متخلخل می‌باشد که بر تبدیل سوخت در فرایند اکسیداسیون جزیی مؤثر است. قطرهای کمتر گرانول‌های اکسید آلومینیوم باعث ایجاد مساحت سطح بالاتر و مسیر پر پیچ و خم طولانی‌تر جریان گاز در شبکه متخلخل شده و پراکندگی را افزایش می‌دهد که این امر باعث می‌شود انتقال حرارت مؤثر بالا بین گاز و شبکه جامد متخلخل بیشتر شود و در نتیجه می‌توان به تبدیل بالاتر سوخت رسید. در شکل ۱۲ توزیع درصد مولی تولید هیدروژن در راکتور مربوطه نشان داده شده است.

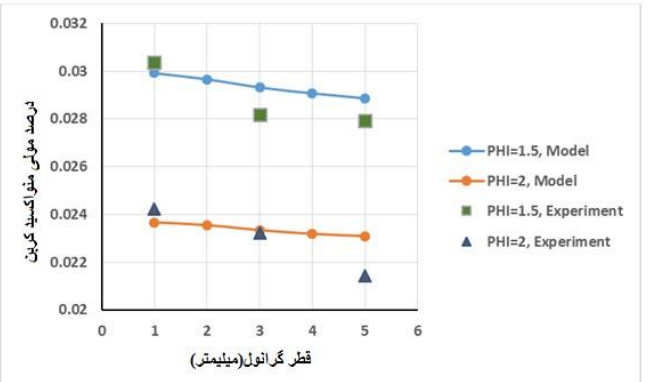


شکل ۱۰. تغییرات دما در خروجی راکتور برای قطرهای مختلف گرانول با نسبت هم ارزی‌های مختلف



شکل ۱۱. تغییرات هیدروژن تولیدی در خروجی راکتور برای قطرهای مختلف گرانول با نسبت هم ارزی‌های مختلف

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل ۱۲. تغییرات منوکسید کربن در خروجی راکتور برای قطرهای مختلف گرانول با نسبت هم ارزی‌های مختلف

۵. جمع‌بندی

همان‌گونه که بیان شد یکی از تکنولوژی‌های آتی تأمین انرژی در صنعت برق و خودرو استفاده از پیل‌های سوختی می‌باشد. هیدروژن به عنوان منبع اصلی سوخت در پیل‌های سوختی می‌باشد. در این مقاله فرایند اکسیداسیون جزیی متان جهت تولید گاز هیدروژن که به عنوان منبع انرژی پیل‌های سوختی می‌باشد به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله با هدف بررسی ماکزیمم تولید هیدروژن نتایج تست‌های تجربی برای اکسیداسیون جزیی متان در یک راکتور لوله‌ای با محیط متخلخل ارائه و با نتایج مدل‌سازی مقایسه شده است. در نتایج تجربی و مدل‌سازی مشخص گردید که نسبت ارزی بهینه جهت میزان هیدروژن خروجی بیشتر برابر ۱/۵ می‌باشد. در ادامه نتایج حاصل از تست‌های تجربی و مدلسازی برای بررسی اثرات شرایط محیط متخلخل شامل ویژگی ساختاری مواد مانند قطر ذرات، مورد ارزیابی قرار گرفت که نشان داده شده که راکتور با گرانول قطر ۱میلیمتر دارای عملکرد بهتری می‌باشد. همچنین تأثیر دبی جرمی سوخت و اکسیژن بررسی شد که به‌جز در دبی کم ۵۰ لیتر بر ساعت در بقیه دبی‌ها تطابق مناسبی وجود دارد. اختلاف مقادیر نتایج تجربی و مدل‌سازی در دبی ۵۰ لیتر بر ساعت به علت عدم امکان پایدار نمودن شعله به صورت تجربی بود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

منابع

[1] Al-Hamamre Z., Voss S. and D. Trimis (2009) "Hydrogen Production by Thermal Partial Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Porous media based Reformer". *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2), pp.827–832.

[2] Babkin V. (1993) "Filtrational Combustion of Gases. Present state of Affairs and Prospects". *Pure Appl Chem*, No. 44, pp. 335-344.

[3] Howell J.R., Hall M.J. and J.L. Ellzey (1995) "Combustion within Porous Inert Medium", *ASME HTD, Heat Transfer in Porous Media and Two-Phase Flow*, No. 302, pp. 1-21.

[4] Hsu P.F., Hoewll J.R. and R.D. Mettews (1993). "A Numerical Investigation of Premixed Combustion Within Porous Inert Media', *ASME J. of Heat Transfer*, 115(3), pp. 744-750.

[5] Malico I. and J.C.F. Pereira (2001) "Numerical Study on the Influence of Radiative Properties in Porous Media Combustion", *ASME Journal of Heat Transfer*, 123(5), pp. 951-957.

[6] Miguel A.A. Mendes*, Jose´ M.C. Pereira, Jose´ C.F. Pereira, (2014) "Numerical study of methane TPOX within a small scale Inert Porous Media based reformer", *International journal of hydrogen energy*, 39(9), pp. 4311-4321.

[7] Mujeebu M.A., Abdullah M.Z., Abu Bakar M.Z., Mohamad A.A., RMuhad.M.N., R.M.N. and M.K. Abdulah (2009) "Combustion in Porous media and its Applications-a Comprehensive Survey", *Journal of Environmental Management*, 90(8), pp. 2287-2312.

[8] Pan H.L., Pickenäcker O., Pickenäcker K., Trimis D. and T. Weber (2000) "Experimental Determination of Effective Heat Conductivities of Highly Porous Media", *5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto*, pp. 11-14.

[9] Pedersen-Mjaanes H., Chan L. and E. Mastorakos (2005) "Hydrogen production from rich combustion in porous media". *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(6), pp. 579–92.

[10] Pedersen-Mjaanes H. and E. Mastorakos (2005) "Optimization of hydrogen production from Rich Combustion of Methane in Porous Media", *Proceedings of the European Combustion Meeting*.

[11] Susie W. and A.T. Harris (2008) "Porous Burners for Lean-burn Applications", *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(5), pp.667–684.

[12] Zhdanok S.A. (2003) "Porous media combustion based hydrogen production", *European Combustion Meeting*.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]