

مدل سازی عددی جریان واکنشی آشفته درون ماده متخلخل

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
 دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
 دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مهدی ترشیزی
 حسن خالقی*
 کاظم محمدزاده

چکیده

در مقاله حاضر جریان واکنشی مغشوش درون یک ماده متخلخل با توسعه یک کد کامپیوتری مدل می‌گردد. معادلات انرژی مجزا برای فازهای سیال و جامد با روش عدم تعادل حرارتی، معادلات اغتشاش $k-\epsilon$ با روش تجزیه مضاعف و آهنگ مصرف سوخت براساس رابطه یک-مرحله‌ای آرنیوس اعمال شده‌اند. مدل سازی اغتشاش منجر به نزدیکی نتایج مدل سازی با نتایج تجربی گردید. اغتشاش موجود در جریان موجب تاثیر بیشتر پخش و انتقال حرارت به ناحیه پیش گرمایش شده و بیشینه دمای کمتری در ناحیه احتراق بوجود می‌آید اما در احتراق با هوای اضافه، تفاوت دما در ناحیه بالادست جریان مشاهده نمی‌شود. نتایج نشان داد که با کاهش تخلخل در ناحیه احتراق، دمای سیال در طول مشعل کاهش بیشتری می‌یابد به طوری که برای ضریب تخلخل ۰/۹۵ و ۰/۷ دمای بیشینه به ترتیب حدود ۰/۱۶٪ و ۰/۱۸٪ کاهش می‌یابد. حداکثر اختلاف دما با هوای اضافی ۶۷٪ حدود ۴۰۰ کلوین می‌باشد که در موقعیت $x=0/1m$ رخ می‌دهد. این اختلاف برای حالت بدون هوای اضافی حدود ۲۰۰ کلوین در موقعیت $x=0/045m$ می‌باشد. **واژه‌های کلیدی:** مشعل متخلخل، اغتشاش، جریان واکنشی، تجزیه مضاعف، تعادل غیر گرمایی.

Numerical Modeling of Turbulent Reacting flow in Porous Media

M. Torshizi
 H. Khaleghi
 K. Mohammadzadeh

Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
 Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
 Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

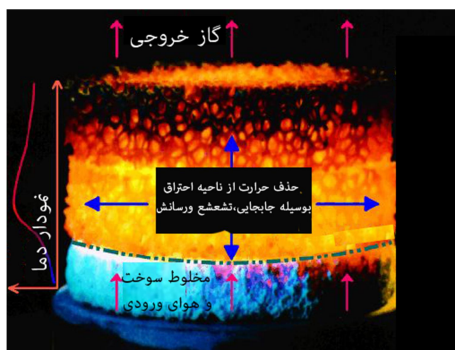
In the present paper, the turbulent reacting flow within a porous media is modeled by developing a computer code. Separate energy equations for fluid and solid phases and the $k-\epsilon$ turbulence equations have been applied by non-thermal equilibrium and double decomposition methods, respectively and the fuel consumption rate is obtained from one-step Arrhenius equation. Turbulence modeling helped to obtain closer results compared with experimental data. Turbulence caused an increase to the effect of diffusion and heat transfer in the preheat zone which resulted in a lower maximum temperature in the combustion zone. In the case of excess air combustion, no temperature difference is observed in the upstream zone. The results showed that with decreasing porosity in the combustion zone, the fluid temperature along the burner decreases. That is, for the porosities of 0.95 and 0.7 the maximum temperature is decreased by 16% and 18% respectively. The maximum temperature difference in the case of excess air of 67% is about 400K which occurs at $x=0.01m$ and for the case of no excess air is about 200K at $x=0.045m$.

Keywords: Porous burner, Turbulence, Reaction flow, double decomposition, non-thermal equilibrium.

انتقال گرما در فرایند احتراق بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [۱].

۱- مقدمه

وظیفه مشعل، احتراق سوخت‌های فسیلی و تامین گرما است. با توجه به کاربرد فراگیر مشعل‌ها و تمرکز آنها در نواحی شهری و تاسیسات خانگی و صنعتی، بهینه‌سازی آن‌ها به منظور بهره‌وری بیشتر از سوخت‌های فسیلی و همچنین کاهش آلودگی هوا ضروری به نظر می‌رسد. در مشعل‌های متداول که به مشعل‌های شعله آزاد^۱ معروف‌اند، به دلیل ناکافی بودن دفع حرارت از ناحیه واکنش، دما بطور موضعی بالاست که این امر باعث افزایش تولید آلاینده‌ها می‌گردد. امروزه مشعل‌های متخلخل به منظور تعدیل محدودیت‌های مشعل‌های شعله آزاد و کاهش نشر آلاینده‌ها از طریق تقویت و افزایش موده‌های درگیر



شکل ۱- ساختار مشعل متخلخل [۱]

¹ Free flame burners

میانگین مکانی، میانگین زمانی، انحرافات مکانی و نوسانات زمانی [۸]. در سال ۲۰۱۳ نيموری به مطالعه اثرات اغتشاش در جریان احتراقی درون مشعل متخلخل پرداخت و اثرات آن را بر توزیع دما، سرعت سوزش و تولید آلاینده‌ها بررسی نمود [۳]. مشعل متخلخل مورد بررسی، یک مشعل دولایه استوانه‌ای است که نتایج تجربی شافین و همکاران [۹]، هسو و همکاران [۱۰] و نیز نتایج عددی هسو و همکاران [۱۱] و بارا و الزی [۱۲] برای آن موجود است.

در سال ۲۰۱۵ فلاح بدون استفاده از عملگر متوسط‌گیری حجمی که موجب پیدایش جملات اضافی و در نتیجه نیاز به مدل‌سازی می‌شود، به بررسی اثرات اغتشاش بر روی جریان واکنشی در داخل حفره‌های ماده متخلخل پرداخت و مدلی اغتشاشی برای جریان‌های مغشوش در داخل ماده متخلخل ارائه کرد [۱۳].

