



مطالعه جریان واکنشی در ماده متخلخل در مقیاس حفره با در نظر گرفتن اثرات اغتشاش در جریان

نیما فلاح جویباری^۱، مهدی معرفت^{۲*}، مجید اسحق نیموری^۳

۱- دانشجوی دکتری تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشجوی دکتری تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، maeerefatm@modares.ac.ir

چکیده- این مقاله به بررسی شبیه‌سازی جریان واکنشی مخلوط هوا/متان در مقیاس حفره با هدف بررسی اثرات چند بعدی و توربولانس در مقیاس حفره می‌پردازد. ماده متخلخل در این مطالعه به صورت آرایش شطرنجی سیلندره‌های مربعی شکل در نظر گرفته شده است. نتایج مربوط به انرژی جنبشی توربولانسی، دما، ساختار شعله، ضخامت شعله و سرعت شعله در نسبت‌های هم‌ارزی متفاوت آورده شده‌اند. انرژی جنبشی توربولانسی در امتداد مشعل در اثر سیلندره‌های جامد تولید شده و مقدار آن افزایش می‌یابد تا این که یک پرش ناگهانی را در مکان شعله در اثر افزایش سرعت به دلیل انبساط حرارتی ناشی از احتراق نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر نشان داده شده است که در نسبت‌های هم‌ارزی بالا اثرات توربولانس چشم‌گیر است. به دلیل افزایش اثر توربولانس در نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر روند تغییرات ضخامت شعله با نسبت هم‌ارزی بر خلاف جریان آرام می‌باشد و با افزایش نسبت هم‌ارزی ضخامت شعله افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شده است که سرعت شعله بی‌بعد و دمای اضافی در نسبت‌های هم‌ارزی پایین‌تر به دلیل اتلاف حرارت کمتر از بالادست مشعل بیشتر از نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر است. ساختار دو بعدی شعله در داخل حفره‌های ماده متخلخل با استفاده از خطوط هم‌دما در این تحقیق نشان داده شده است.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی عددی، مشعل متخلخل، مقیاس حفره، توربولانس.

Pore scale study on the reacting flow in porous media including flow turbulence

N. F. Jouybari¹, M. Maerefat^{2*}, M. E. Nimvari³

1- PhD. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

3- PhD. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran. maeerefatm@modares.ac.ir

Abstract- This paper presents pore scale simulation of turbulent combustion of air/methane mixture in porous media to investigate the effects of multi dimensionality and turbulence on the flame within pore scale. A porous medium consisting of a staggered arrangement of square cylinders considered here. Results of turbulent kinetic energy, temperature, flame thickness, flame structure and flame speed are presented and compared at different equivalence ratios. The turbulent kinetic energy increases along the burner because of turbulence created by the solid matrix with a sudden jump at the flame front due to increase of the velocity as a result of thermal expansion. Also, it is shown that at higher equivalence ratios, the effect of turbulence within porous burner is highly significant phenomenon. Due to higher turbulence effects in higher equivalence ratios, the flame thickness increases by increasing the equivalence ratio which is in opposite of the trend observed in laminar flow simulation. Also, it is shown that the dimensionless flame speed and excess temperature is higher at lower equivalence ratios due to lower heat loss to the cold upstream environment of burner. Two dimensional structure of flame in the pores of porous medium is shown in the present study via isotherm lines.

Keywords: Numerical Simulation, Porous Burner, Pore Scale, Turbulence.

۱- مقدمه

به دست آوردن اطلاعات دقیق‌تر از مشخصات جریان و میدان حرارت در مشعل‌های متخلخل از موضوعات روز است و تحقیقات زیادی در این زمینه جریان دارد. تقریباً تمام تحقیقات مربوط به مشعل‌های متخلخل به بررسی جریان آرام در داخل ماده متخلخل پرداخته‌اند. در حالی که محققان بسیاری نشان داده‌اند که شروع توربولانس در ماده متخلخل در اعداد رینولدز حفره ($Re_p = \rho_f u_D d_p / \mu$) پایین است [۱].

جولز و هارناتی [۲] گزارش کردند که انتقال به توربولانس در ماده متخلخل در محدوده Re_p بین ۱۱۰ تا ۱۵۰ اتفاق می‌افتد. فاند و همکاران [۳] نشان دادند که با توجه به ساختار ماده متخلخل انتقال به توربولانس در Re_p کمتر از ۱۱۰ به وقوع می‌پیوندد. هال و هیات [۴] نشان دادند که میزان شدت توربولانسی برای اعداد Re_p بین ۱۷ تا ۲۰۰ که معمولاً در مشعل‌های متخلخل اتفاق می‌افتد، بین ۰/۵ الی ۰/۶ است.

اندازه‌گیری‌های شدت توربولانسی توسط وارتان و همکاران [۵] برای جریان‌های واکنشی و غیر واکنشی نشان داده که احتراق اثر خیلی مهمی بر مشخصه‌های جریان و شدت توربولانسی در داخل ماده متخلخل دارد. برای جریان واکنشی در داخل ماده متخلخل شتاب‌گیری جریان بعد از شعله باعث تولید انرژی جنبشی توربولانسی می‌شود و در نتیجه امکان وقوع رژیم توربولانسی در داخل ماده متخلخل افزایش می‌یابد [۶]. به وضوح، پارامترهای مهمی مانند ضخامت شعله، دماهای جامد و گاز، کسر جرمی و سرعت شعله تحت تأثیر توربولانس در ماده متخلخل قرار می‌گیرند [۷، ۶]. محققان قبلی مانند هسو و همکاران [۸]، کمال و محمد [۹]، الحسینی و همکاران [۱۰] و یاراحمدی و همکاران [۱۱] در نظر نگرفتن توربولانس را علت اصلی اختلاف بین نتایج عددی خود و نتایج تجربی عنوان کردند. بنابراین اندازه‌گیری و مدل‌سازی میکروسکوپی (در مقیاس حفره) توربولانس به منظور روشن ساختن مکانیزم‌های انتقال حرارت و جرم و همچنین اتلاف حرارت در ماده متخلخل امری ضروری است. با این وجود تحقیقات کمی به بررسی سرعت و مشخصه‌های جریان توربولانسی در داخل ماده متخلخل پرداخته‌اند و این به دلیل ساختار پیچیده حفره‌های ماده متخلخل می‌باشد که باعث پیچیده شدن مسأله می‌شود. این حقیقت موجب شد تا مدل‌های توربولانسی میکروسکوپی

در داخل ماده متخلخل شکل بگیرند که بر مبنای رابطه بین سرعت جریان در بالادست ماده متخلخل و افت فشار در ماده متخلخل می‌باشند که برای مثال می‌توان به مدل‌های آنتوهه و لیج [۱۲] ناکایاما و کوواهارا [۱۳] پدراس و دلموس [۱۴] و ترول و رضوان‌الدین [۱۵] اشاره کرد.

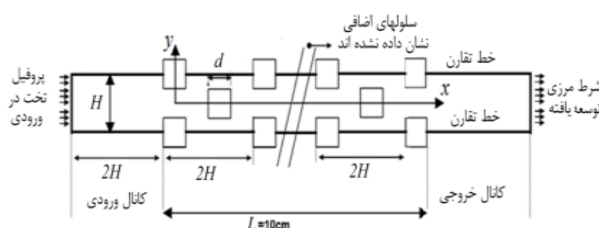
برای مدل‌سازی ریاضی توربولانس در ماده متخلخل بیشتر محققان از روش ماکروسکوپی مرسوم برای جریان آرام در ماده متخلخل استفاده نمودند که در آن معادلات حاکم با استفاده از میانگین‌گیری حجمی بر روی حجم مشخصه (REV) به دست می‌آیند. معادلات میانگین‌گیری حجمی با این فرض به دست آمده‌اند که تغییرات پارامترها در مقیاس طولی کوچک مانند d که برابر قطر حفره یا ماده جامد شبکه ماده متخلخل است خیلی کمتر از مقیاس طولی کل سیستم L باشد [۱۶].

