



Numerical Study of the Effect of Geometry on the Thermal Performance of a Two-Layer Porous Burner with Biogas Fuel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Abedi Andani S.¹,
Hashemi S.A.^{1*},
Fattahi A.¹

How to cite this article

Abedi Andani S, Hashemi S.A, Fattahi A. Numerical Study of the Effect of Geometry on the Thermal Performance of a Two-Layer Porous Burner with Biogas Fuel. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(12):687-697.

¹ Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

hashemi@kashanu.ac.ir

Article History

Received: February 9, 2025
Accepted: October 26, 2024
Published: January 21, 2025

ABSTRACT

Biogas is a low-calorie fuel comprises 50-70% methane and 30-50% carbon dioxide, with small amounts of other particles. Combustion of low-calorie fuels often involves significant challenges related to flame stability in most burners. Combustion of porous media is an effective method of directing flame heat to the input mixture, which can increase flame stability. In most studies, biogas has been used in experimental work or numerical simulation with simple geometry. In this paper, researchers simulate a two-layer porous burner with biogas fuel, based on an experimental design, in two dimensions. They evaluate the effect of the burner geometry, which was not investigated in previous researches, on the temperature distribution and the radiation efficiency. The results show that reducing the amount of carbon dioxide increases the burner surface temperature. Additionally, changes in the interface of the porous layers, simulated in two conical and spherical forms in two converging and diverging states, cause changes in the place of flame, the maximum combustion temperature, the temperature of the burner surface, and the radiation efficiency. The maximum combustion temperature and the maximum burner surface temperature occur for the conical geometry in convergent mode. Increasing 10% of carbon dioxide in the biogas fuel reduces the radiation efficiency by 25% on average. The radiation efficiency of the divergent burner is more than the convergent mode, about 37% for conical geometry and about 25% for spherical geometry. The maximum radiation efficiency is achieved when the burner is divergent and the amount of carbon dioxide is 30%.

Keywords Numerical Simulation, Premixed Flame, Porous Medium, Biogas, Radiation Efficiency

CITATION LINKS

1- Administration USEI 2- Biogas from waste and renewable resources: an introduction 3- Thermodynamic prediction of biogas production and combustion... 4- Performance analysis of a biogas operated porous radiant burner for domestic cooking application 5- Numerical study and optimization of a porous burner with annular heat recirculation 6- Unsteady ultra-lean combustion of methane and biogas in... 7- Combustion characteristics of a heat-recirculating ceramic burner using a low-calorific-fuel 8- Experimental investigation on flame stability and emissions of... 9- Stability and propagation of combustion waves in inert porous media 10- An Excess Enthalpy Flame Theory 11- Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized... 12- Flame stability analysis of the premixed methane-air combustion in... 13- Filtration combustion characteristics of low calorific gas in SiC foams 14- On the Combustion of Hydrogen-Rich Gaseous Fuels with Low Calorific Value in a Porous Burner 15- Experimental Study of Biogas Combustion in a Two-Layer Packed Bed Burner 16- An experimental investigation of stability and operation of a biogas fueled porous burner 17- Experimental investigation of submerged flame in packed bed porous media burner fueled by... 18- Experimental studies on biogas combustion in a novel double layer inert Porous Radiant Burner 19- Handbook of porous media 20- Principles of heat transfer in porous media 21- Fluid flow through packed columns 22- ANSYS Fluent User's Guide 23- Measurement and correlation of volumetric heat transfer coefficients of cellular ceramics 24- Experimental study on the radiative properties of open-cell porous ceramics 25- Radiation heat transfer in... 26- An Analysis of Thermal Radiation in Porous Media Under... 27- Numerical Heat Transfer and Fluid Flow 28- GRI Mech 3.0. gas research institute 29- Numerical investigations on combustion characteristics of H₂/air premixed combustion in ... 30- Combustion characteristics and radiation performance of...

مطالعه عددی اثر هندسه بر عملکرد حرارتی

یک مشعل متخلخل دولایه‌ای با سوخت

بیوگاز

سعید عابدی^۱، سید عبدالمهدی هاشمی^{۱*}، ابوالفضل فتاحی^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

بیوگاز یک سوخت کم‌کالری است که از متان (۵۰-۷۰٪) و کربن‌دی‌اکسید (۳۰-۵۰٪)، با مقادیر کمیاب از سایر ذرات تشکیل شده است. احتراق سوخت‌های کم‌کالری اغلب شامل چالش‌های قابل توجهی در رابطه با پایداری شعله در بیشتر مشعل‌های معمولی است. احتراق محیط متخلخل یک روش مؤثر برای هدایت گرمای شعله به مخلوط ورودی است که می‌تواند سبب افزایش پایداری شعله شود. در بیشتر مطالعات، از بیوگاز در کار آزمایشگاهی یا شبیه‌سازی عددی با هندسه ساده استفاده شده است. در این مطالعه یک مشعل متخلخل دولایه‌ای با سوخت بیوگاز با هندسه برگرفته از یک کار آزمایشگاهی به صورت دوبعدی شبیه‌سازی عددی شده است و اثر هندسه مشعل که در تحقیقات قبل بررسی نشده بود، بر روی توزیع دمای جامد متخلخل و بازده تابشی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش مقدار کربن‌دی‌اکسید در ترکیب سوخت باعث افزایش دمای سطح مشعل می‌شود. همچنین تغییر در سطح مشترک لایه‌های متخلخل که به دو صورت مخروطی و کروی در دو حالت همگرا و واگرا شبیه‌سازی شده است، باعث تغییر در مکان تشکیل شعله، دمای بیشینه احتراق، دمای سطح مشعل و بازده تابشی مشعل می‌شود. بیشترین دمای احتراق و بیشترین دمای سطح مشعل برای هندسه مخروطی در حالت همگرا رخ می‌دهد. با افزایش ۱۰ درصد کربن‌دی‌اکسید در ترکیب سوخت بیوگاز ورودی، بازده تابشی به‌طور متوسط ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. بازده تابشی مشعل واگرا در حالت هندسه مخروطی حدود ۳۷ درصد و در حالت هندسه کروی حدود ۲۵ درصد بیشتر از مشعل همگرا است. بیشترین بازده تابشی برای مشعل واگرا با کربن‌دی‌اکسید ۳۰ درصد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی عددی، شعله‌ی پیش‌آمیخته، محیط متخلخل، بیوگاز، بازده تابشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲

* نویسنده مسئول: hashemi@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

مصرف کلی انرژی جهان طی سالیان گذشته افزایش داشته و پیش‌بینی می‌شود این روند تا سال‌ها و دهه‌های آینده نیز ادامه یابد. طبق پیش‌بینی‌ها مصرف تمامی سوخت‌ها تا سال ۲۰۵۰ افزایش می‌یابد. نکته‌ی مهم این است که تقاضا برای سوخت‌های تجدیدپذیر نسبت به سایر انواع سوخت‌ها بیشتر افزایش خواهد داشت به طوری‌که بیشترین شیب افزایش مصرف در بین سوخت‌ها مربوط به سوخت‌های تجدیدپذیر است [1].

مسائل و مشکلات استفاده از سوخت‌های فسیلی، مانند افزایش آلودگی هوا و رو به اتمام بودن آن‌ها و بسیاری موارد دیگر باعث حرکت جهانی به سمت منابع جدید انرژی شده است. یکی از مهم‌ترین منابع جدید انرژی که در سال‌های اخیر اهمیت بسیار زیادی پیدا کرده است، سوخت‌های کم‌کالری (low-calorific fuels)

هستند که از زیست‌توده و گیاهان به دست می‌آیند. استفاده از این سوخت‌ها یکی از جذاب‌ترین مسائل پژوهشی امروزه هست. یکی از سوخت‌های کم‌کالری بیوگاز (biogas) است که به‌عنوان یک سوخت جایگزین، هم پایدار و هم تجدیدپذیر در طبیعت است. تولید آن از طریق هضم بی‌هوازی (anaerobic digestion) کود حیوانی، زباله‌های کشاورزی، زباله‌های خانگی و زباله‌های آلی شهری انجام می‌شود. هضم بی‌هوازی تجزیه میکروبی مواد آلی در غیاب اکسیژن است که نتیجه این فرایند، تولید متان و عناصر دیگر می‌باشد. بیوگاز یک گاز با ارزش حرارتی پایین است و از متان (۵۰-۷۰٪) و کربن‌دی‌اکسید (۳۰-۵۰٪)، با مقادیر کمیاب از سایر ذرات تشکیل شده است [2,3]. از کاربردهای مهم بیوگاز می‌توان به پخت‌وپز، روشنایی در سطوح فردی، گرمایش، تولید برق، توربین گاز، موتورهای احتراق داخلی و سوخت برای خودروها اشاره کرد. عمدتاً از بیوگاز برای رفع نیازهای پخت‌وپز، گرمایش و روشنایی مناطق دورافتاده و روستایی استفاده می‌شود [4,5].