در تحقیق حاضر، هدف تهیه یک کد کامپیوتری است که جریان واکنشی درون مشعل متخلخل را همراه با در نظر گرفتن اثرات اغتشاش به صورت دوبعدی حل کند. بدین منظور لازم است معادلات مومنتوم برای جریان سیال درون محیط متخلخل اصلاح شده و عبارات‌های داری و برینکمن به آن افزوده شده و به کد اعمال شود. همچنین معادلات انرژی به صورت مجزا و به روش عدم تعادل حرارتی برای فاز سیال و جامد نوشته شوند. پس از آن معادلات اغتشاش $k - \varepsilon$ تکمیل شده و با اعمال عملگر متوسط‌گیری حجمی و زمانی به روش تجزیه‌ی مضاعف، این معادلات برای جریان سیال درون محیط متخلخل اصلاح شوند. در مرحله آخر معادله پایستاری گونه برای کسر جرمی سوخت به کد اعمال شود که نرخ مصرف سوخت در آن از رابطه یک‌مرحله‌ای آرنیوس بدست می‌آید. پس از تکمیل کد کامپیوتری تاثیر کمیت‌های مختلف همچون تخلخل، نسبت رسانایی گرمایی و نیز اغتشاش بر روی میدان دما بررسی می‌شود. مشعل مورد نظر برای انجام مدل‌سازی، مشعل مورد استفاده در تحقیق تجربی پیرا [۱۴] است که نتایج عددی آن برای جریان با رژیم آرام، توسط کوتینیو و دلموس [۱۵] ارائه شده است.

۲- معادلات حاکم

در این بخش از متوسط‌گیری حجمی و متوسط‌گیری زمانی برای استخراج معادلات اغتشاشی درون محیط متخلخل استفاده شده است. همچنین مدل‌سازی جریان آشفته به روش تجزیه مضاعف انجام شده است. در ادامه با رعایت اختصار معادلات حاکم بررسی می‌شوند.

۲-۱- معادله پیوستگی ماکروسکوپی

پس از اعمال عملگرهای متوسط‌گیری بر معادله پیوستگی میکروسکوپی و استفاده از نظریه تجزیه مضاعف، معادله پیوستگی ماکروسکوپی عبارتست از:

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

که در آن:

$$\bar{u}_D = \phi(\bar{u})^i \quad (2)$$

در رابطه (۲)، \bar{u} میانگین حجمی بردار سرعت متوسط‌گیری شده زمانی، \bar{u}_D را نشان می‌دهد و \bar{u}_D سرعت داری است.

در مشعل‌های محیط متخلخل به دلیل تماس مستقیم شعله با جامد در محفظه احتراق، انتقال گرمای رسانی و تابشی، نسبت به مشعل‌های شعله آزاد به نحو چشم‌گیری افزایش می‌یابد. از طرف دیگر به دلیل بهبود دفع حرارت از ناحیه احتراق، میزان افزایش موضعی دما کاهش یافته و به تبع آن تولید ترکیبات NO_x نیز تقلیل می‌یابد [۲].

بررسی مطالعات انجام شده در ارتباط با مشعل متخلخل نشان می‌دهد که برای نسبت هم‌ارزی‌های بالا نتایج مدل‌سازی عددی از داده‌های تجربی انحراف خواهد داشت. اکثر محققین در نظر نگرفتن اغتشاش درون حفره‌های محیط متخلخل را مهم‌ترین عامل برای این عدم تطابق بین نتایج بیان کرده‌اند. علی‌رغم تاکید بر اهمیت اغتشاش درون مشعل متخلخل، اکثر مدل‌سازی‌های عددی در ارتباط با مشعل متخلخل با فرض رژیم لایه‌ای انجام شده است که دلیل آن، عدم وجود مدل‌های اغتشاشی مناسب برای جریان درون محیط‌های متخلخل می‌باشد [۳].

با توجه به اینکه در ماده متخلخل گذار به جریان مغشوش در عددهای رینولدز پایین اتفاق می‌افتد، برای مدل‌سازی بهتر جریان درون محیط متخلخل بایستی اثر این اغتشاش در معادلات مورد توجه قرار گیرد. استفاده از عملگر متوسط‌گیری حجمی به عنوان یک ابزار قوی برای مدل‌سازی این اغتشاش مورد توجه است [۴].

برای مدل‌سازی اثرات آشفته‌گی درون محیط متخلخل دو مسئله‌ی اساسی وجود دارد: مدل‌سازی آشفته‌گی (تغییرات زمانی) و مدل‌سازی پدیده انتقال درون هندسه پیچیده محیط متخلخل (تغییرات مکانی). برای حل این مسائل می‌توان از یک متوسط‌گیری زمانی برای بررسی پدیده اغتشاش و از یک متوسط‌گیری حجمی برای بررسی پیچیدگی هندسه محیط متخلخل روی معادلات میکروسکوپی (که برای مقیاس حفره دقیقاً همان معادلات نویر-استوکس است) استفاده نمود. بنابراین با توجه به اینکه بر روی معادلات دو عملگر متوسط‌گیری حجمی و زمانی اعمال می‌شود، نحوه و ترتیب اعمال آن‌ها زمینه‌ی اصلی بررسی‌ها را ایجاد می‌کند.

تراکون و کاتن در سال ۱۹۹۵ اولین مدل آشفته‌گی برای جریان درون محیط متخلخل را بر مبنای حل متوسط‌گیری شده حجمی جریان ارائه کردند [۵].

آنتو و لاگ در ۱۹۹۷ پایه‌گذار اولین مدل‌سازی دومعادله‌ای اغتشاش درون محیط متخلخل بودند. بنای مدل‌سازی آن‌ها معادلات نویر-استوکس متوسط‌گیری شده‌ی مکانی برای محیط متخلخل که شامل نیروهای درگ داری و فورچیم است [۶].

ناکایاما و کوواهارا در سال ۱۹۹۹ با تغییر روند متوسط‌گیری نسبت به آنتو و لاگ یک مدل $k - \varepsilon$ دیگر (N-K) را برای بررسی اغتشاش درون محیط متخلخل توسعه دادند. فرایند مدل‌سازی در این مدل ابتدا با معادلات متوسط‌گیری شده زمانی رینولدز آغاز شده و در ادامه این معادلات روی حجم اولیه‌ی معرف (REV) متوسط‌گیری مکانی می‌شوند [۷].