با این وجود در مورد احتراق سوخت‌های هیدروکربن با هوا در داخل ماده متخلخل، ضخامت شعله می‌تواند از مرتبه d باشد و دقت معادلات میانگین‌گیری شده را در پیش‌بینی ساختار شعله را حتی برای حالت‌های جریان آرام به زیر سوال ببرد. به علاوه، خصوصیات موثر مانند ضریب هدایت مولکولی و تشعشعی مؤثر و ضریب نفوذ جرمی مؤثر باید با دقت بالا پیش‌بینی شوند. بیان جریان‌های داخل ماده متخلخل به صورت میانگین‌گیری حجمی شده، نیاز به مدل‌هایی برای انتقال حرارت جابجایی بین گاز و جامد و انتقال حرارت تشعشعی فاز جامد دارد. اگرچه بعضی از این خصوصیات در کارهای محققان پیشین اندازه‌گیری شده‌اند [۱۸، ۱۷]، مقادیر ثبت شده بسیار غیر قابل اطمینان می‌باشند چون غالباً در اعداد رینولدز و یا دماهایی خارج از محدودهای که در مشعل متخلخل اتفاق می‌افتند اندازه‌گیری شده‌اند. علاوه بر خصوصیات غیر قابل اطمینانی که برای تشعشع در داخل ماده متخلخل استفاده می‌شود، معادلات تشعشعی میانگین‌گیری حجمی شده در مقیاس‌هایی کوچک‌تر از اندازه حفره دقت خود را از دست می‌دهند. این عدم دقت به این دلیل است که در میانگین‌گیری حجمی شبکه ماده متخلخل به صورت یک ماده یکنواخت فعال تشعشعی در نظر گرفته می‌شود، حال آن که در واقعیت از سطوح جامد منفردی تشکیل شده است. همچنین مدل‌های میانگین‌گیری حجمی شعله تختی را در ماده متخلخل پیش‌بینی می‌کنند که با توجه به ساختار ماده متخلخل که از

توربولانس جریان در جریان واکنشی در ماده متخلخل و همچنین اثر توربولانس بر روی احتراق در داخل ماده متخلخل، ساختار شعله در داخل حفره‌ها و میزان تغییرات دما در داخل حفره‌های ماده متخلخل در تحقیق حاضر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. انرژی جنبشی توربولانسی و دما در امتداد مشعل متخلخل برای نسبت‌های هم ارزی متفاوت مطالعه شده است. همچنین شکل خمیده شعله به دست آمده در داخل حفره‌های ماده تفکر پیشین مبنی بر تخت بودن شعله در داخل ماده متخلخل که از مدل‌های میانگین‌گیری حاصل می‌شود را به زیر سوال می‌برد.

۲- هندسه حل

شکل ۱ هندسه دو بعدی به کار رفته در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. اندازه ضلع هر سیلندر مربعی برابر d و فاصله بین مراکز سیلندرها برابر با H می‌باشد. فاصله $(H-d)$ برای اندازه‌گیری اندازه حفره ماده متخلخل استفاده شده است. خصوصیات ماده متخلخل در مطالعه حاضر در جدول ۱ آورده شده است [۲۱، ۶].



شکل ۱ هندسه مورد نظر در این مطالعه

جدول ۱ خصوصیات ماده متخلخل استفاده شده

مقدار	خصوصیات
۵۵۶۰	$(J/kgK) c_p$
۱/۲	$(W/mK) k_s$
۰/۸۷	ضریب تخلخل (ϵ)
۳/۹	چگالی حفره (ppcm)
۲/۵	$(mm) H$
۱۰	طول مشعل - $L (cm)$

به دلیل ساختار پیچیده ماده متخلخل، یک ماده متخلخل ساده ولی اغلب مورد استفاده توسط محققان پیشین مانند ترول و

تعداد زیادی حفره تشکیل شده است فرض دور از ذهنی می‌باشد [۱۹]. به علاوه، در مدل‌های توربولانسی میانگین‌گیری شده در داخل ماده متخلخل جملات دیگری ظاهر می‌شوند که بیانگر تولید انرژی جنبشی توربولانسی و اتلاف آن در اثر سطوح جامد می‌باشند و برای آن‌ها نیز باید مدل‌هایی در روش میانگین‌گیری در نظر گرفته شود. یک راه حل برای این مشکلات مدل‌سازی مستقیم جریان در داخل حفره‌های ماده متخلخل است. این روشی است که صحرای و کاویانی [۲۰] برای مقایسه دقت میانگین‌گیری حجمی در داخل ماده متخلخل برای جریان واکنشی آرام استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه در داخل حفره تغییرات شدید درجه حرارت و غلظت گونه‌ها اتفاق می‌افتد ولی با این حال ساختار شعله، ضخامت آن، سرعت شعله و دمای اضافی (اختلاف بین دمای محلی گاز و دمای آدیاباتیک شعله) به خوبی توسط روش میانگین‌گیری پیش‌بینی می‌شوند. همچنین آن‌ها نشان دادند که روش میانگین‌گیری قابلیت پیش‌بینی نقاط با دمای بالای گاز در مقیاس حفره را دارا نمی‌باشد. به خاطر محدودیت‌های محاسباتی و تعداد زیاد شبیه‌سازی‌های انجام شده آن‌ها اثرات مربوط به انتقال حرارت تشعشعی را در نظر نگرفتند. بنابراین، سرعت‌های شعله مطالعه شده توسط صحرای و کاویانی [۲۰] حتی در نسبت‌های هم‌ارزی بالا به مقدار زیادی پایینتر از حدی بود که در مشعل‌های متخلخل اتفاق می‌افتد. انتقال حرارت تشعشعی نقش مهمی را در مشعل‌های متخلخل ایفا می‌کند. اگرچه می‌توان با افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی تا حدودی به همان اثر تشعشع رسید، اما تشعشع مهم‌ترین مکانیزم انتقال حرارت در بعضی هندسه‌ها بوده و مقدار زیادی از پیش‌گرمایش مخلوط نسوخته را فراهم می‌کند. مطالعه هکرت و همکاران [۱۹] در ادامه کار صحرای و کاویانی با در نظر گرفتن تشعشع سطح به سطح می‌باشد. اگرچه مدل آرام آن‌ها تطابق خوبی با نتایج تجربی در مخلوط‌های رقیق نشان می‌داد، اما در نسبت‌های هم‌ارزی بالای ۰/۷ نتایج از هم فاصله گرفتند. بنابراین، نتایج برای نسبت‌های هم‌ارزی بالای ۰/۷ در کار آن‌ها گزارش نشده است. هکرت و همکاران [۱۹] نتیجه گرفتند که مدل‌های توربولانسی برای احتراق در نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر در ماده متخلخل نیاز است. با توجه به مطالعات انجام شده مدل‌سازی احتراق در ماده متخلخل در مقیاس حفره در مطالعه حاضر انجام شده است. میزان تغییرات مشخصه‌های