کیفیت فرایند احتراق و بازده آن در سال‌های اخیر توجه محققان را به خود معطوف داشته است. با این حال، احتراق سوخت‌های کم‌کالری اغلب شامل چالش‌های قابل توجهی در رابطه با پایداری شعله در بیشتر مشعل‌های معمولی است [6]. احتراق محیط متخلخل (Porous Media) یک روش مؤثر برای بازیافت انرژی شعله به واکنش‌دهنده‌های از پیش مخلوط‌شده‌ی ورودی است تا امکان استفاده از گازهای کم‌کالری بدون نیاز به تجهیزات پیچیده را فراهم کند. بازگشت قابل توجه حرارت در مشعل‌های متخلخل امکان احتراق پیش‌مخلوط سوخت را فراهم می‌کند در غیر این صورت ممکن است واکنش‌دهنده‌ها قابل اشتعال نباشند. مشعل‌های متخلخل دولایه به دلیل پایداری شعله مناسب به‌طور گسترده در دهه گذشته مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تغییر ناگهانی در اندازه منافذ بین دو لایه به‌عنوان یک نگهدارنده شعله مؤثر عمل می‌کند و شعله می‌تواند به راحتی در نزدیکی مرز مشترک آنها پایدار شود [5]. یک مشعل دولایه‌ای از یک ناحیه پیش‌گرم (Preheat Zone) و یک ناحیه احتراق (Combustion Zone) تشکیل شده است. تخلخل کم ناحیه‌ی پیش‌گرم، از احتمال خوداشتعالی و در نتیجه از انتشار شعله به سمت بالادست جلوگیری می‌کند و احتمال رخداد پدیده‌ی برگشت شعله را از بین می‌برد. مخلوط سوخت و هوا در این منطقه‌ی خاص پیش‌گرم می‌شود که به افزایش حد شعله‌وری پایین و افزایش بازده‌ی احتراق کمک می‌کند؛ بنابراین، پیش‌گرم‌شدن باعث افزایش ناحیه‌ی پایدار رژیم احتراق می‌شود [7,8].

کارهای پژوهشی تجربی و عددی مختلفی در زمینه‌ی احتراق محیط متخلخل دولایه‌ای انجام شده است. جنبه‌های مختلف احتراق محیط متخلخل با استفاده از سوخت‌های مختلف با هدف افزایش بازده انرژی مشعل‌ها بررسی شده است. در ادامه تعدادی از آن‌ها ذکر می‌شود. سوت [9] از نخستین محققانی می‌باشد که

بالادست و تخلخل 10-30 PPI در بخش پایین دست تشکیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که به دلیل انتقال حرارت جابجایی ضعیف در محیط متخلخل با تخلخل کمتر (PPI 10)، ناحیه پیش‌گرمایش برای این محیط بزرگ‌تر می‌باشد. ناحیه واکنش در نسبت هم‌ارزی زیاد (۰/۳) و چگالی تخلخل زیاد (PPI 30) دارای ضخامت بیشتری می‌باشد. به طور کلی افزایش نسبت هم‌ارزی و چگالی تخلخل منجر به افزایش ضخامت ناحیه واکنش در ناحیه پیش‌گرمایش می‌شود. فرانسیسکو و همکاران^[14] طیف وسیعی از مخلوط‌های سوخت گازی کم‌کالری حاوی CO₂, H₂, CH₄, CO و N₂ را در یک مشعل تابشی متخلخل به کار بردند تا اثرات ترکیب سوخت بر پایداری شعله و انتشار آلاینده‌ها تجزیه و تحلیل شود. در مخلوط‌های سوختی مورد مطالعه، ترکیب متان از صفر تا ۱۰۰ درصد و با ترکیبی از غلظت گازهای دیگر به گونه‌ای تغییر کرد که دمای شعله آدیاباتیک فشار ثابت برای تمام مخلوط‌های واکنش‌دهنده ثابت نگه داشته شود. در این مطالعه، نسبت هم‌ارزی نیز ثابت نگه داشته شد. نتایج نشان داده است که شکل ماکروسکوپی شعله مخلوط‌های سوخت تقریباً مشابه با متان خالص باقی مانده است اما شعله برای مخلوط‌های سوخت از خروجی مشعل به سمت بالادست حرکت می‌کند. به عنوان مثال برای هیدروژن، این امر با افزایش سرعت شعله آرام به دلیل افزایش محتوای هیدروژن در مخلوط ایجاد می‌شود. از آنجا که شعله بیشتر در بالادست حرکت می‌کند، غنی‌سازی با هیدروژن باعث کاهش بازده تابشی می‌شود. برای متان خالص، بازده تابشی در حدود ۳۵ درصد باقی می‌ماند ولی با کاهش متان تا حذف آن از مخلوط سوخت بازده تابشی تا ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. گائو و همکاران^[15]، احتراق بیوگاز در یک مشعل متخلخل دولایه تشکیل شده با دانه‌های آلومینای کروی را برای مقایسه مشخصه‌های احتراق بیوگاز و متان به طور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نسبت هم‌ارزی را به میزان ۰/۷۵ تا ۰/۹۵ و مقدار CO₂ را به میزان ۲۵ تا ۴۰ درصد تغییر دادند. حدود پایداری شعله در نسبت‌های هم‌ارزی و غلظت‌های مختلف کربن‌دی‌اکسید به دست آمد. آن‌ها دریافتند که حدود پایداری شعله برای بیوگاز، در محدوده نسبت هم‌ارزی بیشتری نسبت به متان خالص رخ می‌دهد و برای غلظت‌های بیشتر کربن‌دی‌اکسید، شعله پایدار در نسبت هم‌ارزی بالاتر رخ می‌دهد. محدوده نسبت هم‌ارزی متان خالص برای پایداری از ۰/۵۵ تا ۰/۷۲ است در حالی که محدوده پایداری بیوگاز برای غلظت کربن‌دی‌اکسید از ۲۵ تا ۳۵ درصد بین ۰/۷۵ تا ۰/۹۵ و برای غلظت کربن‌دی‌اکسید ۴۰ درصد بین ۰/۸ تا ۰/۹۵ می‌باشد. هم‌چنین افزایش در غلظت کربن‌دی‌اکسید، دمای سطح و بازده تابش پایین‌تر نتیجه می‌دهد. کرامیوتیس و همکاران^[16] نتایج یک کار تجربی از یک مشعل متخلخل با سوخت بیوگاز را از نظر بازده حرارتی و انتشار آلاینده‌ها ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که برای احتراق بیوگاز با ۶۰٪ متان و ۴۰٪ کربن‌دی‌اکسید در یک مشعل