پدراس و دلموس در سال ۲۰۰۱ روی ترتیب متوسط‌گیری تمرکز کرده و روش تجزیه‌ی مضاعف را معرفی نمودند که طبق آن هر کمیت دلخواه را می‌توان به چهار جزء تقسیم نمود. این اجزا عبارتند از

مدل جمله نیروی شناوری به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$G_{\beta}^i = \phi \frac{\mu_{t\phi}}{\rho \sigma_t} \beta_{\phi} \mathbf{g} \cdot \nabla \langle \bar{T} \rangle^i \quad (13)$$

۲-۴- معادلات ماکروسکوپی انرژی برای سیال و جامد

به دلیل وجود ترم چشمه احتراقی در معادله‌ی انرژی سیال و جمله تابش در معادله‌ی انرژی جامد، نتایج مدل^۱ LTE (روش تعادل گرمایی) معتبر نبوده و بایستی از مدل^۲ LTNE (روش عدم تعادل حرارتی) استفاده نمود. در این روش، برای هر یک از فازهای جامد و سیال یک معادله انرژی جداگانه در نظر گرفته می‌شود. با اعمال عملگرهای متوسط‌گیری و افزودن اثرات احتراق و تشعشع، معادلات انرژی برای فاز سیال و شبکه جامد به صورت زیر بدست می‌آید [۱۵].

$$\nabla \cdot (\rho_f C_{p,f} \bar{u}_D \langle T_f \rangle^i) = \nabla \cdot \{ K_{eff,f} \cdot \nabla \langle T_f \rangle^i \} + h_i a_i (\langle T_s \rangle^i - \langle T_f \rangle^i) + \phi \Delta H S_{fu} \quad (14)$$

$$0 = \nabla \cdot \{ K_{eff,s} \cdot \nabla \langle T_s \rangle^i \} - h_i a_i (\langle T_s \rangle^i - \langle T_f \rangle^i) \quad (15)$$

در رابطه (۱۴)، $a_i = \frac{A_i}{\Delta V}$ سطح مقطع در واحد حجم و h_i ضریب انتقال حرارت میان سیال و جامد است. تعیین a_i با توجه به اطلاعات سازندگان سرامیک و یا اندازه‌گیری میسر خواهد بود. در ادامه یکی از روابط معتبر برای محاسبه‌ی a_i آورده شده است:

$$a_i = \frac{4\phi}{d_p(1-\phi)} \quad (16)$$

برای $K_{eff,s}$ و $K_{eff,f}$ به ترتیب تانسورهای رسانایی گرمایی موثر برای سیال و جامد هستند. این عبارات به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۶]:

$$K_{eff,f} = \{ \phi k_f \} \mathbf{I} + K_{f,s} \quad (17)$$

$$K_{eff,s} = \left\{ (1-\phi) \left[k_s + \frac{16\sigma \langle T_s \rangle^i}{3\beta_r} \right] \right\} \mathbf{I} + K_{s,f} \quad (18)$$

جمله‌ی $\frac{16\sigma \langle T_s \rangle^i}{3\beta_r}$ در رابطه (۵۰) بیان‌گر تابش در جامد متخلخل است. جمله‌های $K_{s,f}$ و $K_{f,s}$ نیز رسانایی گرمایی محلی را نشان می‌دهند [۱۵].

در معادلات (۱۵) تا (۱۸)، \mathbf{I} تانسور یکه، ΔH حرارت تولیدی ناشی از احتراق، β_r ضریب خاموشی و σ ثابت استفان-بولتزمن هستند. مقدار ثابت استفان-بولتزمن برابر $5.66961 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ است. همچنین نرخ مصرف سوخت نام دارد.

$$\beta_r = \left(\frac{3}{d_p} \right) (1-\phi) \quad (19)$$

گرمای انتقال یافته میان دو فاز سیال و جامد با استفاده از ضریب انتقال گرمای h_i محاسبه می‌شود. یکی از روابط ریاضی برای محاسبه ضریب انتقال گرما که توسط کوواها را ارائه شده به صورت زیر می‌باشد [۳]:

$$\frac{h_i d_p}{k_f} = \left(1 + \frac{4(1-\phi)}{\phi} \right) + \frac{1}{2} (1-\phi)^{\frac{1}{2}} Re_D Pr^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

برای استفاده از این رابطه محدوده مجاز تخلخل $0.2 < \phi < 0.9$ می‌باشد. مقدار عدد رینولدز بر اساس قطر حفره، Re_D بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$Re_D = \frac{\rho_f |\bar{u}_D| d_p}{\mu} \quad (21)$$

در روابط (۱۹)، (۲۰) و (۲۱)، d_p قطر متوسط حفره‌ها است و برابر است با:

۲-۲- معادله مومنتوم ماکروسکوپی

با صرف نظر از اثرات پراکندگی هیدرودینامیکی، معادله‌ی مومنتوم ماکروسکوپی برای جریان مغشوش درون محیط متخلخل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\bar{u}_D \bar{u}_D}{\phi} \right) = -\nabla(\phi \langle \bar{P} \rangle^i) + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{u}_D) + \nabla \cdot \left(-\rho_f \phi \langle \bar{u}' \bar{u}' \rangle^i \right) - \left[\frac{\mu \phi}{K} \bar{u}_D + \frac{C_f \phi \rho_f |\bar{u}_D| \bar{u}_D}{\sqrt{K}} \right] \quad (3)$$

در این معادله، $-\rho_f \phi \langle \bar{u}' \bar{u}' \rangle^i$ تانسور تنش رینولدز ماکروسکوپی بوده که به صورت زیر مدل می‌گردد:

$$-\rho_f \phi \langle \bar{u}' \bar{u}' \rangle^i = \rho_f v_{t\phi} 2 \langle \bar{D} \rangle^i - \frac{2}{3} \phi \rho_f \langle k \rangle^i \mathbf{I} \quad (4)$$

که در آن $\langle \bar{D} \rangle^i$ تانسور نرخ کرنش ماکروسکوپی عبارتست از:

$$\langle \bar{D} \rangle^i = \frac{1}{2} [\nabla(\phi \langle \bar{u} \rangle^i) + [\nabla(\phi \langle \bar{u}' \rangle^i)]^T] \quad (5)$$

لزجت گردابه‌ای ماکروسکوپی $v_{t\phi}$ در مدل‌های اغتشاشی موجود برای جریان درون محیط متخلخل همانند روابط مدل $k-\epsilon$ برای جریان آزاد بیان می‌گردد.

$$v_{t\phi} = \frac{\mu_{t\phi}}{\rho_f} = c_{\mu} \frac{\langle k \rangle^i}{\langle \epsilon \rangle^i} \quad (6)$$

ضریب K که در این دو جمله ظاهر می‌شود نفوذپذیری ماده‌ی متخلخل می‌باشد که با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$K = \frac{\phi^3 d_p^2}{144(1-\phi)^2} \quad (7)$$

در این رابطه، d_p قطر متوسط حفره‌های محیط متخلخل می‌باشد.