که در آن ρ دانسیته، $\bar{u}$ بردار سرعت متوسط، h_j آنتالپی گونه J ، J_j شار نفوذ گونه J ، $\bar{\tau}$ تانسور تنش، R_j نرخ خالص تولید گونه J توسط واکنش‌های شیمیایی، k انرژی جنبشی توربولانسی و ε نرخ اتلاف انرژی می‌باشد. به دلیل پیچیدگی هندسه مورد مطالعه از مدل DO برای در نظر گرفتن تشعشع بین ذرات فاز جامد و از فاز جامد به محیط پایین دست و بالا دست استفاده شده است. همچنین این مدل توانایی در نظر گرفتن صفحات تقارن را در محاسبات تشعشعی دارا می‌باشد. مدل DO توانایی در نظر گرفتن محیط فعال تشعشعی را دارا می‌باشد ولی در مطالعه حاضر برای محیط غیرفعال تشعشعی به مدل تشعشع سطح به سطح کاهش می‌یابد. معادله انتقال تشعشعی بر روی ۲۴ جهت مجزا حل شده است. میدان جریان توربولانسی در ماده متخلخل همسانگرد می‌باشد و این بدان معناست که نوسانات توربولانسی در همه جهات یکسان می‌باشند. به همین دلیل مدل $k - \varepsilon$ برای مطالعه حاضر قابل استفاده می‌باشد [۲۷، ۶]. ثابت‌های مورد استفاده در مدل $k - \varepsilon$ عبارتند از:

$$c_\mu = 0.09, \quad c_1 = 1.44, \quad c_2 = 1.92, \quad (8)$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

۴- مدل احتراقی

در احتراق داخل ماده متخلخل شعله در داخل حفره‌ها پایدار می‌شود که برای ماده متخلخل از جنس PSZ که در اینجا در نظر گرفته شده است، دارای اندازه ۱/۵ میلی‌متر می‌باشند. به دلیل این که این حفره‌های کوچک اندازه گردابه‌ها را محدود می‌کنند، گمان می‌رود که مقیاس کوچک توربولانس جریان را در بر می‌گیرد و اثر کلی آن تقویت پدیده‌های نفوذ باشد. بنابراین شعله تحت تأثیر مقیاس کوچک توربولانس قرار گرفته و پدیده‌های نفوذ در آن تقویت می‌شوند و این در حالی است که چروک خوردن شعله در این حالت ناچیز می‌باشد [۶]. بر اساس هندسه مشعل و خواصی که برای ماده متخلخل در این مطالعه در نظر گرفته شده است و همچنین ماکزیمم سرعت شعله در مشعل متخلخل، Re_p برای مشعل متخلخل تقریباً برابر ۱۲۰ است که بدین معنی است که جریان در داخل مشعل متخلخل بر اساس مطالعات تجربی پیشین برای جریان غیر واکنشی در داخل ماده متخلخل توربولانس می‌باشد [۲۷، ۳، ۲].

رضوان‌الدین [۱۵]، سایتو و دلموس [۲۲]، کوواهارا و همکاران [۲۳]، ناکایاما و همکاران [۲۴]، کوواهارا و همکاران [۲۵] و نظری و همکاران [۲۶]، در این مطالعه در نظر گرفته شده است که از آرایش شطرنجی سیلندره‌های مربعی شکل تشکیل شده است. به دلیل هزینه محاسباتی بالا مدل‌سازی تمام ماده متخلخل امکان پذیر نبوده و بنابراین، تنها یک ردیف از ذرات جامد با شرط مرزی تقارن در بالا و پایین در نظر گرفته شده است. صحراوی و کاویانی [۲۰] هندسه‌ای مشابه را برای مقایسه روش میانگین‌گیری با مدل‌سازی در مقیاس حفره برای جریان آرام واکنشی در داخل ماده متخلخل در نظر گرفته‌اند.

۳- معادلات حاکم

مدل‌سازی عددی احتراق متان/هوا بین آرایش شطرنجی سیلندره‌های جامد شامل معادلات جریان توربولانس، انتقال حرارت و جرم توسط جابجایی، انتقال حرارت بین گاز و ذرات جامد، واکنش‌های شیمیایی و انتقال حرارت تشعشعی بین سیلندره‌های جامد می‌باشد. به منظور حل مسأله پنج گروه از معادلات باید حل شوند که عبارتند از: پیوستگی، بقای مومنت، بقای انرژی (شامل تشعشع و هدایت در داخل فاز جامد)، انتقال گونه شیمیایی و معادلات مربوط به جریان توربولانس. معادلات بقای جرم، مومنت، آنتالپی کل و کسر جرمی گونه J به ترتیب عبارتند از:

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\bar{u} (\rho \bar{h})) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla \bar{T} - \sum \bar{h}_j J_j) + S_{h, \text{reaction}} + S_{h, \text{radiation}} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\bar{u} (\rho \bar{Y}_j)) = \nabla \cdot J_j + R_j \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\bar{u} (\rho k)) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

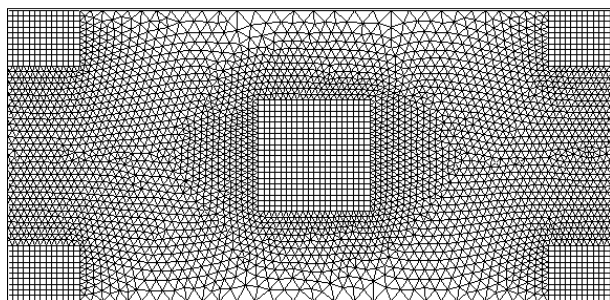
$$\nabla \cdot (\bar{u} (\rho \varepsilon)) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

است. در فصل مشترک بین گاز و جامد شرط عدم لغزش برای سرعت انتخاب شده است. شرط مرزی برای معادله انرژی در فصل مشترک شامل هدایت بین گاز و جامد و تشعشع جامد به جامد می‌باشد. تشعشع بین سیلندره‌های جامد و از ذرات جامد به محیط سرد بالادست و پایین‌دست در ورودی و خروجی در نظر گرفته شده‌اند. شبیه‌سازی حاضر در مقیاس حفره نیاز به ضریب انتقال حرارت جابجایی بین فازهای جامد و گاز را که در مدل‌های میانگین‌گیری وجود دارد از بین می‌برد. به‌علاوه، گرادیان کسر جرمی گونه‌ها بر روی سطح جامد برابر صفر می‌باشد.

۶- روش حل

شبیه‌سازی جریان واکنشی در مقیاس حفره در داخل ماده متخلخل توسط فلوئنت (نسخه ۶/۳) انجام شده است. معادلات بر روی یک شبکه از گریدهای غیر سازمان یافته با ۱۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی و با استفاده از روش احجام محدود حل شده‌اند. شبکه‌بندی یک سلول واحد در تحقیق حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است. الگوریتم سیمپل برای کوپلینگ بین سرعت و فشار استفاده شده است. شارهای جابجایی در همه معادلات به صورت آپویند مرتبه ۲ گسسته‌سازی شده‌اند. برای شبیه‌سازی توربولانس اندازه‌گیری‌های انجام شده تا مقدار y^+ به اندازه کافی پایین نگه داشته شد. y^+ فاصله بی‌بعدی از دیوار است که میزان انتقال اطلاعات از دیواره‌ها را در جریان توربولانس نشان می‌دهد. برای مطالعه حاضر مقدار ماکزیمم y^+ در همه نقاط از ۱ کوچک‌تر می‌باشد که در محدوده مجاز برای مدل $k-\epsilon$ می‌باشد هنگامی که از تابع دیواره پیشرفته^۱ استفاده می‌شود.



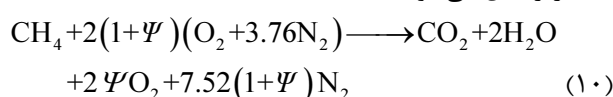
شکل ۲ شبکه‌بندی یک سلول واحد در مطالعه حاضر

همچنین به این معنی است که اثرات کلی توربولانس تقویت پدیده‌های نفوذ در داخل مشعل متخلخل می‌باشد [۲۸، ۱۱، ۶]. نرخ مصرف سوخت توسط رابطه آرینیوس داده می‌شود:

$$S_{fu} = \rho^2 A Y_{fu} Y_{ox} \exp(-E_a/RT) \quad (9)$$

که در آن Y_{fu} و Y_{ox} کسر جرمی گونه‌های سوخت و اکسید کننده می‌باشند، A برابر $[1 \times 10^{10} \text{ m}^3/(\text{kg s})]$ ، E انرژی فعال‌سازی و برابر $[1.4 \times 10^8 \text{ J}/(\text{kmol})]$ و R ثابت جهانی گازهاست.