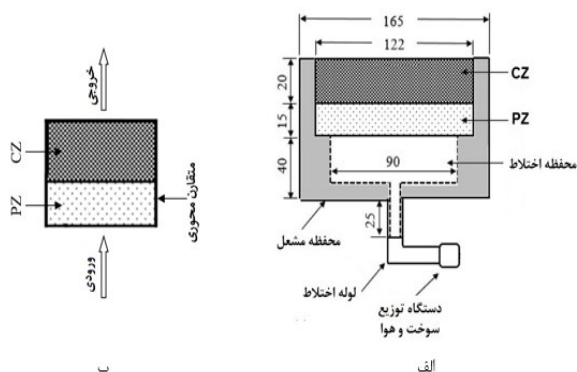
در زمینه‌ی احتراق محیط‌های متخلخل مطالعه و آزمایش انجام داده است. او در یک کار تجربی، سرعت و دمای شعله را در یک محیط شنی با اندازه‌های متفاوت بررسی نمود. او با ترکیب پارامترهای حرارتی و جنبشی که تبادل حرارت و میانگین سرعت واکنش را کنترل می‌کنند، یک سیستم معادله نیمه‌تجربی به دست آورد که سرعت گسترش شعله در ناحیه احتراق و دمای نهایی آن را به عنوان تابعی از سرعت جریان پیش‌بینی می‌کند. تاکنو و همکاران^[10] یک ایده ساده برای تولید شعله با آنتالپی اضافی پیشنهاد دادند، به این صورت که یک جسم جامد متخلخل با رسانایی هدایت حرارتی زیاد را در ناحیه شعله به کار بردند. این روش باعث می‌شود که حرارت از طریق محیط متخلخل پایین دست که دارای دمای زیاد می‌باشد به ناحیه متخلخل بالادست که دمای آن کم می‌باشد انتقال یابد و باعث پیش‌گرم شدن واکنش‌دهنده‌ها شود. این بدان معنی است که آنتالپی اضافی زیادی در کل ناحیه واکنش تولید می‌شود. برنر و همکاران^[11] شعله محیط متخلخل را به صورت شبیه‌سازی عددی و مدل آزمایشگاهی جهت ارزیابی عملکرد فرایند احتراق در محیط متخلخل مورد ارزیابی قرار دادند. به منظور دستیابی به احتراق پایدار در محیط متخلخل از یک مبدل حرارتی نیز استفاده شد. آن‌ها پروفیل دما و میزان آلاینده‌ها را در مبدل به دست آوردند و با نتایج عددی مقایسه نمودند. با توجه به نتایج به دست آمده کاهش در نسبت هم‌ارزی، منجر به کاهش دماهای بیشینه گاز و جامد می‌شود. هاشمی و همکاران^[12] فرایند احتراق پیش آمیخته متان-هوا را در یک مشعل متخلخل دولایه‌ای به روش عددی توسط یک مدل دوبعدی به منظور بررسی اثر شرایط ورودی و پارامترهای هندسی بر پایداری شعله شبیه‌سازی کردند. دولایه مشعل متخلخل از جنس‌های متفاوت تشکیل شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در مشعل متخلخل برای کنترل محدوده پایداری و دمای شعله می‌توان نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی را تغییر داد. در نسبت هم‌ارزی ثابت، بازده تابشی بازگردد حرارت تقریباً ثابت است، در حالی که با زیاد شدن نسبت هم‌ارزی کاهش می‌یابد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که تغییر قطر خروجی مشعل و طول نخستین لایه متخلخل می‌تواند محدوده پایداری را به طور قابل توجهی بهبود بخشد.

از اواخر قرن بیستم برخی تحقیقات، احتراق گازهای ارزش حرارتی پایین را در محیط متخلخل برای شعله‌های پیش‌آمیخته توسعه داده‌اند. عملکرد بیوگاز هنگام سوختن، بیشتر تحت تأثیر محتوای کربن‌دی‌اکسید مخلوط و توان ورودی است که ممکن است رفتار آن را به طور چشمگیری تغییر دهد. تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مشعل‌های متخلخل و احتراق بیوگاز در محیط متخلخل در ادامه آورده شده است. ژنگ و همکاران^[13] در یک مطالعه آزمایشگاهی مشخصه‌های احتراق گاز کم‌کالری را در یک محیط متخلخل سیلیکون‌کاربید (SiC) در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۲ و ۰/۳ بررسی کردند. محیط متخلخل از دو لایه با تخلخل 30 PPI در بخش

۲- مدل فیزیکی

مشعل مورد مطالعه یک مشعل آزمایشگاهی است که در مرجع [18] بررسی شده است و نتایج به دست آمده از این مشعل می‌تواند برای کاربردهای خانگی و صنعتی تعمیم یابد. دلیل مطالعه مشعل متخلخل برای بیوگاز این است که بیوگاز به دلیل تولید کم سوخت متان، دارای احتراق ضعیف می‌باشد و مشعل متخلخل می‌تواند راه‌حل خوبی برای احتراق پایدار بیوگاز و همچنین کاهش آلاینده‌ی بیشتر و کاهش مصرف انرژی برای چنین سوختی باشد. مشعل از دو ناحیه فوم سرامیکی تشکیل شده است که در نتیجه یک فضای استوانه‌ای ایجاد می‌کند. یک مشعل متخلخل سرامیکی به علت بالابودن قابلیت صدور حرارت در مواد سرامیکی، تابش خروجی بالایی را دارد [19]. ناحیه بالادست که به آن ناحیه پیش‌گرم (Preheat Zone) نیز گفته می‌شود، از جنس آلومینا دارای طول ۱۵ و قطر ۱۲۲ میلی‌متر و ناحیه پایین‌دست و یا ناحیه احتراق (Combustion Zone) از جنس سیلیکون‌کاربید دارای طول ۲۰ و قطر ۱۲۲ میلی‌متر است. سوخت و هوا از قبل مخلوط شده و سپس وارد مشعل می‌شود. شکل ۱ الف مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه در کار حاضر و شکل ۱ ب مدل دوبعدی شبیه‌سازی شده مشعل را نشان می‌دهد.

شبکه محاسباتی سازمان‌یافته بر روی مدل دوبعدی اعمال شده است که در مجاورت مرز بین بخش بالادست و پایین‌دست فشرده‌تر است. برای تأیید استقلال شبکه از حل، اندازه‌های مختلف شبکه بررسی و مشخصه دمای گاز و جامد و سرعت گاز مقایسه شد. مدل مورد مطالعه توسط چهار شبکه با اندازه سلول ۲ و ۱ و ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر شبیه‌سازی شد و به دلیل اختلاف بسیار کم دو شبکه آخر شبکه با اندازه سلول ۰/۵ میلی‌متر متناسب با ۸۴۰۰ سلول انتخاب گردید و در نهایت با ریزتر کردن شبکه در مجاورت مرز بین بخش بالادست و پایین‌دست شبکه بهینه با تعداد ۹۸۴۰ سلول مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱ الف- شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی ب- مدل شبیه‌سازی شده

متخلخل دولایه‌ای، مشعل در محدوده نسبت هم‌ارزی ۰/۷ تا ۰/۹ پایدار است. با افزایش بار حرارتی دمای سطح افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری گازهای خروجی نشان داد که حضور کربن‌دی‌اکسید در مخلوط سوخت منجر به افزایش سطح کربن‌مونواکسید در حدود ۵۰٪ در مقایسه با عملکرد متان خالص در آگروز مشعل می‌شود. العتب و همکاران [17]، یک مشعل کوچک متخلخل با سوخت بیوگاز در مقیاس کوچک با واحد بازیابی حرارت را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج اصلی حاصل از کار آن‌ها به این شرح است که مشعل با محیط متخلخل حتی در شرایط رقیق (نسبت هم‌ارزی از ۰/۳۱ تا ۰/۷۱) می‌تواند یک احتراق کارآمد برای بیوگاز با ارزش حرارتی پایین فراهم کند. در مقادیر نسبت هم‌ارزی بالاتر از ۰/۷۱ شعله می‌تواند در سطح مشترک بین دولایه محیط متخلخل پایدار شود. با این حال، کاهش بیشتر نسبت هم‌ارزی تا رسیدن به احتراق بسیار رقیق (نسبت هم‌ارزی ۰/۳۱) باعث می‌شود تا شعله از طریق لایه دوم به پایین‌دست منتقل شود زیرا لایه‌های جامد بالادست به دلیل کاهش دمای شعله سردتر می‌شوند. دوی و همکاران [18] در یک مطالعه تجربی، ارزیابی جامعی از احتراق بیوگاز خام در یک مشعل متخلخل دولایه‌ای ارائه دادند. در این مطالعه، تأثیر تغییر قدرت ورودی و نسبت هم‌ارزی بر توزیع دما، بازده تابش و ویژگی‌های انتشار آلاینده‌ی به‌طور تجربی بررسی شده است. این مشعل بین توان ورودی ۱۰-۵ کیلووات کار می‌کند و احتراق پایدار در محدوده نسبت هم‌ارزی ۰/۹۷-۰/۷۵ اتفاق می‌افتد. با افزایش نسبت هم‌ارزی، هم دمای شعله ماکزیمم و هم راندمان تابش روند افزایشی را دنبال می‌کنند، درحالی‌که با افزایش قدرت ورودی فقط دما افزایش می‌یابد. توان ورودی و نسبت هم‌ارزی تأثیر زیادی بر خصوصیات انتشار آلاینده‌ی دارند. از عملکرد کلی مشعل متخلخل دولایه‌ای نتیجه‌گیری می‌شود که مشعل جایگزین برای احتراق بیوگاز خام در محدوده توان ورودی ۱۰-۵ کیلووات بهبود یافته است.