۲-۳- معادلات اغتشاشی ماکروسکوپی درون محیط متخلخل

پس از اعمال عملگر متوسط‌گیری حجمی بر معادلات انرژی جنبشی اغتشاشی، $\langle k \rangle^i = \frac{\langle \bar{u}' \bar{u}' \rangle^i}{2}$ و نرخ اتلاف آن، $\langle \epsilon \rangle^i = \nu \langle \nabla u' : (\nabla u')^T \rangle^i$ معادلات اغتشاشی ماکروسکوپی به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\nabla \cdot (\bar{u}_D \langle k \rangle^i) = \nabla \cdot \left[\left(v + \frac{v_{t\phi}}{\sigma_k} \right) \nabla(\phi \langle k \rangle^i) \right] + P^i + \phi G_k^i - \phi \langle \epsilon \rangle^i \quad (8)$$

$$\nabla \cdot (\bar{u}_D \langle \epsilon \rangle^i) = \nabla \cdot \left[\left(v + \frac{v_{t\phi}}{\sigma_{\epsilon}} \right) \nabla(\phi \langle \epsilon \rangle^i) \right] + (c_1 P^i - c_2 \phi \langle \epsilon \rangle^i) \frac{\langle \epsilon \rangle^i}{\langle k \rangle^i} + \phi G_{\epsilon}^i \quad (9)$$

در روابط فوق، P^i نرخ تولید انرژی جنبشی اغتشاشی به واسطه گرادیان سرعت است.

$$P^i = -\langle \bar{u}' \bar{u}' \rangle^i : \nabla \bar{u}_D \quad (10)$$

معادلات مدل مغشوش ماکروسکوپی درون محیط متخلخل شامل دو جمله‌ی اضافی G_k^i و G_{ϵ}^i می‌باشد که به ترتیب نشان‌دهنده تولید داخلی انرژی جنبشی و نرخ اتلاف آن به واسطه حضور ماده جامد می‌باشد. تفاوت مدل‌های مغشوش موجود برای محیط متخلخل نیز در نحوه مدل‌سازی این دو جمله می‌باشد. در ادامه روابط ارائه شده برای مدل پدرااس و دلموس (P-dL) آمده است.

$$G_k^i = c_k \frac{\phi \langle k \rangle^i |\bar{u}_D|}{\sqrt{K}} \quad (11)$$

$$G_{\epsilon}^i = c_{\epsilon} c_k \frac{\phi \langle k \rangle^i |\bar{u}_D|}{\sqrt{K}} \quad (12)$$

در معادلات فوق مقدار $c_k = 0.28$ در نظر گرفته می‌شود. در این

¹ Local Thermal Equilibrium

² Local Thermal Non Equilibrium

$$\overline{Nu} = \frac{1}{H} \int_0^H Nu \, dy \quad (29)$$

عدد دارسی نیز به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$Da = \frac{K}{H^2} \quad (30)$$

K مقدار نفوذپذیری است که با استفاده از رابطه‌ی (Y) تعیین می‌شود.

روابط محاسبه‌ی اعداد رایلی و رایلی-دارسی به ترتیب در ادامه آمده‌اند:

$$Ra_f = \frac{g\beta H^3 \Delta T}{\nu_f \alpha_f} \quad (31)$$

$$Ra_m = Ra_f \cdot Da = \frac{g\beta H \Delta T K}{\nu_f \alpha_{eff}} \quad (32)$$

در روابط (29) تا (32)، H بعد طولی در میدان حل، β ضریب انبساط گرمایی سیال و α_{eff} پخشندگی گرمایی موثر به صورت زیر است [20]:

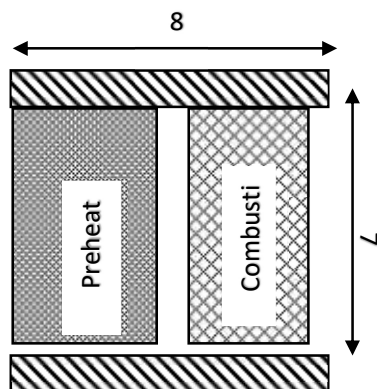
$$\alpha_{eff} = \frac{K_{eff}}{(\rho C_p)_f} \quad (33)$$

۳- مدل‌سازی عددی

در این تحقیق، از توسعه کد TEAM که یک کد کامپیوتری حجم محدود برای مدلسازی جریان‌های اغتشاشی بیضوی دوبعدی و پایا است، استفاده شده است. شبکه در این کد غیر یکنواخت است و نقاط شبکه در مرکز حجم کنترل واقع می‌شوند. همچنین در این کد، از روش شبکه‌بندی جابجا شده استفاده می‌شود.

۳-۱- هندسه مشعل متخلخل

برای مدل‌سازی از یک نمونه مشعل دولایه دوبعدی مطابق شکل ۲ که داده‌های تجربی پیرا [۱۴] و داده‌های عددی دلموس [۱۵] برای آن گزارش شده است، استفاده می‌شود. مشعل به عرض ۷۰ میلی‌متر از یک قسمت پیش‌گرمایش با $\phi = 0.86$ و $PPCM = 15.74$ و یک قسمت احتراق با $\phi = 0.9$ و $PPCM = 3.9$ تشکیل شده است.



شکل ۲- هندسه‌ی مشعل متخلخل در تحقیق حاضر

۳-۲- شرایط مرزی

از آنجا که مشعل مورد مطالعه در دو بعد مدل شده است، با توجه به مشخص بودن نسبت هم‌ارزی، سرعت و همچنین کسر جرمی سوخت در ورودی مشعل تعیین می‌گردد. دمای مخلوط سوخت و هوا

$$d_p = \sqrt{\frac{4\phi}{PPCM}} \quad (22)$$

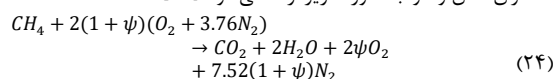
در رابطه فوق به معنای تعداد حفره‌ها به ازای یک سانتیمتر طول محیط متخلخل است. محاسبه این عبارت نیز همانند قطر حفره مشکل می‌باشد.