علاوه بر این احتراق متان توسط مکانیزم یک مرحله‌ای مانند زیر مدل می‌شود:



که در آن Ψ هوای اضافی در جریان واکنش‌دهنده‌ها در ورودی ماده متخلخل می‌باشد که توسط رابطه (۱۱) با نسبت هم ارزی Φ مرتبط می‌شود.

$$\Psi = \frac{1}{\Phi} - 1 \quad (11)$$

که:

$$\Phi = \frac{(Y_{fuel}/Y_{ox})}{(Y_{fuel}/Y_{ox})_{st}} \quad (12)$$

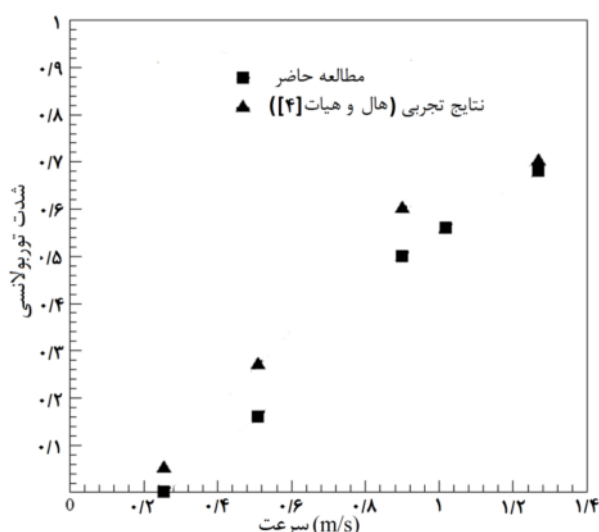
برای مخلوط استوکیومتری $\Psi = 0$.

اگرچه در نظر گرفتن مکانیزم‌های کامل برای پیش‌بینی آلاینده‌ها لازم می‌باشد، مکانیزم یک مرحله‌ای برای شبیه‌سازی‌هایی مانند تحقیق حاضر که هدف آن‌ها بررسی ساختار شعله و انتقال حرارت در داخل ماده متخلخل می‌باشد کافی است [۲۹، ۲۱، ۳۲].

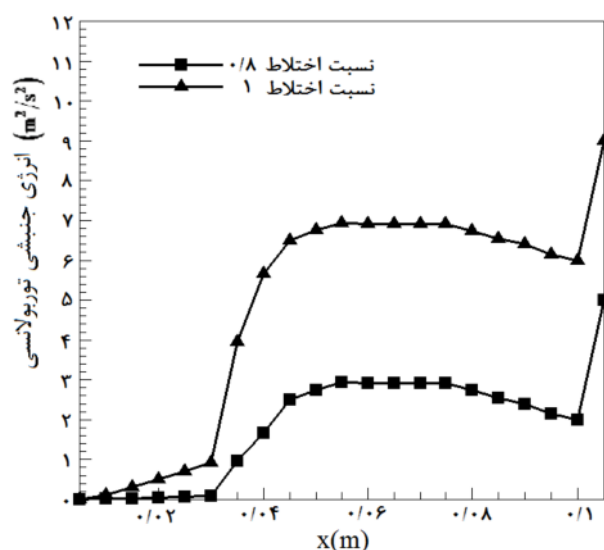
۵- شرط مرزی

مرزهای ورودی و خروجی در فاصله‌ای قرار داده شده‌اند که افزایش در فاصله آن‌ها نتایج نهایی را تغییر نمی‌دهد. در ورودی میدان محاسباتی سرعت، دما، شدت توربولانسی، قطر هیدرولیکی و کسر جرمی گازهای ورودی مشخص می‌شود. در پایین‌دست میدان محاسباتی شرط گرادیان صفر برای سرعت، دما، انرژی جنبشی توربولانس، نرخ اتلاف و کسر جرمی انتخاب می‌شود. در مرزهای بالا و پایین شرط مرزی تقارن برای همه متغیرها در نظر گرفته می‌شود. دمای محیط برابر ۳۰۰ کلوین

مقیاس حفره در مطالعه حاضر در $y/H = 0$ و برای نسبت‌های هم‌ارزی $0/8$ و 1 نشان می‌دهند. برای نسبت هم‌ارزی $0/65$ میزان انرژی جنبشی در طول مشعل بسیار ناچیز است و جریان آرام بوده و به همین سبب نمودار متناظر با آن نشان داده نشده است. با افزایش نسبت هم‌ارزی میزان ماکزیمم سرعت شعله افزایش یافته و افزایش تولید انرژی جنبشی توربولانسی را در ماده متخلخل موجب می‌شود.



شکل ۳ شدت توربولانسی در ۳ میلی‌متری پایین دست ماده متخلخل



شکل ۴ انرژی جنبشی توربولانسی در امتداد مشعل در $y/H = 0$ برای نسبت‌های هم‌ارزی $0/8$ و 1

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، میزان انرژی

از تشعشع در فاز گاز صرف‌نظر می‌شود و خواص فاز گاز با دما تغییر می‌کنند در حالی که برای فاز جامد خواص نسبت به دما ثابت هستند. محدوده هم‌گرایی برای تمام معادلات 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

۷- نتایج

۷-۱- انرژی جنبشی توربولانسی

برای مطالعه توربولانس در جریان واکنشی در ماده متخلخل، نتایج ماکزیمم سرعت شعله در نسبت‌های هم‌ارزی $0/65$ ، $0/8$ و 1 مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اثر میزان انرژی جنبشی توربولانسی در ورودی مشعل بر روی توزیع این کمیت در امتداد مشعل متخلخل مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده شده است که میزان انرژی جنبشی توربولانسی در داخل ماده متخلخل مستقل از شرط مرزی ورودی است. در عین حال، انبساط در اثر احتراق میدان جریان در داخل ماده متخلخل را به مقدار زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهد. سرعت پایین‌دست منطقه واکنش ممکن است به 3 تا 8 برابر سرعت ورودی مشعل که برابر سرعت شعله در این مطالعه در نظر گرفته شده است برسد [۵]. به علت اندازه‌گیری‌های محدود انجام شده به صورت تجربی در داخل ماده متخلخل نتایج شبیه‌سازی در مقیاس حفره حاضر با اندازه‌گیری‌ها برای جریان غیر واکنشی در مطالعه تجربی هال و هیات [۴] در 3 میلی‌متر پایین‌دست خروجی ماده متخلخل با اندازه حفره و سرعت یکسان مقایسه شده‌اند. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است نتایج شدت توربولانسی در تحقیق حاضر در پایین‌دست ماده متخلخل تطابق خوبی را با نتایج هال و هیات [۴] نشان می‌دهد. تفاوت بین نتایج عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی در سرعت‌های پایین در شکل ۳ از دو منبع سرچشمه می‌گیرد. اولین دلیل، حفره‌های بسته در ماده متخلخل واقعی مناطقی با میزان بالای تولید انرژی جنبشی توربولانسی ایجاد می‌کند که توسط هندسه در نظر گرفته شده در این مطالعه برای یک ماده متخلخل منظم قابل مشاهده نیست [۵]. ثانیاً، مدل $k - \epsilon$ در مطالعه حاضر برای جریان کاملاً توربولانسی توسعه داده شده است و با افزایش سرعت و در نتیجه افزایش Re_D استفاده از این مدل نتایج بهتری را در بر دارد.