باتوجه به بررسی تحقیقات فوق، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد مشعل‌های متخلخل تحت تاثیر عواملی مانند ترکیب بیوگاز، مواد و تخلخل مشعل و پارامترهای دیگر قرار می‌گیرد. تحقیقات فوق بیشتر به تغییر جنس محیط متخلخل، تغییر در تخلخل، تغییر نسبت هم‌ارزی و تعیین محدوده پایداری و بررسی شعله می‌پردازد و در بیشتر مطالعات، از بیوگاز در کار آزمایشگاهی یا شبیه‌سازی عددی با هندسه ساده استفاده شده است و در نتیجه بررسی اثر تغییر هندسه بر عملکرد مشعل متخلخل امری ضروری است. در این مطالعه اثر تغییر هندسه بر عملکرد حرارتی مشعل با سوخت بیوگاز مورد بررسی قرار گرفته است زیرا عملکرد مشعل‌های متخلخل ممکن است به دلیل تغییر هندسه تغییر کند و احتراق را بهبود بخشد.

$$K = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{150 (1 - \varepsilon)^2} \quad (۴)$$

$$C_2 = \frac{3.5 (1 - \varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} \quad (۵)$$

d_p نیز قطر متوسط سوراخ‌های شبکه متخلخل می‌باشد. در جریان آرامی که از یک سطح متخلخل عبور می‌کند مانند جریان مورد مطالعه، ثابت C_2 می‌تواند صفر در نظر گرفته شود و مدل سطح متخلخل به قانون دارسی تقلیل یابد.

$$\nabla \cdot (\rho_g \mathbf{v} c_p T_g) = \varepsilon \nabla \cdot (k_g \nabla T_g) + h_v (T_s - T_g) - \varepsilon \sum_{i=1}^{N_s} \dot{\omega}_i h_i W_i \quad (۶)$$

در رابطه بالا، c_p بیانگر ظرفیت حرارتی ویژه گاز، k_g بیانگر ضریب هدایت حرارتی فاز گاز، $\dot{\omega}_i$ بیانگر نرخ مولی تولید، h_i بیانگر آنتالپی و W_i بیانگر جرم مولکولی i امین نمونه است. h_v نشان‌دهنده ضریب انتقال حرارت حجمی کویل‌شده بین معادلات فاز جامد و گازی می‌باشد. معادله انرژی برای فاز جامد

$$\nabla \cdot ((1 - \varepsilon) k_s \nabla T_s) + h_v (T_g - T_s) - \nabla \cdot q_r = 0 \quad (۷)$$

در رابطه بالا، k_s بیانگر ضریب هدایت حرارتی جسم متخلخل است. q_r نیز شار حرارتی ناشی از فاز جامد است. دو معادله انرژی برای فازهای جامد و گاز بر اساس فرض عدم تعادل حرارتی است و این دو معادله با یک عبارت انتقال حرارت جابجایی در معادلات انرژی جفت می‌شوند. این اصطلاح معمولاً با یک ضریب انتقال حرارت حجمی، h_v مدل‌سازی می‌شود. در اینجا، فرمول تجربی ارائه شده توسط ویسکانتا و همکاران^[23] برای تعیین ناسلت حجمی به شرح زیر استفاده می‌شود.

$$\nabla \cdot (\rho_g \mathbf{v} c_p T_g) = \varepsilon \nabla \cdot (k_g \nabla T_g) + h_v (T_s - T_g) - \varepsilon \sum_{i=1}^{N_s} \dot{\omega}_i h_i W_i \quad (۸)$$

$$Re_{dp} = \frac{\rho U d_p}{\mu} \quad (۹)$$

در روابط فوق L ضخامت و d_p قطر متوسط حفره در محیط متخلخل می‌باشد. Re_{dp} نیز عدد رینولدز بر مبنای قطر متوسط حفره است. برای معادله ۸ عدم قطعیت تجربی در تعیین ضریب انتقال حرارت حجمی برای سرعت‌های کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه ۱۵/۳ درصد و در سرعت‌های بیشتر از ۰/۵ متر بر ثانیه کمتر از ۸/۶ درصد برآورد شده است^[23]. با محاسبه ناسلت حجمی، ضریب انتقال حرارت حجمی از رابطه زیر به دست می‌آید:

۳- فرضیات و معادلات حاکم

احتراق یک پدیده پیچیده همراه با جریان سیال، واکنش شیمیایی و انتقال حرارت است. فرض‌های زیر برای محاسبات اتخاذ شده است:

- (۱) مدل مشعل متخلخل، یک مدل دوبعدی و متقارن محوری است.
 - (۲) جریان آرام و پایا در نظر گرفته شده است.
 - (۳) مخلوط سوخت-هوا و محصولات به‌عنوان گازهای ایده‌آل تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شوند.
 - (۴) ترکیب سوخت بیوگاز تنها از دو جزء متان و کربن‌دی‌اکسید تشکیل شده و از سایر گازها صرف‌نظر شده است.
 - (۵) فوم سرامیکی متخلخل به‌عنوان یک محیط خاکستری، دارای حفره‌های موازی با جریان و بی‌اثر در نظر گرفته می‌شود.
 - (۶) تابش گاز در نظر گرفته نمی‌شود.
 - (۷) تابش جامد-جامد با تقریب روزلند (Rosseland) توصیف شده است.
 - (۸) اثرات کاتالیزوری جامدات ناچیز است.
 - (۹) از اثر دوفور و سورت (Dofour and Soret) صرف‌نظر شده است.
 - (۱۰) اثر نیروهای حجمی ناچیز است.
 - (۱۱) فرض عدم تعادل حرارتی برای فازهای جامد و گاز در نظر گرفته شده است و براین اساس دو معادله انرژی با یک عبارت انتقال حرارت جابجایی به هم مرتبط می‌شوند.
- معادلات حاکم با اعمال فرض‌های فوق به صورت زیر بیان می‌شوند^[19,20].

معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho_g \mathbf{v}) = 0 \quad (۱)$$

که ρ_g چگالی مخلوط گاز، ε تخلخل محیط متخلخل، و v سرعت گاز است.

معادله مومنتوم

$$\rho_g \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + S_i \quad (۲)$$

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{K} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) \quad (۳)$$

که در رابطه بالا p فشار و S_i مجموع مقاومت ویسکوزیته و مقاومت اینرسی را برای محیط متخلخل همگن نشان می‌دهد که به ترتیب ناشی از ویسکوزیته سیال و پیکربندی محیط متخلخل است. K نفوذپذیری (permeability) محیط متخلخل و C_2 ضریب مقاومت اینرسی (inertial loss coefficient) به صورت زیر تعریف می‌شوند^[21,22]:

یانگین عدم قطعیت تجربی برای معادله ۱۶ حدود ۸ درصد است [۲۴].

$$h_v = \frac{Nu_v k}{d_p^2} \quad (10)$$

رابطه بین ضریب انتقال حرارت جابجایی حجمی با ضریب انتقال حرارت جابجایی به صورت زیر بیان می شود:

$$h_v = a_v h \quad (11)$$

معادله انتقال گونه ها

$$\nabla \cdot (\rho_g v Y_i) = -\nabla \cdot (\rho_g Y_i v_i) + \dot{\omega}_i W_i \quad (17)$$

در رابطه بالا، Y_i و v_i به ترتیب بیانگر کسر جرمی و سرعت نفوذ گونه i و $\dot{\omega}_i$ نرخ مولی تولید شیمیایی گونه i است.