۲-۵- معادله ماکروسکوپی پایستاری گونه و مدل احتراقی

معادله انتقال برای کسر جرمی سوخت متوسط‌گیری شده $(Y_{fu})^i$ در ادامه آورده شده است [۱۵]:

$$\nabla \cdot (\rho_f \bar{u}_D (Y_{fu})^i) = \nabla \cdot \rho_f D_{eff} \cdot \nabla (\phi (Y_{fu})^i) - \phi S_{fu} \quad (23)$$

در این رابطه، D_{eff} تانسور انتقال گونه موثر است. در این تحقیق به علت جلوگیری از پیچیدگی، فرض می‌شود که واکنش گرمایی احتراق در یک مرحله اتفاق افتد. واکنش شیمیایی مورد نظر برای احتراق متان و هوا به صورت زیر ارائه می‌شود [۱۶]:



در رابطه (۲۴)، ψ هوای اضافی موجود در جریان ورودی و واکنش‌دهنده‌ها به ماده متخلخل است. در شرایط استوکیومتری، $\psi = 0$ ، بنابراین تمام هوای ورودی در برخورد با متان سوزانده شده و مصرف می‌شود. نرخ مصرف سوخت محلی در تمام حجم مشعل (فضای سیال و جامد) بر اساس رابطه آرنیوس یک‌مرحله‌ای تعیین می‌شود [۱۷ و ۱۸]. این رابطه عبارتست از:

$$S_{fu} = \rho_f^a A (Y_{fu}^b)^i (Y_{ox}^c)^i e^{\frac{-E}{RT_f}} \quad (25)$$

که در آن $(Y_{fu}^b)^i$ و $(Y_{ox}^c)^i$ به ترتیب کسر جرمی سوخت و اکسیدکننده متوسط‌گیری شده هستند. مقادیر توان‌های a ، b و c نیز با توجه به نوع واکنش متفاوت است که همگی این مقادیر برای واکنش احتراق متان با هوا برابر یک می‌باشد [۱۹]. در رابطه نرخ مصرف سوخت محلی، ضریب $A = 2.6 \times 10^8 \, s^{-1}$ و مقدار انرژی فعال‌سازی برابر $E = 1.3 \times 10^5 \, \frac{J}{mol}$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به واکنش شیمیایی انتخاب شده، مقدار حرارت تولیدی ناشی از احتراق در رابطه‌ی (۱۴) برابر $\Delta H = 4.5 \times 10^7 \, \frac{J}{kg}$ قرار داده می‌شود.

برای تعیین چگالی سیال، مخلوط گازی به صورت گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده و از رابطه گاز کامل برای محاسبه چگالی استفاده می‌شود.

$$\rho_f = \frac{P\bar{W}}{RT_f} \quad (26)$$

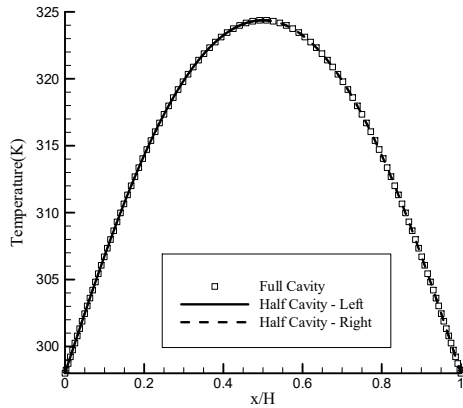
P فشار مطلق، R ثابت جهانی گازها و \bar{W} وزن مولی متوسط مخلوط گازی است.

برای میدان حلی با توزیع دمایی متفاوت، عدد ناسلت محلی روی دیواره دما بالا با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شود:

$$Nu = \frac{hL}{K_{eff,f}} \quad (27)$$

$$Nu = \left(\frac{\partial(T)^V}{\partial x} \right)_{x=0} \frac{L}{T_H - T_C} \quad (28)$$

همچنین مقدار متوسط عدد ناسلت بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

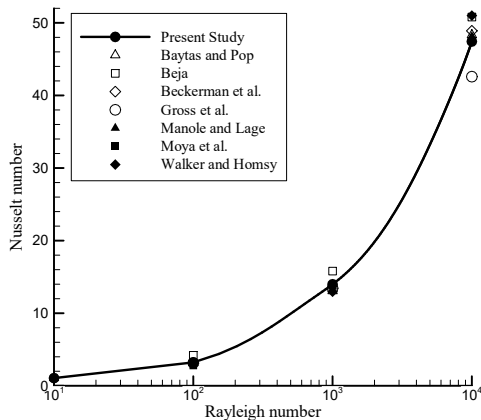


شکل ۵- تغییرات دمای سیال بر روی محور تقارن افقی حفره

در ادامه معادله انرژی فاز جامد به کد افزوده شد که شامل یک جمله پخش و جمله چشمه برای ارتباط با معادله انرژی فاز سیال می‌شود. به جهت اختصار، صحت اعمال این تغییر همراه با معادلات اغتشاشی و افزودن همرفت طبیعی به کد ارائه می‌شود.

۴-۲-۳- اعمال معادلات اغتشاشی، توابع دیواره، مدل انرژی LNTE و همرفت طبیعی در محیط متخلخل

در شکل ۶ نتایج مدل‌سازی‌های عددی برای جریان سیال در حفره متخلخل با همرفت طبیعی و در نظر گرفتن اغتشاش و همچنین استفاده از مدل LNTE، برای تحقیق حاضر و مراجعی که در تحقیق براگا و دلموس [۲۰] آورده شده، ارائه شده است. در این نمودار مقادیر میانگین عدد بی‌بعد ناسلت محاسبه شده از رابطه‌ی (۲۹) برای عددهای رایلی متفاوت بدست آمده از رابطه‌ی (۳۲) آورده شده است.



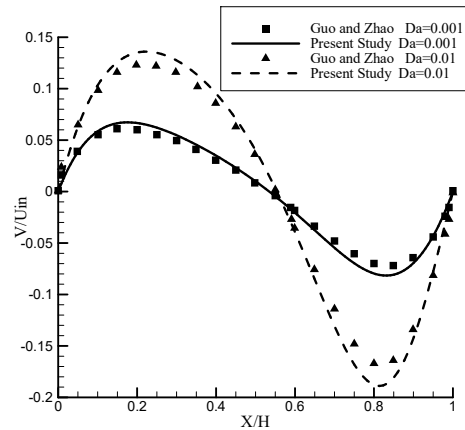
شکل ۶- نتایج عددی مدل‌سازی حفره متخلخل به همراه معادلات انرژی و اغتشاش

در شکل ۷ نیز نتایج مدل‌سازی عددی حفره متخلخل با همرفت طبیعی و در نظر گرفتن اغتشاش، برای عددهای دارسی متفاوت در تحقیق حاضر و تحقیق براگا و دلموس [۲۰] آورده شده است.

معادله پایستاری گونه، هندسه به صورت نهایی شکل ۲ درآمده و شرایط مرزی هندسه جدید اعمال شده است.