شکل ۴ مقادیر انرژی جنبشی توربولانسی را از شبیه‌سازی در

توربولانسی کاهش می‌یابد. برای نسبت هم ارزی $Re_p = 0.65$ برابر ۵۵ بوده و جریان آرام می‌باشد [۱]. در این حالت میزان انرژی جنبشی توربولانسی بسیار ناچیز است. برای نسبت هم ارزی ۱ میزان Re_p دو برابر و جریان کاملاً توربولانسی است و میزان انرژی جنبشی بین حفره‌های ماده متخلخل چشمگیر می‌باشد [۲۸].

۷-۲- سرعت شعله:

ماکزیمم سرعت شعله بر حسب نسبت هم ارزی در شکل ۵ نشان داده شده است. سرعت شعله به صورت ماکزیمم سرعتی که جریان گازهای نسوخته در بالادست ورودی مشعل متخلخل دارند تعریف می‌شود. سرعت میانگین گازهای نسوخته در داخل مشعل متخلخل به اندازه ۱ بر روی ضریب تخلخل بزرگتر از سرعت در بالادست ورودی مشعل می‌باشد. مقادیر این مطالعه تطابق خوبی را با نتایج عددی هسو و همکاران [۳۳] نشان می‌دهد. همچنین مقادیر حاصل از این مطالعه با نتایج تجربی هسو و همکاران و نتایج شبیه‌سازی عددی هکرت و همکاران [۱۹] در مقیاس حفره برای مخلوط رقیق مقایسه شده و تطابق خوبی مشاهده شده است. برای نسبت‌های هم‌ارزی بیشتر از 0.65 نتایج حاصل از مطالعه حاضر از نتایج هسو و همکاران [۳۳] برای جریان آرام دور شده و سرعت شعله بیشتری را پیش‌بینی می‌کند. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در مقایسه با مکانیزم چند مرحله‌ای به کار رفته توسط هسو و همکاران [۳۳]، مکانیزم ۱ مرحله‌ای در شبیه‌سازی حاضر قادر به پیش‌بینی قابل قبول سرعت‌های شعله در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف می‌باشد. همچنین در شکل ۵ مشاهده می‌شود که سرعت‌های شعله محاسبه شده در مطالعه حاضر با دقت خوبی مطابق با نتایج شبیه‌سازی آرام توسط هسو و همکاران [۳۳] در نسبت‌های هم‌ارزی پایین‌تر می‌باشند که تأییدکننده نتایج بالا در مورد اثرات توربولانسی ناچیز در نسبت‌های هم‌ارزی پایین می‌باشد. سرعت شعله بی‌بعد به صورت نسبت سرعت انتشار شعله در ماده متخلخل به سرعت انتشار شعله آزاد آرام در همان نسبت هم ارزی تعریف می‌شود. سرعت انتشار شعله آزاد آرام در نسبت‌های هم‌ارزی 0.65 ، 0.8 و 1 به ترتیب برابر 16 ، 30 و 41 سانتی‌متر بر ثانیه است.

جنبشی توربولانسی برای برای نسبت‌های هم‌ارزی 0.8 و 1 در ناحیه شعله افزایش می‌یابد و پس از آن روند ثابتی را طی می‌کند تا به میزان کمی در انتهای مشعل افت می‌کند و در پایین دست خروجی مشعل به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. افزایش انرژی جنبشی توربولانسی در ناحیه شعله به دلیل انبساط و افزایش سرعت پس از احتراق می‌باشد که باعث تقویت ترم تولید انرژی جنبشی توربولانسی در اثر گرادیان سرعت نزدیک ذرات جامد در معادله انرژی جنبشی توربولانسی در مدل $k-\varepsilon$ می‌شود. کاهش انرژی جنبشی توربولانسی در انتهای مشعل در اثر دمای کمتر در خروجی در اثر انتقال حرارت تشعشعی به محیط خنک پایین‌دست می‌باشد. بنابراین، سرعت کاهش می‌یابد که به روند کاهشی انرژی جنبشی توربولانسی در انتهای مشعل منجر می‌شود. افزایش ناگهانی انرژی جنبشی توربولانسی در پایین‌دست مشعل در $x = 0.1 \text{ m}$ در شکل ۴ در اثر پروفیل سرعت جت مانند است که باعث تقویت ترم تولید انرژی جنبشی توربولانسی می‌شود [۵]. شبیه‌سازی در مقیاس حفره در این مطالعه این جت سرعت در خروجی مشعل و مقدار تولید بالاتر انرژی جنبشی توربولانسی در اثر این گرادیان سرعت را نشان می‌دهد. در حدود ۵ سانتی‌متر پایین دست خروجی مشعل و در کانال خروجی اثر این جت سرعت از بین رفته و مقدار انرژی جنبشی توربولانسی به سمت صفر میل می‌کند. روند تغییرات انرژی جنبشی توربولانسی با افزایش فاصله از خروجی مشعل در مطالعه حاضر تطابق خوبی با روند دیده شده در آزمایش‌های هال و هیات [۴] برای جریان غیر واکنشی در داخل ماده متخلخل در پایین‌دست خروجی مشعل دارد. خصوصیات جریان خروجی از مشعل متخلخل به خصوص برای محفظه‌های احتراق توربین‌های گاز که در آن‌ها سرعت و شدت توربولانس نقش مهمی را در انتقال حرارت به پره‌های توربین ایفا می‌کنند مهم است [۵].

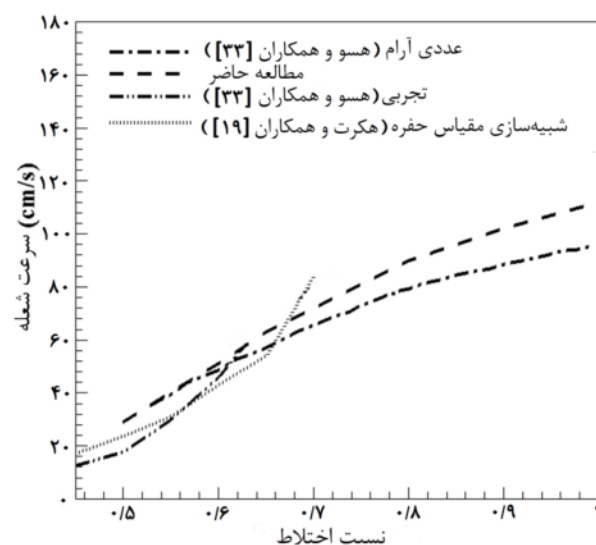
همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، انرژی جنبشی توربولانسی در ناحیه‌های قبل و بعد از شعله با کاهش نسبت هم ارزی به دلیل کاهش سرعت شعله کاهش می‌یابد. علاوه بر این، دمای پایین‌تر در نسبت‌های هم‌ارزی پایین‌تر موجب افزایش دانسیته گاز و در نتیجه کاهش سرعت آن می‌شود. در اثر کاهش سرعت میزان تولید انرژی جنبشی