شرایط مرزی

برای حل معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی گاز و جامد و معادله انتقال گونه، به شرایط مرزی مناسب نیاز است. شرایط مرزی به صورت زیر تعریف شده است.

$$u = u_{in}, v = 0, T_g = T_{g,in} = 300K, Y_{fu} = Y_{fu,in}, Y_{ox} = Y_{ox,in} \quad (18)$$

در خروجی:

که در آن h ضریب انتقال حرارت جابجایی بین جریان سیال و جامد است و a_v مساحت سطح ویژه (یعنی مساحت در واحد حجم) است. رابطه تجربی ارائه شده توسط سازنده سرامیک برای a_v به صورت زیر است [23]:

$$a_v = 169.4 PPC \quad (12)$$

رابطه ارائه شده برای محاسبه d_p به شکل زیر است:

$$d_p = \frac{\sqrt{4\varepsilon/\pi}}{PPC} \quad (13)$$

در روابط فوق PPC تعداد حفره ها به ازای یک سانتی متر است.

$$(1 - \varepsilon) k_s \frac{\partial (T_s)}{\partial x} = -\varepsilon_r \sigma (T_{s,out}^4 - T_o^4) \quad (19)$$

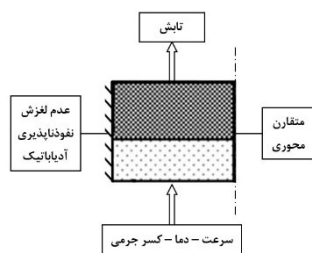
در محور، شرط تقارن اعمال می شود:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial T_s}{\partial y} = \frac{\partial T_g}{\partial y} = \frac{\partial Y_i}{\partial y} = 0 \quad (20)$$

در دیوار، شرایط عدم لغزش، نفوذناپذیری و آدیاباتیک تعریف شده است:

$$u = v = \frac{\partial T_s}{\partial y} = \frac{\partial T_g}{\partial y} = \frac{\partial Y_i}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

شرایط مرزی تعریف شده برای هندسه متخلخل در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲) شرایط مرزی برای محیط متخلخل شبیه سازی شده

معادله انتقال حرارت تابشی

برای توصیف انتقال حرارت تابشی در داخل یک محیط مات، باید معادله انتقال حرارت تابشی همراه با معادله بقای انرژی حل شود. با این حال، شکل دقیق معادله انتقال حرارت تابشی به دلیل پیچیدگی آن به ندرت مورد استفاده قرار می گیرد. در عوض، معادله موسوم به روزلند اغلب برای توصیف انتقال حرارت تابشی در داخل یک ماده مات استفاده می شود [26].

$$q_r = k_r \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

$$k_r = \frac{16\sigma T^3}{3E_R} \quad (15)$$

که در آن تابش k_r رسانایی حرارتی تابشی است، σ ثابت استفان-بولتزمن (Stephan-Boltzmann constant) و E_R ضریب خاموشی روزلند (Rosseland extinction coefficient) است. وی و همکاران [24] ضریب خاموشی روزلند را با استفاده از رابطه تجربی زیر بیان کردند.

$$E_R = (a \ln(d_p^{-1} + c) - b)(1 - \varepsilon)^{1/3} \quad (16)$$

a=660.4, b=3599.25, c=79.22

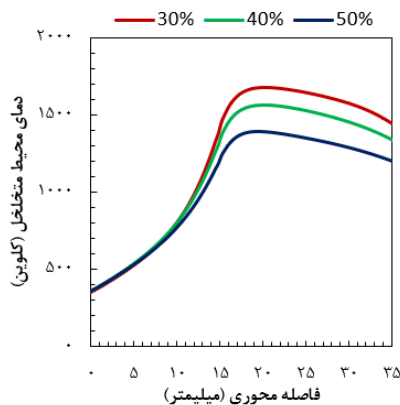
۶- نتایج

در این بخش نتایج به دست آمده از شبیه سازی های عددی تجزیه و تحلیل می شود. ابتدا، تجزیه و تحلیلی بر روی اثر ترکیب سوخت بیوگاز بر عملکرد دمایی مشعل متخلخل دولایه ارائه شده است. سپس با انتخاب ترکیب سوخت با کربن دی اکسید ۴۰ درصد، اثر تغییر هندسه مشعل بر عملکرد مشعل مورد بررسی قرار گرفته است.

۶-۱- اثر ترکیب سوخت

تغییرات دمایی مشعل در جهت محوری در فاصله ۲۰ میلیمتری از دیوار مشعل برای ترکیب های مختلف سوخت ورودی ($\alpha=0.3, 0.4, 0.5$) در نسبت هم ارزی ۰/۸۵ در شکل ۴ نشان داده شده است. رفتار تغییرات دمای جامد متخلخل برای همه نرخ های جریان بیوگاز روند مشابهی را با یک اختلاف دمایی نشان می دهد. تغییرات دمای جامد متخلخل در همه مکان ها همیشه با افزایش مقدار کربن دی اکسید در جریان بیوگاز کاهش می یابد. در مشعل متخلخل افزایش مداوم دمای جامد تا موقعیت ابتدای ناحیه پایین دست دیده می شود و پس از آن به تدریج کاهش می یابد. پیش گرمایش قابل توجهی از مخلوط هوا و سوخت بیوگاز به دلیل هدایت و تابش جامد به جامد مشاهده می شود. افزایش دمای جامد به دلیل انتقال حرارت هدایتی و تابشی از لایه متخلخل دوم به لایه اول است.

در شکل ۵ توزیع دمای سطح مشعل برای ترکیب های مختلف سوخت ورودی نشان داده شده است. افزایش مقدار کربن دی اکسید باعث کاهش دمای سطح مشعل می شود. برای همه موارد، حداکثر دما همیشه در قسمت میانی مشعل یافت شد و به تدریج به سمت دیواره کاهش یافت. شکل محفظه مشعل دلیل اصلی ایجاد چنین تغییرات دما در سطح مشعل است، زیرا مخلوط هوا و سوخت بیوگاز در ناحیه مرکزی نسبت به ناحیه نزدیک به دیواره مشعل با مقاومت جریان کمتری مواجه می شود. با افزایش مقدار کربن دی اکسید اختلاف دما بین نمودارها بیشتر می شود یعنی کاهش دما در درصدهای بیشتر کربن دی اکسید زیادتر است.



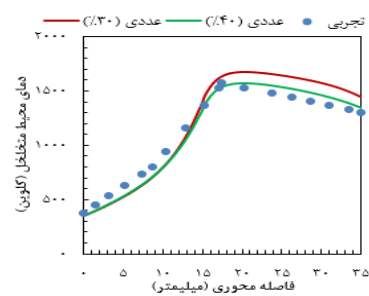
شکل ۳) اثر ترکیب سوخت روی دمای جامد متخلخل در فاصله ۲۰ میلیمتری دیوار مشعل

۴- روش حل عددی

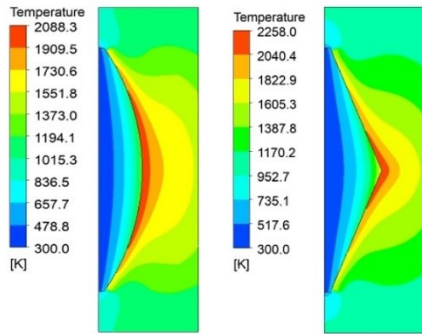
برای حل معادلات حاکم از روش گسسته سازی حجم محدود با استفاده از نرم افزار انسیس فلونت (Ansys Fluent) استفاده شد. نرم افزار انسیس فلونت اثر محیط متخلخل روی جریان را با یک ترم مقاومت جریان اضافی در معادله مومنوم در نظر می گیرد. الگوریتم سیمپل (SIMPLE^[27]) برای حل معادله مومنوم فشار-سرعت به کار گرفته شد. از توابع تعریف شده برای نشان دادن وابستگی خواص به دما در محیط های متخلخل استفاده شده است. از حلگر سخت (stiff) و ضرایب زیرتخفیف برای حل مشکل سختی (stiffness) بین معادلات مختلف استفاده شد. برای شروع واکنش، یک ناحیه دمای بالا ۲۰۰۰ کلوین در جلوی محفظه احتراق (در ناحیه پایین دست) در حوزه محاسباتی مشخص شده است. برای شبیه سازی احتراق از مکانیزم شیمیایی GRI-Mech 3.0 شامل ۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش شیمیایی جهت محاسبه نرخ تولید ω_i استفاده می شود^[28]. برای ارزیابی خواص ترموفیزیکی و انتقالی از کتابخانه های آماده نرم افزار کمکین استفاده می شود.