۴-۲-۱- اعمال عملگر متوسط‌گیری حجمی به معادلات مومنوم

در مرحله‌ی اول، پس از اطمینان از صحت کد با حل مسئله‌ی حفره، معادلات مومنوم برای جریان سیال درون محیط متخلخل اصلاح شد. برای بررسی صحت تغییرات اعمال شده به کد، نتایج به دست آمده با نتایج گو و ژوا [۲۱] برای مدل لنیس-بولتزمن برای جریان تراکم‌ناپذیر درون محیط متخلخل مقایسه شد. شکل ۴ نتایج را در دو حالت عدد دارسی برابر ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ نمایش می‌دهد. با توجه به اینکه عدد دارسی معادل نفوذپذیری بر مجذور بعد طول میدان است (و در این مسئله برابر یک)، عدد دارسی با نفوذپذیری رابطه‌ی مستقیم دارد. بنابراین با افزایش مقدار دارسی، نفوذپذیری بیشتر شده و در نتیجه مولفه‌ی سرعت عمودی افزایش می‌یابد.



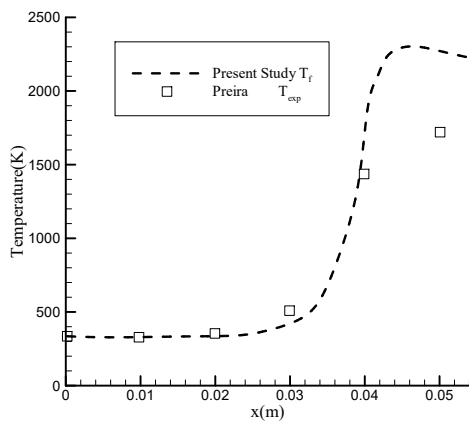
شکل ۴- سرعت عمودی بر روی محور تقارن افقی برای جریان در حفره متخلخل در تحقیق حاضر و تحقیق گو و ژوا [۲۱]

۴-۲-۲- اعمال معادله انرژی فاز سیال

در ادامه معادله انرژی فاز سیال به کد افزوده شد. برای تعیین صحت این تغییر بایستی شرط مرزی سرعت در مرز بالای حفره صفر شده و شرایط مرزی دمایی بگونه‌ای اعمال شود تا تقارن محوری در میدان ایجاد گردد. در این بررسی مرز بالای حفره به عنوان مرز دما بالا و سایر مرزها، مرز دما پایین انتخاب شدند. در نتیجه برای بررسی نتایج کافی بود حفره در سه حالت کامل، نیمه‌ی سمت چپ و نیمه‌ی سمت راست حل گردد. در صورتی که نتایج دو سمت قرینه بوده و در کنار یکدیگر نتیجه‌ی میدان کامل را ایجاد کنند، معادله‌ی انرژی بطور صحیح به کد اضافه شده است. شکل ۵ نتایج این مرحله از صحت‌سنجی را نشان می‌دهد که حاکی از صحت اعمال معادله‌ی انرژی به کد است.

۴-۲-۵- اعمال معادله پایستاری گونه و صحت‌سنجی جریان واکنشی

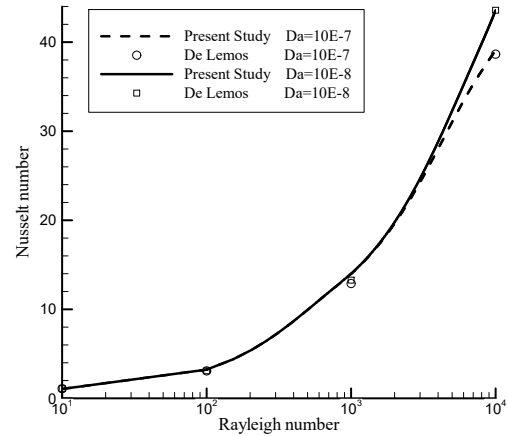
در مرحله بعد نتایج مدل‌سازی عددی جریان واکنشی در مشعل متخلخل برای تحقیق حاضر با نتایج تجربی پیرا [۱۴] برای مشعل با خصوصیات مشابه مقایسه می‌گردد. در شکل ۹ مقادیر دما در طول مشعل برای تحقیق حاضر و تحقیق آزمایشگاهی پیرا ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج عددی تا قبل از وقوع احتراق و در ناحیه‌ی پیش‌گرمایش سازگاری خوبی با مقادیر تجربی دارد، اما با توجه به اینکه احتراق به صورت یک‌مرحله‌ای مدل شده است، در ناحیه‌ی احتراق، مقادیر دمای سیال با نتایج آزمایشگاهی اختلاف دارد.



شکل ۹- نتایج مدل‌سازی عددی احتراق همراه با اغتشاش و هوای اضافه‌ی ۶۷ درصد و نتایج تجربی

۴-۳- نتایج مدل‌سازی عددی تحقیق حاضر

در ابتدا تغییرات دمای جامد متخلخل و دمای سیال جریان یافته درون آن بررسی می‌گردد. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در ابتدا دمای فاز سیال و جامد یکسان و برابر دمای ۲۹۸ کلوین ورودی به مشعل است. در ناحیه‌ی احتراق دمای سیال به علت تولید انرژی گرمایی ناشی از مصرف سوخت، افزایش می‌یابد. حداکثر دمای سیال ۲۸۴۲K است. دمای جامد متخلخل به واسطه‌ی انتقال گرمای همرفت در ارتباط با فاز سیال، افزایش می‌یابد. حداکثر دمای جامد متخلخل تقریباً ۲۵۶۰K است. در ادامه جامد متخلخل از طریق انتقال گرمای تابشی و رسانشی، حرارت دریافت کرده را به بالادست جریان منتقل می‌کند. بنابراین در بالادست جریان دمای فاز جامد بیشتر از دمای سیال است. این اختلاف دما سبب می‌شود تا گرما به وسیله همرفت به سیال در بالادست جریان رسیده و موجب پیش‌گرمایش سیال در ابتدای مشعل شود. از این مسئله به عنوان یکی از مزایای مشعل متخلخل نسبت به مشعل شعله-آزاد نامبرده می‌شود.