۷-۳- ساختار شعله و ضخامت آن

توزیع دمای محاسبه شده در مطالعه حاضر دو بعدی است و شرایطی که در آن نرخ جریان برابر ۱۰۰ سانتی متر بر ثانیه در نسبت هم ارزی ۱ است در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، شعله در سرعت های بالاتر در پشت سیلندر به دام می افتد و در ناحیه گردابه ای در پشت سیلندر جامد پایدار می شود. ماهیت دو بعدی شعله در داخل ماده متخلخل به وضوح در میدان دمای شکل ۶ نشان داده شده است. قابل توجه است که بر خلاف مقیاس طولی کوچک در داخل ماده متخلخل شعله کاملاً خمیده است. مدل های یک بعدی که از میانگین گیری حجمی جامد و گاز در هر سلول استفاده می کنند، شکل کاملاً متفاوتی از شعله در ماده متخلخل به دست می دهند. این مدل ها شعله تختی را در ماده متخلخل برای تمام حالت ها پیش بینی می کنند. به علاوه، مدل های میانگین گیری قادر به پیش بینی نقاطی با دمای بالای موضعی در جبهه شعله در داخل ماده متخلخل نمی باشند. ماکزیمم دمای موضعی برای نسبت هم ارزی ۱ در شکل ۶ نشان داده شده است که برابر ۳۰۲۶ کلوین می باشد. ماکزیمم دماهای موضعی برای نسبت های هم ارزی ۰/۶۵ و ۰/۸ به ترتیب برابر ۲۷۳۴ و ۲۴۶۸ کلوین می باشند. نتایج به دست آمده برای ضخامت شعله در شکل ۷ نشان داده شده اند و با ضخامت شعله آرام در داخل ماده متخلخل گزارش شده توسط تسنگ [۳۶] مقایسه شده اند. مشاهده می شود که ضخامت شعله تحت تاثیر ماتریس جامد و توربولانس قرار می گیرد. مطالعه تعاریف مختلف ضخامت شعله توسط بلینت [۳۷] نشان داد که تعریف ضخامت شعله بر اساس گرادپان دما مناسب ترین انتخاب است، زیرا در این حالت ضخامت شعله به صورت مستقیم از پروفیل دمای قابل اندازه گیری شده به دست می آید و تاثیر انتقال و همچنین حرارت تولید شده توسط واکنش شیمیایی را در خود دارد. بنابراین ضخامت شعله، δ_f ، به صورت به صورت رابطه (۱۳) تعریف می شود.

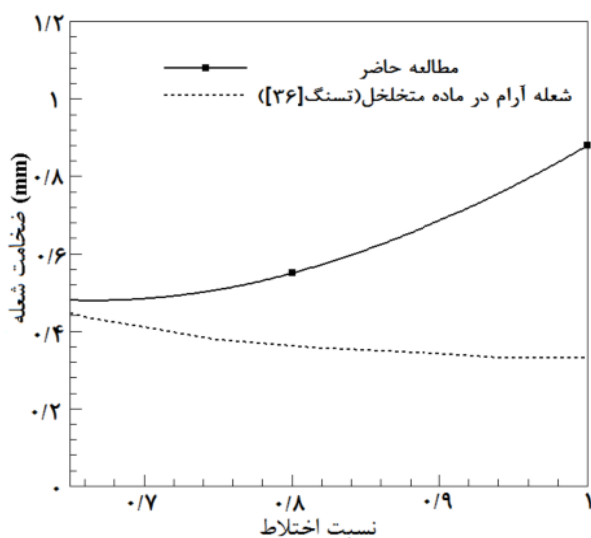
$$\delta_f = \frac{T_{\max} - T_{\text{in}}}{\left(\frac{dT}{dx} \right)_{\max}} \quad (13)$$

این تعریف بیانگر ضخامتی که در آن ماکزیمم مقدار انرژی ناشی از واکنش های شیمیایی آزاد می شود و در نتیجه ماکزیمم مقدار در افزایش دما به وقوع می پیوندد.

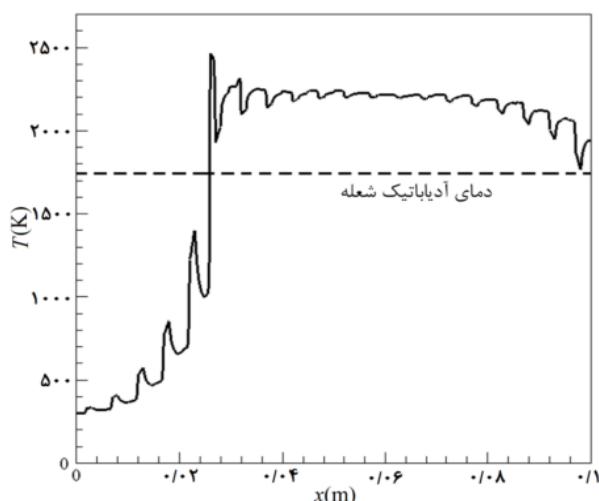


شکل ۵ سرعت شعله ماکزیمم در نسبت های هم ارزی متفاوت

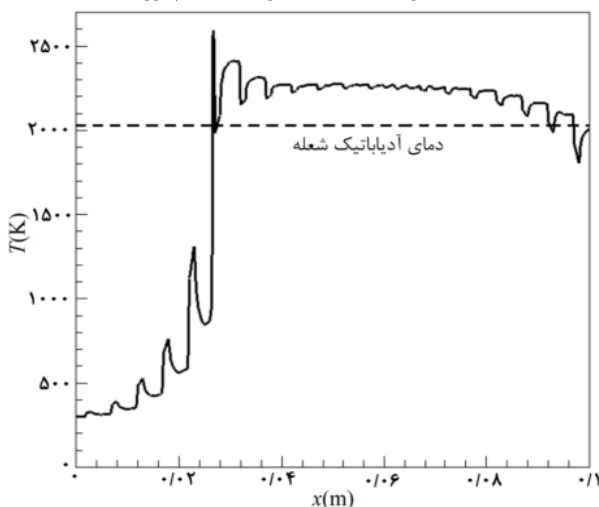
سرعت انتشار شعله در ماتریس متخلخل از سرعت انتشار شعله آزاد آرام بالاتر است و این به دلیل مکانیزم های پیش گرمایش می باشد. در نسبت های هم ارزی پایین تر سرعت شعله بی بعد بیشتر و پیش گرمایش بیشتر است که در تطابق با نتایج دیامانتیز و همکاران [۳۴] و ژائو و همکاران [۳۵] است. مقدار سرعت شعله بی بعد از ۴/۱ در نسبت هم ارزی ۰/۶۵ تا ۲/۷ در نسبت هم ارزی ۱ تغییر می کند. همچنین مقدار سرعت شعله در نسبت هم ارزی ۰/۸ نزدیک به ۳ می باشد. دلیل این افزایش به شارهای حرارت تشعشعی از بالادست و پایین دست مشعل بر می گردد. شارهای حرارتی تشعشعی بی بعد از بالادست و پایین دست مشعل متخلخل که با اتلاف تشعشعی و تشعشع خروجی نامیده می شوند به صورت نسبت شار حرارتی تشعشعی به نرخ سوزش مشعل تعریف می شود که خود نرخ سوزش به صورت توان حرارتی ورودی به ازای واحد سطح مشعل متخلخل تعریف می شود. اتلاف حرارتی از بالادست مشعل متخلخل در نسبت های هم ارزی ۰/۸ و ۱ به ترتیب برابر ۰/۳۴ و ۴/۱ درصد می باشند. در پایین دست مشعل، تشعشع خروجی به پایین دست مشعل برابر با ۳۲/۶۸ درصد برای نسبت هم ارزی ۰/۸ و ۴۳ درصد برای نسبت هم ارزی ۱ می باشند. همان طور که مشاهده می شود اتلاف حرارتی از بالادست در نسبت هم ارزی ۱، ۱۲ برابر بزرگتر است که منجر به پیش گرمایش کمتر و سرعت شعله بی بعد کمتر در نسبت های هم ارزی بالاتر می شود.