۵- اعتبارسنجی

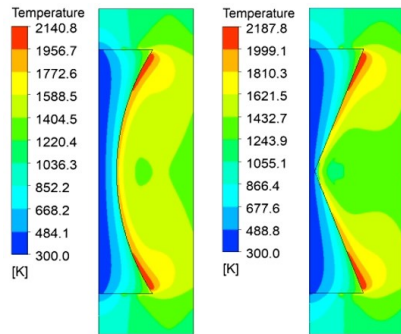
شکل ۳ مقایسه ای بین نتایج عددی در این مطالعه برای دو ترکیب سوخت ورودی و نتایج تجربی در مرجع^[18] برای دمای جامد متخلخل در فاصله ۲۰ میلیمتری از دیوار مشعل ارائه می دهد. در این نتایج نسبت هم ارزی ۰/۸۵ و توان ورودی ۱۰ کیلووات است. بیوگاز مورد استفاده در آزمایش از طریق هضم بی هوازی فضولات گاو تولید شده است که همیشه بیوگاز با ترکیب یکسان تولید نمی کند. منبع تولید بیوگاز تعیین کننده درصد بیوگاز می باشد و اندازه گیری ترکیب بیوگاز خام در طول مطالعه تجربی نشان داده که مقدار کربن دی اکسید بین ۳۴ تا ۳۸ درصد تغییر می کند. به همین دلیل دو ترکیب سوخت با درصدهای مولی کربن دی اکسید ۳۰ و ۴۰ درصد ($\alpha=0.3, \alpha=0.4$) برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی انتخاب شده است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود توزیع دمای عددی مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. بیشترین اختلاف دما برای حالت $\alpha=0.3$ حدود ۱۵۰ کلوین در ناحیه پایین دست و برای حالت $\alpha=0.4$ حدود ۹۰ کلوین در ناحیه بالادست می باشد. توزیع دما در ناحیه پایین دست در نتایج عددی برای $\alpha=0.4$ مطابقت بیشتری با نتایج دمای تجربی دارد.



شکل ۴) نمودار دمای عددی و تجربی در فاصله ۲۰ میلیمتری دیوار مشعل



شکل ۶) کانتور دمای مشعل در حالت مرز همگرا



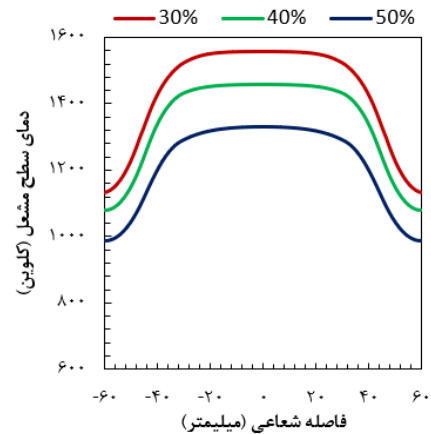
شکل ۷) کانتور دمای مشعل در حالت مرز واگرا

محور مشعل بیشتر شده و در نتیجه دمای شعله در این نواحی بیشتر است. در اطراف محور مرکزی مشعل، سرعت کمتر و دمای شعله نیز کمتر است. کم‌تربودن دمای شعله در محور مرکزی مشعل برای ناحیه مخروطی بیشتر قابل مشاهده است.

۶-۲-۲- توزیع دمای سطح مشعل و بیشینه دمای احتراق

در شکل ۸ توزیع دمای سطح مشعل همگرا برای دو حالت سطح مشترک لایه‌های متخلخل مخروطی و کروی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود منحنی نمودارها مشخص‌کننده نوع سطح مشترک بوده به گونه‌ای که نمودار دمای سطح مخروطی دارای شکل نزدیک به مخروط هست. محدوده دمای سطح مشعل (اختلاف دمای کمینه و بیشینه) برای حالت مخروطی بزرگ‌تر از حالت کروی است. به دلیل توزیع همگرای جریان ورودی در ناحیه بالادست که تحت تأثیر شکل سطح مشترک هست، دمای سطح در مرکز مشعل برای حالت مخروطی بیشتر از حالت کروی است و با دور شدن از مرکز مشعل دمای سطح در حالت کروی بیشتر است. به‌طور کلی، حداکثر دما در قسمت میانی مشعل یافت شد و به تدریج به سمت دیواره کاهش یافت.

توزیع دمای سطح مشعل واگرا نیز برای دو حالت سطح مشترک مخروطی و کروی در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود منحنی نمودارها در قسمت میانی مشعل متناسب با شکل مرز مشترک به صورت واگرا می‌باشد. در حالت مشعل واگرا اختلاف دما برای دو شکل مخروطی و کروی کم بوده و محدوده دمای سطح مشعل برای حالت مخروطی به مقدار کمی بیشتر از حالت کروی است. به دلیل توزیع واگرای جریان ورودی



شکل ۸) اثر ترکیب سوخت روی دمای سطح مشعل

۶-۲-۲- اثر تغییر هندسه لایه ها

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای تغییر هندسه لایه‌های متخلخل و یا به بیانی دیگر تغییر شکل مرز مشترک بین لایه‌ها ارائه می‌شود. نتایج به دست آمده به ازای ترکیب سوخت بیوگاز با ۴۰ درصد کربن دی‌اکسید و توان ورودی ۱۰ کیلووات و نسبت هم ارزی ۰/۸۵ می‌باشد. هندسه مسأله مورد نظر در این بخش شامل دو لایه جامد متخلخل است که سطح مشترک دو لایه به صورت مخروطی و یا کروی می‌باشد. در تمام حالت‌ها سطح مقطع لایه‌ها تغییر پیدا نکرده است، به این معنی که مرز مشترک به گونه‌ای تغییر پیدا کرده است که مساحت لایه‌ها ثابت باقی مانده است. این تغییر هندسه که در مطالعات قبلی به چشم نمی‌خورد برای مشعل متخلخل با سوخت بیوگاز می‌تواند مبنای طراحی بهینه مشعل برای سوخت بیوگاز قرار گیرد.

۶-۲-۱- کانتور دمای مشعل

به منظور درک بهتر از اثر تغییر هندسه بر عملکرد دمایی مشعل، سطح مشترک دو لایه متخلخل به دو صورت مخروطی و کروی برای دو حالت سطح همگرا و سطح واگرا شبیه‌سازی شد. کانتور دمای مشعل برای شکل مخروطی و کروی در سطح مشترک دو لایه متخلخل در حالت مرز همگرا در شکل ۶ و در حالت مرز واگرا در شکل ۷ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود خطوط هم‌دما به صورت کلی به شکل همگرا بوده و نزدیک سطح مشترک دو لایه تقریباً همانند منحنی سطح مشترک می‌باشد. به دلیل همگرای بودن ناحیه متخلخل بالادست، سرعت جریان در اطراف محور مرکزی مشعل بیشتر بوده و در نتیجه دمای شعله در این نواحی بیشتر است. این مسأله برای ناحیه مخروطی بیشتر قابل مشاهده است.

به‌طور مشابه خطوط هم‌دما در شکل ۷ به صورت کلی به شکل واگرا هست. خطوط هم‌دمای کانتور دمای مشعل در مجاورت مرز مشترک مخروطی تقریباً به شکل مثلث واگرا و در مجاورت مرز مشترک کروی تقریباً به شکل کمان دایره واگرا می‌باشد. به دلیل واگرایی ناحیه متخلخل بالادست، سرعت جریان با دور شدن از

کلی گرادیان دما در جهت شعاعی برای مشعل در حالت همگرا بیشتر از حالت واگرا است.

بیشینه دمای احتراق در دو حالت سطح مشترک مخروطی و کروی برای لایه همگرا در جدول ۱ و برای لایه واگرا در جدول ۲ ارائه شده است. با مقایسه دو جدول می‌توان دریافت که به صورت کلی با افزایش میزان کربن دی‌اکسید در ترکیب سوخت بیوگاز ورودی بیشینه دمای احتراق کاهش می‌یابد. این کاهش دما برای حالت واگرا بیشتر است. در همه حالت‌ها بیشینه دمای احتراق برای سطح مشترک کروی کمتر از سطح مشترک مخروطی است و این ناشی از گرادیان منحنی هندسه سطح مشترک در جهت شعاعی است که برای هندسه کروی تغییر تدریجی هندسه باعث ایجاد سرعت‌های کمتر مخلوط ورودی و در نتیجه دمای کمتر شعله می‌شود. دمای بیشینه احتراق برای سطح مشترک مخروطی در حالت همگرا بیشتر از واگرا است و برای سطح مشترک کروی در حالت همگرا کمتر از حالت واگرا است و دلیل آن افزایش سرعت در رأس مخروط در حالت همگرا و همچنین افزایش سرعت کناره‌های هندسه کروی در حالت واگرا می‌باشد.