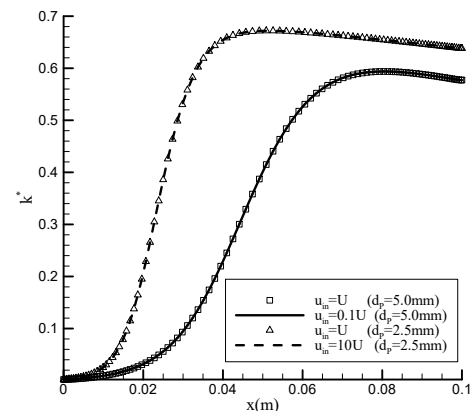


شکل ۷- نتایج مدل‌سازی عددی حفره برای تحقیق حاضر و تحقیق براگا و دلموس [۲۰]

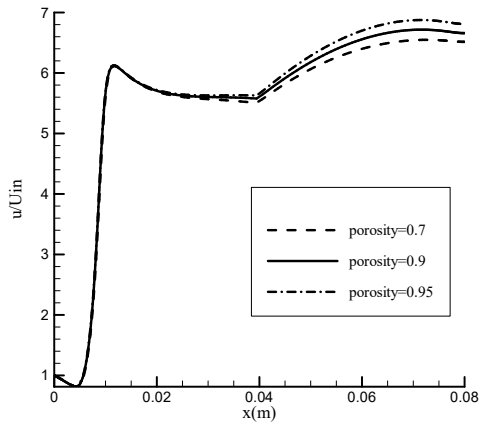
با توجه به اینکه نتایج مدل‌سازی حفره در نمودارهای فوق تفاوت چندانی میان تحقیق حاضر و مراجع آورده شده در تحقیق براگا و دلموس و نیز خود مطالعات براگا و دلموس [۲۰] وجود ندارد صحت مدل‌سازی تا این مرحله به اثبات می‌رسد.

۴-۲-۴- اعمال هندسه‌ی مشعل متخلخل و بررسی مدل P-dl در این هندسه

در این مرحله، میدان حل از حفره به مشعل تغییر کرده و شرایط مرزی متناظر با آن به مسئله اعمال شد. در ادامه تاثیر سرعت ورودی در شرایط رینولدز ورودی ثابت بر روی انرژی جنبشی اغتشاشی بی‌بعد بررسی شده است. همانطور که پیش از این ذکر شد انرژی جنبشی اغتشاشی در مدل P-dl وابسته به سرعت ورودی سیال است، اما از آنجا که انرژی جنبشی اغتشاشی بی‌بعد برابر $k^* = k/u_{in}^2$ است، انرژی جنبشی اغتشاشی بی‌بعد مستقل از مقدار سرعت ورودی به مشعل است. این مسئله برای دو قطر حفره‌ی متفاوت در شکل ۸ محقق شده است.

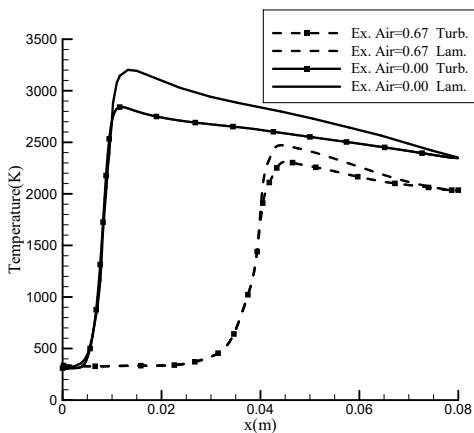


شکل ۸- تاثیر سرعت ورودی بر انرژی جنبشی اغتشاشی در مدل P-dl



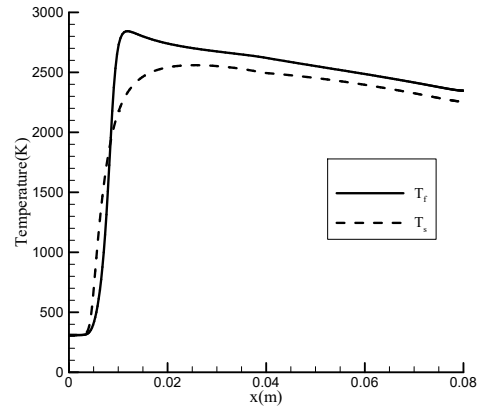
شکل ۱۲- تغییرات سرعت بی‌بعد افقی در طول مشعل برای تخلخل‌های متفاوت در ناحیه‌ی احتراق

در نهایت تاثیر اغتشاش بر توزیع دما در طول مشعل بررسی می‌شود. بدین منظور تغییرات دما با در نظر گرفتن اثرات اغتشاشی و همچنین بدون در نظر گرفتن آن برای دو حالت احتراق استوکیومتری و احتراق با هوای اضافی ۶۷٪ مطالعه شد. نتایج این بررسی در شکل ۱۳ ارائه شده است.



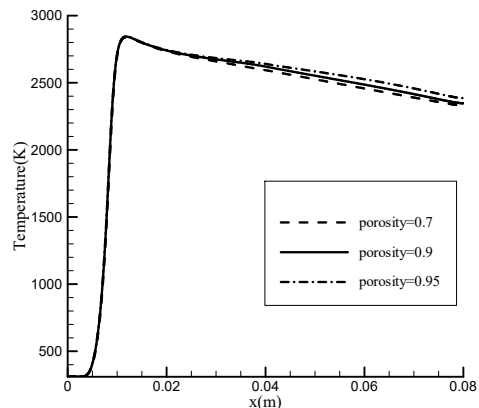
شکل ۱۳- تاثیر اغتشاش بر توزیع دما در طول مشعل برای احتراق استوکیومتری و احتراق با هوای اضافه

پیش‌تر در بررسی صحت‌سنجی جریان واکنشی در شکل ۹ مشاهده شد که دمای ناحیه احتراق در مدل‌سازی عددی احتراق همراه با اغتشاش به علت مدل کردن یک‌مرحله‌ای احتراق بیش از مقدار تجربی بدست آمده بود. در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود مدل‌سازی احتراق بدون در نظر گرفتن اغتشاش موجب افزایش بیشتر اختلاف دما در ناحیه‌ی احتراق می‌شود. حداکثر اختلاف دمای مربوط به هوای اضافی ۶۷٪ حدود ۴۰۰ کلوین و در موقعیت $x=0.01m$ رخ می‌دهد که این اختلاف برای حالت بدون هوای اضافه حدود ۲۰۰ کلوین و در موقعیت $x=0.045m$ می‌باشد. بنابراین مدل‌سازی اغتشاش موجب شده تا نتایج مدل‌سازی به نتایج تجربی نزدیک گردد. نکته‌ی قابل توجه



شکل ۱۰- مقادیر دمای جامد متخلخل و دمای سیال در طول مشعل برای احتراق استوکیومتری همراه با اغتشاش

در شکل ۱۱ با کاهش تخلخل در ناحیه‌ی احتراق، مقدار انتقال گرما از طریق رسانش افزایش یافته و دمای سیال در طول مشعل کاهش بیشتری می‌یابد. تغییر دما از ۲۸۴۵K به ۲۳۸۵K در ضریب تخلخل ۰/۹۵ و از ۲۸۴۰K به ۲۳۳۰K در ضریب تخلخل ۰/۷ در این شکل قابل مشاهده است. به عبارتی برای ضریب تخلخل ۰/۹۵ و ۰/۷ دمای بیشینه به ترتیب حدود ۱۶٪ و ۱۸٪ کاهش یافته‌است.