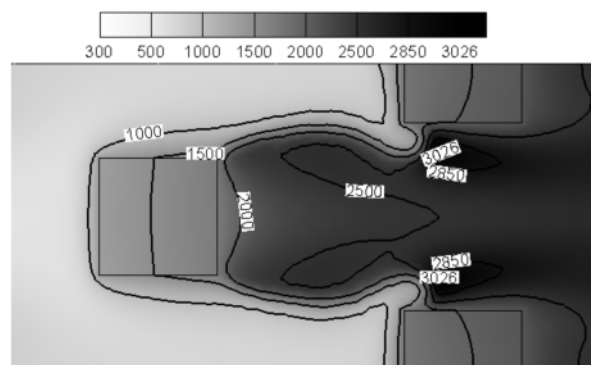
شکل ۷ ضخامت شعله برحسب نسبت هم ارزی



شکل ۸ دما در $y/H = 0$ در نسبت هم ارزی ۰/۶۵



شکل ۹ دما در $y/H = 0$ در نسبت هم ارزی ۰/۸



شکل ۱۰ کانتور دما بر حسب کلین در داخل ماده متخلخل

ضخامت شعله در هر دو مورد شعله آزاد و شعله متخلخل آرام با کاهش نسبت هم ارزی افزایش می‌یابد. ضخامت شعله توربولانسی در این مطالعه ضخیم‌تر از شعله آرام است همان طور که در کار یاراحمدی و همکاران [۱۱] دیده شده است. ضخامت شعله توربولانسی به علت تقویت پدیده‌های نفوذ و انتقال در منطقه شعله بیشتر از شعله آرام متخلخل است. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، ضخامت شعله توربولانسی با افزایش نسبت هم ارزی افزایش می‌یابد و این به دلیل افزایش شدت توربولانس و تقویت بیشتر پدیده‌های نفوذ و انتقال در این نسبت‌های هم‌ارزی می‌باشد.

۷-۴- درجه حرارت

توزیع دمای پایا به دست آمده از شبیه‌سازی در مقیاس حفره در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۶۵، ۰/۸، و ۱ در شکل‌های ۸-۱۰ نشان داده شده است. در همه حالات ماکزیمم دما در خط مرکزی هندسه نشان داده شده در شکل ۱ اتفاق نمی‌افتد. بنابراین، دمای ماکزیمم در شکل‌های ۸-۱۰ با ماکزیمم دمایی که در هر کدام از نسبت‌های هم‌ارزی اتفاق می‌افتد یکی نیست. با افزایش هوای اضافی در مخلوط‌های رقیق دما کاهش می‌یابد. ماکزیمم دما در مخلوط استوکیومتریک اتفاق می‌افتد. در عین حال، دمای اضافی که به صورت اختلاف دمای محاسبه شده در مشعل متخلخل و دمای آدیاباتیک شعله بعد از احتراق تعریف می‌شود در نسبت‌های هم‌ارزی رقیق‌تر بیشتر است که با نتایج دیامانتیز و همکاران [۳۴] و ژائو و همکاران [۳۵] مطابقت دارد. شکل ۸ دمای اضافی را برای نسبت هم ارزی ۰/۶۵ نشان می‌دهد.

متخلخل با در نظر گرفتن اثرات توربولانس در تحقیق حاضر مورد مطالعه قرار گرفته است. برخلاف مدل‌سازی‌های پیشین که از میانگین‌گیری حجمی برای شبیه‌سازی مشعل متخلخل استفاده نموده‌اند، شعله به دست آمده در این مطالعه در داخل حفره‌های ماده متخلخل تخت نبوده و کاملاً خمیده می‌باشد. شبیه‌سازی در مقیاس حفره نیاز به ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب خاموشی در داخل ماده متخلخل که به صورت روابطی غیر قابل اطمینان در روش میانگین‌گیری استفاده می‌شوند را از بین می‌برد. بر اساس نتایج به دست آمده، نتیجه‌گیری‌های زیر انجام می‌شود:

۱- به دلیل انبساط حرارتی در احتراق و در نتیجه سرعت بالاتر در ناحیه پس از شعله، انرژی جنبشی توربولانسی یک پرش ناگهانی در ناحیه شعله را نشان می‌دهد و به مقداری چند برابر در ناحیه پس از شعله می‌رسد. با افزایش نسبت هم ارزی، انرژی جنبشی توربولانسی افزایش می‌یابد و توربولانس نقش مهم‌تری را در احتراق در سرعت‌های شعله بالاتر ایفا می‌کند.

۲- میزان انرژی جنبشی توربولانسی مستقل از میزان آن در ورودی می‌باشد. در شرایط یکسان و با میزان متفاوت انرژی جنبشی ورودی، مقدار انرژی جنبشی توربولانسی در داخل ماده متخلخل ثابت می‌ماند. بنابراین تولید و اتلاف توربولانس در داخل ماده متخلخل توسط ماتریس جامد انجام می‌شود و میزان انرژی جنبشی جریان ورودی به مشعل تنها به میزان چند میلی‌متر در ابتدای مشعل قابل مشاهده می‌باشد.

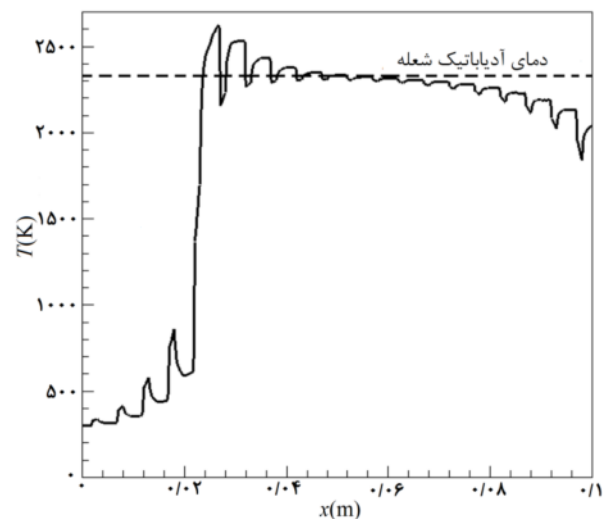
۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر در مقیاس حفره برای نسبت‌های هم‌ارزی رقیق با نتایج حاصل از شبیه‌سازی آرام و توربولانس از مطالعات پیشین هم‌خوانی دارند. برای نسبت‌های هم‌ارزی رقیق، توربولانس اثر کمی دارد و این به دلیل سرعت شعله پایین می‌باشد. از سوی دیگر، اثرات توربولانسی در سرعت‌های شعله بالاتر و در نزدیکی مخلوط استوکیومتریک بیشتر است.

۴- سرعت شعله بی‌بعد و دمای اضافی در نسبت‌های هم‌ارزی پایین‌تر بیشتر از نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر است و این به دلیل اتلاف حرارت کمتر از بالادست مشعل در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر می‌باشد.

۵- توربولانس موجب افزایش ضخامت شعله در اثر تقویت

با افزایش نسبت هم‌ارزی دمای اضافی کاهش یافته که به دلیل افزایش اتلاف حرارت تشعشعی به بالادست مشعل متخلخل و افزایش تشعشع خروجی در پایین‌دست مشعل متخلخل است. کاهش دمای گاز در ناحیه بعد از شعله در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود تا این که دمای دو فاز جامد و گاز یکسان شود. همین طور در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود که دمای جامد و گاز در اثر تشعشع به محیط سرد پایین‌دست کاهش می‌یابد. در ناحیه قبل از شعله در اثر تشعشع از پایین‌دست شعله دمای جامد بیشتر از دمای گاز می‌باشد که با ماکزیمم‌های موضعی در شکل‌های ۸ تا ۱۰ در ناحیه قبل از پرش در نمودار دما که معرف شعله است مشاهده می‌شود. بعد از شعله دمای جامد از دمای گاز کمتر می‌باشد که با مینیمم‌های موضعی در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است.

اختلاف بین دماهای جامد و گاز در میانه مشعل کاهش می‌یابد که در اثر تشعشع کمتر ذرات جامد به بالادست و پایین‌دست مشعل متخلخل می‌باشد. در انتهای مشعل متخلخل تفاوت بین دماهای گاز و جامد افزایش می‌یابد. این به علت تشعشع ذرات جامد به پایین‌دست می‌باشد که باعث کاهش دمای فاز جامد شده و فاز گاز نیز در اثر انتقال حرارت جابجایی به جامد دمای آن کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰ دما در $y/H = 0$ در نسبت هم‌ارزی ۱

۸- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عددی جریان واکنشی در داخل حفره‌های ماده

پدیده‌های نفوذ می‌شود. همچنین با افزایش نسبت هم ارزی ضخامت شعله در تحقیق حاضر افزایش می‌یابد که مخالف روند مشاهده شده برای شعله آرام در داخل ماده متخلخل و شعله آزاد است.