جدول ۱) بیشینه دمای احتراق در حالت سطح مشترک همگرای دو لایه متخلخل (کلوین)

میزان کربن دی‌اکسید	مخروطی	کروی
۳۰ درصد	۲۳۴۶/۰	۲۱۵۶/۲
۴۰ درصد	۲۲۵۸/۰	۲۰۸۸/۳

جدول ۲) بیشینه دمای احتراق در حالت سطح مشترک واگرای دو لایه متخلخل (کلوین)

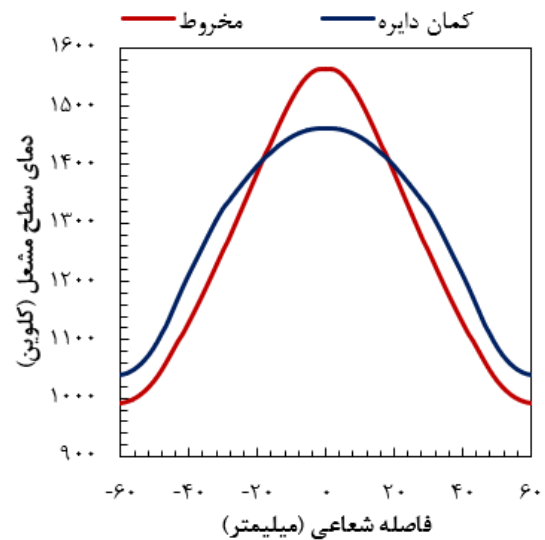
میزان کربن دی‌اکسید	مخروطی	کروی
۳۰ درصد	۲۲۸۳/۵	۲۲۳۲/۴
۴۰ درصد	۲۱۸۷/۸	۲۱۴۰/۸

۴-۲-۶- بازده تابشی

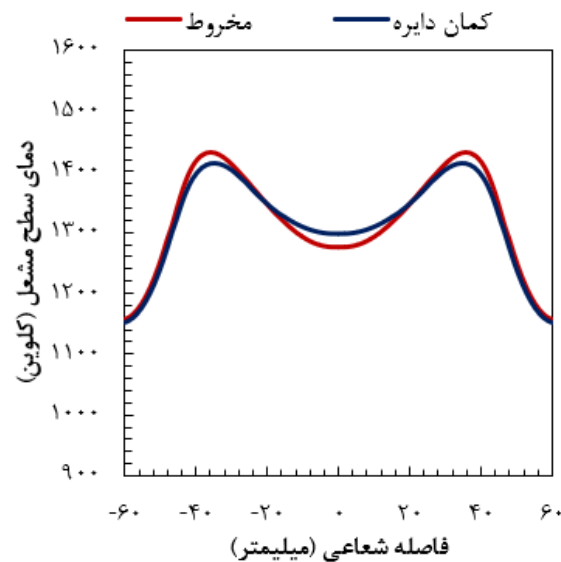
بازده تابشی در دو حالت سطح مشترک مخروطی و کروی برای لایه همگرا در جدول ۳ و برای لایه واگرا در جدول ۴ آورده شده است. بازده تابشی (η_{rad}) به صورت نسبت توان تابشی سطح خروجی مشعل (P_{rad}) به توان حرارتی ورودی (P_{th}) توسط رابطه زیر تعریف می‌شود [18,29,30].

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{th}} = \frac{\varepsilon \sigma \sum A_{w,i} (T_{w,i}^4 - T_o^4)}{\dot{m}_{fuel} LHV} \quad (22)$$

که در آن ε ضریب صدور سطح (wall emissivity)، σ ثابت استفان-بولتزمن، $A_{w,i}$ سطح مقطع سلول i از شبکه سطح خروجی، $T_{w,i}$ دمای سلول i از شبکه سطح خروجی، T_o دمای محیط پیرامون، \dot{m}_{fuel} دبی جرمی سوخت ورودی و LHV ارزش حرارتی پایین سوخت است. نتایج نشان می‌دهد که به صورت کلی با افزایش میزان کربن دی‌اکسید در ترکیب سوخت بیوگاز ورودی بازده تابشی کاهش می‌یابد. در حالت سطح مشترک همگرا بازده تابشی برای سطح مشترک کروی بیشتر از سطح مشترک مخروطی



شکل ۸) اثر تغییر سطح مشترک روی دمای سطح مشعل در حالت مرز همگرا



شکل ۹) اثر تغییر سطح مشترک روی دمای سطح مشعل در حالت مرز واگرا

در ناحیه بالادست که تحت تأثیر شکل سطح مشترک هست، بیشینه دمای احتراق در فاصله تقریباً ۲۰ میلی‌متری از دیواره هست و با نزدیک شدن به محور مرکزی مشعل دما کاهش می‌یابد. این کاهش دما برای مشعل مخروطی اندکی بیشتر است. به‌طور کلی، حداکثر دما در فاصله حدود ۲۰ میلی‌متری از دیواره مشعل یافت شد و به تدریج به سمت مرکز مشعل کاهش یافت. با نزدیک شدن به سمت دیواره به دلیل نبود جریان ورودی و در نتیجه نبود شعله در آن قسمت دما کاهش می‌یابد.

با مقایسه نمودارهای دمای سطح مشعل در حالت‌های همگرا و واگرا می‌توان دریافت که حالت همگرای سطح مشترک دو لایه متخلخل در احتراق جریان بیوگاز باعث افزایش دما در قسمت میانی مشعل شده و حالت واگرای سطح مشترک افزایش دما را در نواحی نزدیک به دیواره مشعل به دنبال خواهد داشت. به‌طور

- به‌طور کلی بازده تابشی در حالت مشعل واگرا بیشتر از مشعل همگرا است.
- بازده تابشی مشعل همگرا برای سطح مشترک مخروطی کمتر از کروی است و در حالت مشعل واگرا برای سطح مشترک مخروطی بیشتر از کروی است.
- بیشترین بازده تابشی وقتی حاصل می‌شود که مشعل واگرا بوده و میزان درصد کربن‌دی‌اکسید در ترکیب سوخت بیوگاز ورودی کمتر باشد.

فهرست علائم

C_2	فاکتور مقاومت (1/m)
C_p	ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت (J/kg.K)
d_b	قطر متوسط حفره‌ها در محیط متخلخل (m)
E_R	ضریب خاموشی روزلند
h_i	آنتالپی (J/kg)
h_v	ضریب انتقال حرارت حجمی (W/m ³ .K)
k	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
k_r	رسانایی حرارتی تابشی (W/m.K)
K	فاکتور نفوذپذیری (m ²)
L	طول دیوار متخلخل (m)
Nu	عدد ناسلت
p	فشار (Pa)
PPC	تعداد حفره‌ها به ازای یک سانتی‌متر
q_r	شار حرارتی تابشی (W/m ²)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
v	سرعت (m/s)
W_i	جرم مولی گونه i (kg/kmol)
Y_i	کسر جرمی گونه i

علائم یونانی

α	درصد مولی کربن‌دی‌اکسید در مخلوط سوخت ورودی
ϵ	ضریب صدور (m)
ϕ	نسبت هم‌ارزی
ϵ	تخلخل
μ	ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)
ρ	چگالی (kg /m ³)
σ	ثابت استفان بولتزمن (W.m ² .K ⁴)
\dot{w}_i	نرخ مولی تولید شیمیایی گونه i
η	بازده
زیرنویس‌ها	
f_u	سوخت
g	گاز
in	ورودی
ox	واکنش‌دهنده‌ها
s	جامد

است و در حالت واگرا بازده تابشی برای سطح کروی کمتر از سطح مخروطی است و این ناشی از توزیع دمای سطح مشعل است که در نمودارهای شکل ۷ و ۸ نمایش داده شده است. به این معنی که در حالت همگرا سطح مقطع بیشتری از مشعل وجود دارد که در آن دمای سطح در مشعل کروی بزرگتر از دمای سطح در مشعل مخروطی است. در حالت واگرا برای سطوح بیشتری از مشعل دمای سطح در مشعل مخروطی برابر یا بزرگتر از دمای سطح در مشعل کروی است. با مقایسه نتایج می‌توان دریافت که بازده تابشی در حالت مشعل واگرا بیشتر از مشعل همگرا است. زیرا متوسط دمای سطح مشعل در حالت واگرا بیشتر از همگرا است.

جدول ۳) بازده تابشی در حالت سطح مشترک همگرای دو لایه متخلخل

میزان کربن‌دی‌اکسید	مخروطی	کروی
۳۰ درصد	۱۴/۷	۱۶/۷
۴۰ درصد	۱۰/۹	۱۲/۶

جدول ۴) بازده تابشی در حالت سطح مشترک واگرای دو لایه متخلخل

میزان کربن‌دی‌اکسید	مخروطی	کروی
۳۰ درصد	۲۳/۱	۲۱/۹
۴۰ درصد	۱۷/۳	۱۶/۸

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، بررسی عددی برای جریان بیوگاز در یک مشعل متخلخل دولایه انجام شده است. شبیه‌سازی برای ترکیب‌های مختلف سوخت بیوگاز ورودی انجام شد و اثر تغییر هندسه مشعل بر عملکرد آن در حالت‌های مختلف مرز مشترک لایه‌های محیط متخلخل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج برجسته از مطالعه عبارتند از:

- در مشعل متخلخل دمای جامد تا موقعیت ابتدای ناحیه پایین‌دست افزایش یافته و پس از آن به تدریج کاهش می‌یابد. پیش‌گرمایش قابل توجهی از مخلوط هوا و سوخت بیوگاز به دلیل هدایت و تابش مشاهده می‌شود.
- در مشعل همگرا سرعت جریان در اطراف محور مرکزی مشعل بیشتر بوده و در نتیجه دمای شعله در این نواحی بیشتر است.
- حالت همگرای سطح مشترک دو لایه متخلخل در احتراق جریان بیوگاز باعث افزایش دما در قسمت میانی مشعل شده و حالت واگرای سطح مشترک افزایش دما را در نواحی نزدیک به دیواره مشعل به دنبال خواهد داشت.
- دمای بیشینه احتراق برای سطح مشترک مخروطی در حالت همگرا بیشتر از واگرا است و برای سطح مشترک کروی در حالت همگرا کمتر از حالت واگرا است.
- بیشترین دمای احتراق و بیشترین دمای سطح مشعل برای هندسه مخروطی در حالت همگرا رخ می‌دهد.
- با افزایش میزان کربن‌دی‌اکسید در ترکیب سوخت بیوگاز ورودی بازده تابشی کاهش می‌یابد.

- 14- Francisco Jr RW, Rua F, Costa M, Catapan RC, Oliveira AA. On the combustion of hydrogen-rich gaseous fuels with low calorific value in a porous burner. *Energy & Fuels*. 2010 Feb 18;24(2):880-7.
- 15- Gao H, Qu Z, Tao W, He Y, Zhou J. Experimental study of biogas combustion in a two-layer packed bed burner. *Energy & Fuels*. 2011 Jul 21;25(7):2887-95.
- 16- Keramiotis C, Founti MA. An experimental investigation of stability and operation of a biogas fueled porous burner. *Fuel*. 2013 Jan 1; 103:278-84.
- 17- Al-Attab KA, Ho JC, Zainal ZA. Experimental investigation of submerged flame in packed bed porous media burner fueled by low heating value producer gas. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015 Apr 1; 62:1-8.
- 18- Devi S, Sahoo N, Muthukumar P. Experimental studies on biogas combustion in a novel double layer inert Porous Radiant Burner. *Renewable Energy*. 2020 Apr 1; 149:1040-52.
- 19- Vafai K, editor. *Handbook of porous media*. CRC Press; 2015 Jun 23.
- 20- Kaviany M. *Principles of heat transfer in porous media*. Springer Science & Business Media; 2012 Dec 6.
- 21- Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chemical engineering progress*. 1952;48(2):89.
- 22- Fluent AN. *ANSYS Fluent User's Guide*. Ansys Inc. 2021;20112427.
- 23- Fu X, Viskanta R, Gore JP. Measurement and correlation of volumetric heat transfer coefficients of cellular ceramics. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1998 Aug 1;17(4):285-93.
- 24- Wei G, Huang P, Xu C, Chen L, Ju X, Du X. Experimental study on the radiative properties of open-cell porous ceramics. *Solar Energy*. 2017 Jun 1; 149:13-9.
- 25- Glicksman L, Schuetz M, Sinofsky M. Radiation heat transfer in foam insulation. *International journal of heat and mass transfer*. 1987 Jan 1;30(1):187-97.
- 26- Moro Filho RC, Malalasekera W. An analysis of thermal radiation in porous media under local thermal non-equilibrium. *Transport in Porous Media*. 2020 Apr;132(3):683-705.
- 27- Patankar S. *Numerical heat transfer and fluid flow*. CRC press; 2018 Oct 8.
- 28- Smith GP, Golden DM, Frenklach M, Moriarty NW, Eiteneer B, Goldenberg M, Bowman CT, Hanson RK, Song S, Gardiner Jr WC, Lissianski VV. GRI Mech 3.0. gas research institute. URL http://www.me.berkeley.edu/gri_mech. 1995.
- 29- Zuo W, Jiaqiang E, Hu W, Jin Y, Han D. Numerical investigations on combustion characteristics of H₂/air premixed combustion in a micro elliptical tube combustor. *Energy*. 2017 May 1; 126:1-2.
- 30- Qian P, Liu M, Li X, Xie F, Huang Z, Luo C, Zhu X. Combustion characteristics and radiation performance of premixed hydrogen/air combustion in a mesoscale divergent porous media combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020 Feb 7;45(7):5002-13.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

- 1- Administration USEI. *International Energy Outlook*. 2021.
- 2- Deublein D, Steinhauser A. *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. John Wiley & Sons; 2011 Aug 15.
- 3- Mekonen EA, Mekonnen YT, Fatoba SO. Thermodynamic prediction of biogas production and combustion: The spontaneity and energy conversion efficiency from photosynthesis to combustion. *Scientific African*. 2023 Sep 1;21: e01776.
- 4- Kaushik LK, Mahalingam AK, Palanisamy M. Performance analysis of a biogas operated porous radiant burner for domestic cooking application. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021 Mar;28(10):12168-77.
- 5- Song F, Wen Z, Dong Z, Wang E, Liu X. Numerical study and optimization of a porous burner with annular heat recirculation. *Applied Thermal Engineering*. 2019 Jul 5; 157:113741.
- 6- Habib R, Yadollahi B, Saeed A, Doranehgard MH, Li LK, Karimi N. Unsteady ultra-lean combustion of methane and biogas in a porous burner—An experimental study. *Applied Thermal Engineering*. 2021 Jan 5; 182:116099.
- 7- Tanaka R, Shinoda M, Arai N. Combustion characteristics of a heat-recirculating ceramic burner using a low-calorific-fuel. *Energy Conversion and Management*. 2001 Oct 11;42(15-17):1897-907.
- 8- Liu Y, Deng Y, Shi J, Liu Y, Wang X, Ge B, Min Z. Experimental investigation on flame stability and emissions of lean premixed methane-air combustion in a developed divergent porous burner. *Journal of Cleaner Production*. 2023 Jun 15; 405:137070.
- 9- De Soete G. Stability and propagation of combustion waves in inert porous media. In *Symposium (International) on combustion 1967* Jan 1 (Vol. 11, No. 1, pp. 959-966). Elsevier.
- 10- Takeno T, Sato K. An excess enthalpy flame theory. *Combustion Science and Technology*. 1979 Jul 1;20(1-2):73-84.
- 11- Brenner G, Pickenäcker K, Pickenäcker O, Trimis D, Wawrzinek K, Weber T. Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methane/air combustion in porous inert media. *Combustion and flame*. 2000 Oct 1;123(1-2):201-13.
- 12- Hashemi SM, Hashemi SA. Flame stability analysis of the premixed methane-air combustion in a two-layer porous media burner by numerical simulation. *Fuel*. 2017 Aug 15; 202:56-65.
- 13- Zheng CH, Cheng LM, Li T, Luo ZY, Cen KF. Filtration combustion characteristics of low calorific gas in SiC foams. *Fuel*. 2010 Sep 1;89(9):2331-7.