۹- مراجع

- numerical investigation of laminar and turbulent premixed flames in porous media”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 183, 2011, pp. 1146–1183.
- [12] Antohe, B. A., Lage, J. L., “A general two-equation macroscopic model for incompressible flow in porous media”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, 1997, pp. 3013–3024.
- [13] Nakayama, A., Kuwahara, F., “A macroscopic turbulence model for flow in a porous medium”, *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 121, 1999, pp. 427–433.
- [14] Pedras, M. H. J., de Lemos, M. J. S., “Macroscopic turbulence modeling for incompressible flow through undeformable porous media”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, 2001, pp. 1081–1093.
- [15] Teruel, F. E., Rizwan-Uddin, “A new turbulence model for porous media flow, Part II: Analysis and validation using microscopic simulations”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, 2009, pp. 5193–5203.
- [16] Kaviany, M., *Principles of Heat Transfer in Porous Media*, New York, Springer-Verlag, 1991.
- [17] Hsu, P. F., Howell, J. R., “Measurements of thermal conductivity and optical properties of porous partially stabilized zirconia”, *Experimental Heat Transfer*, Vol. 5, 1992, pp. 293–313.
- [18] Younis, L. B., Viskanta, R., “Experimental determination of the volumetric heat transfer coefficient between stream of air and ceramic foam”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, 1993, pp. 1425–1434.
- [19] Hackert, L. C., Ellzey, L. J., Ezekoye, A. O., “Combustion and heat transfer in model two-dimensional porous burners”, *Combustion and Flame*, Vol. 116, 1999, pp. 177–191.
- [20] Sahraoui, M. and Kaviany, M., “Direct simulation vs volume-averaged treatment of adiabatic, premixed flame in a porous medium”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, 1994, pp. 2817–2834.
- [21] Hsu, P. F., Matthews, R. D., “The necessity of using detailed chemical kinetics in model for premixed combustion in porous media”, *Combustion and Flame*, Vol. 93, 1993, pp. 457–466.
- [22] Saito, M. B., de Lemos, M. J. S., “A Correlation for Interfacial Heat Transfer Coefficient for Turbulent Flow Over an Array of Square Rods”, *Journal of Heat Trans-Part T ASME*, Vol. 128, 2006, pp. 444–452.
- [23] Kuwahara, F., Shirota, M., A. Nakayama, “A Numerical Study of Interfacial Convective Heat Transfer Coefficient in Two-Energy Equation Model for Convection in Porous Media”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*,
- [1] Dybbs, A., and Edwards, R. V., A new look at porous media fluid mechanics-Darcy to turbulent, in: J. Bear, M. Y. Corapcioglu (Eds.), *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*, Dordrecht, Martinus Nijhoff Publishers, 1984, pp. 1–30.
- [2] Jolls, K. R., and Hanratty, T. J., “Transition to turbulence for flow through a dumped bed of spheres”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 21, 1996, pp. 1185–1190.
- [3] Fand, R. M., Kim, B. Y. K., Lam, A. C. C., Phan, R. T., “Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 109, 1987, pp. 268–274.
- [4] Hall, M. J. and Hiatt, J. P., “Exit flows from highly porous media”, *Physics of Fluids*, Vol. 6, 1994, pp. 469–479.
- [5] Wharton, J. A., Ellzey, J. L., Bogard, D. G., “An experimental study of turbulence intensities and non-uniformities in the exit flow from a porous medium”, *Experiments in Fluids*, Vol. 38, 2005, pp. 701–707.
- [6] Lim I. G., Matthews, R. D., “Development of a model for turbulent combustion within porous inert media”, *International Journal of Fluid Mechanics Research*, Vol. 25, 1998, pp. 111–122.
- [7] Lage, J. L., The fundamental theory of flow through permeable media from Darcy to turbulence, In D. B. Ingham and I. Pop, Eds., *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*, UK, Kindlington, Pergamon, 1998, pp. 1–30.
- [8] Hsu, P. F., Evans, W. D., Howell, J. R., “Experimental and numerical study of premixed combustion within nonhomogeneous porous ceramics”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 90, 1993, pp. 149–172.
- [9] Kamal, M. M., Mohamad, A. A., “Combustion in porous media; a review”, *Journal of Power and Energy*, Vol. 220, No. 5, 2006, pp. 487–508.
- [10] Maerefat, M., El-Hossaini, M. K., and Mazaheri, K., “Numerical modeling of two-dimensional cylindrical porous radiant burners with sidewall heat losses”, *Journal of Porous Media*, Vol. 14, 2011, pp. 317–327.
- [11] Yarahmadi, A., Nobari, M. R. H., Hosseini, R., “A

- [31] Tseng, C. J., Tsai, H.Y., "Simulation of thermally-enhanced combustion in a porous medium burner", *Heat Transfer –Asian Research*, Vol. 35, 2006, pp. 75–88.
- [32] Moraga, N. O., Rosas, C. E., Bubnovich, V. I., Solari, N. A., "On predicting two-dimensional heat transfer in a cylindrical porous media combustor", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 1–2, 2008, pp. 302–311.
- [33] Hsu, F. P., Evans, D. W., Howell, R. J., "Experimental and numerical study of premixed combustion within non-homogeneous porous ceramics", *Combustion Science and Technology*, Vol. 90, 2003, pp. 149–172.
- [34] Diamantis, D. J., Mastorakos, E., Goussis, D. A., "Simulations of premixed combustion in porous media", *Combustion Theory and Modeling*, Vol. 6, 2002, pp. 383–441.
- [35] Zhao, P. H., Ye, T. H., Jiang, H., Chen, Y. L., "Study of the mechanisms of the flame propagation and stabilization in porous media", *Science in China Series E: Technological Sciences*, Vol. 51, 2008, pp. 871–881.
- [36] Tseng, C. J., "Effects of hydrogen addition on methane combustion in a porous medium burner", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 27, No. 6, 2002, pp. 699–707.
- [37] Blint, R. J., "The relationship of the laminar flame width to flame speed", *Combustion Science and Technology*, Vol. 49, 1986, pp. 79–92.
- Vol. 44, 2001, pp. 1153–1159.
- [24] Nakayama, A., Kuwahara, F., Sugiyama, M., Xu, G., "A Two-Energy Equation Model for Conduction and Convection in Porous Media", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, 2001, pp. 4375–4379.
- [25] Kuwahara, F., Yamane, T., Nakayama, A., "Large eddy simulation of turbulent flow in porous media", *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, 2006, pp. 411–418.
- [26] Nazari, M., Salehi, A.R., Khaksar, M., "Analytical and Numerical Calculation of Flow Permeability in a Porous Medium with Square Cross Section", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 1, 1391, pp. 21–32. (In Persian)
- [27] Horton, N. A., Pokrajak, D., "Onset of turbulence in a regular porous medium: An experimental study", *Physics of Fluids*, Vol. 21, 2009, pp. 045104–1–13.
- [28] de Lemos M. J. S., "Numerical simulation of turbulent combustion in porous materials", *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, 2009, pp. 996–1001.
- [29] Mujeebu, M. A., Abdullah, M. Z., Mohamad, A. A., Abu Bakar, M. Z., "Trends in modeling of porous media combustion", *Progress in Energy and Combustion science*, Vol. 6, 2010, pp. 1–24.
- [30] Mohamad, A. A., Combustion in porous media: fundamentals and applications, in: D. B. Ingham, I. Pop (Eds.), *Transport Phenomena in Porous Media III*, Oxford: Elsevier, 2005, pp. 17–47.