شکل ۱۱- تغییرات دمای سیال در طول مشعل برای تخلخل‌های متفاوت در ناحیه‌ی احتراق

در شکل ۱۲ نیز مطابق انتظار با افزایش تخلخل در ناحیه‌ی احتراق و افزایش دمای سیال نسبت به حالت‌های دیگر، سرعت افقی سیال نیز افزایش می‌یابد. تغییر سرعت از حدود ۵/۷ برابر سرعت ورودی به حدود ۶/۸ برابر سرعت ورودی در ضریب تخلخل ۰/۹۵ و از حدود ۵/۵ برابر سرعت ورودی به حدود ۶/۵ برابر سرعت ورودی در ضریب تخلخل ۰/۷ در شکل مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که سرعت افقی سیال پس از وقوع احتراق در حدود ۶ برابر افزایش یافته که این افزایش سرعت، به علت افزایش دمای سیال ناشی از احتراق و در نتیجه کاهش چگالی سیال است. در ادامه با کاهش دمای سیال، سرعت آن نیز کاهش می‌یابد، اما با تغییر قطر حفره‌های جامد در پایین‌دست جریان بار دیگر سرعت سیال افزایش می‌یابد.

- [6] Antohe B., Lage J., A general two-equation macroscopic turbulence model for incompressible flow in porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 13, pp. 3013-3024, 1997.
- [7] Nakayama A., Kuwahara F., A macroscopic turbulence model for flow in a porous medium, *Journal of fluids engineering*, Vol. 121, No. 2, pp. 427-433, 1999.
- [8] Pedras M. H., de Lemos M. J., Macroscopic turbulence modeling for incompressible flow through undeformable porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 6, pp. 1081-1093, 2001.
- [9] Chaffin C., Koenig M., Koeroghlian M., Matthews R. D., Hall M., Lim I., Nichols S., Experimental investigation of premixed combustion within highly porous media, in *Proceeding of the 1991 ASME JSME thermal engineering joint conference*. 1991.
- [10] Hsu P.-F., Matthews R. D., The necessity of using detailed kinetics in models for premixed combustion within porous media, *Combustion and flame*, Vol. 93, No. 4, pp. 457-466, 1993.
- [11] 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, No. 1-4, pp. 149-172, 1993.
- [12] Barra A. J., Diepvens G., Ellzey J. L., Henneke M. R., Numerical study of the effects of material properties on flame tabilization in a porous burner, *Combustion and Flame*, Vol. 134, No. 4, pp. 369-379, 2003.
- [13] Jouybari N., *A New Turbulent Macroscopic Model for Flow in Porous Media*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, 2015.
- [14] Pereira F. M., Medição de características térmicas e estudo do mecanismo de estabilização de chama em queimadores porosos radiantes, Thesis, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2002.
- [15] Coutinho J. E., de Lemos M. J., Laminar flow with combustion in inert porous media, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 7, pp. 896-903, 2012.
- [16] Moro Filho R. C., de Lemos M. J., NUMERICAL SIMULATION OF COMBUSTION IN INERT POROUS MEDIA, 2007.
- [17] de Lemos M. J., Analysis of turbulent combustion in inert porous media, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 4, pp. 331-336, 2010.
- [18] Mohamad A., Viskanta R., Ramadhyani S., Numerical predictions of combustion and heat transfer in a packed bed with embedded coolant tubes, *Combustion Science and Technology*, Vol. 96, No. 4-6, pp. 387-407, 1994.
- [19] Kuo K. K., Principles of combustion, 1986.
- [20] Braga E. J., de Lemos M. J., Turbulent natural convection in porous square cavity computed with a macroscopic $\kappa-\epsilon$ model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 26, pp. 5639-5650, 2004.

دیگر اینست که این اختلاف دما برای حالت استوکیومتری بیش از احتراق با هوای اضافه است. به عبارت دیگر تاثیر اغتشاش در احتراق استوکیومتری بیشتر است که علت آن افزایش سرعت است. اغتشاش موجود در جریان موجب تاثیر بیشتر دیفیوژن می شود، بنابراین حرارت بیشتری به ناحیه پیش گرمایش انتقال یافته و بیشینه دمای کمتری در ناحیه احتراق بوجود می آید و هر چه این سرعت ناشی از احتراق بیشتر باشد اغتشاش بیشتر است. همچنین با انتقال گرما با بالادست جریان، هوای ورودی پیش گرم می شود که این مسئله برای احتراق استوکیومتری کاملا مشخص است. اما در احتراق با هوای اضافه، به علت اینکه سرعت و در نتیجه تاثیر اغتشاش کم است، تفاوت دما در ناحیه بالادست جریان مشاهده نمی شود.

۵- جمع بندی

در تحقیق حاضر جریان واکنشی درون مشعل متخلخل با در نظر گرفتن اثرات اغتشاش مدل گردید. بدین منظور از کد کامپیوتری حل گر معادلات مومنتوم استفاده شد. در ابتدا معادلات مومنتوم برای جریان سیال درون محیط متخلخل اصلاح شده و عبارت های دارسی و برینکمن به آنها افزوده و در کد اعمال شد. در ادامه معادلات انرژی و جزا برای فازهای سیال و جامد به روش عدم تعادل حرارتی به کد اضافه شد. سپس معادلات اغتشاش $k-\epsilon$ تکمیل شده و با اعمال عملگر متوسط گیری حجمی و زمانی به روش تجزیه ی مضاعف، این معادلات برای جریان سیال درون محیط متخلخل اصلاح شدند. در نهایت معادله ی پایستاری گونه برای کسر جرمی سوخت به کد اعمال شد که نرخ مصرف سوخت در آن از رابطه ی یک مرحله ای آرنیوس بدست آمد. همچنین برای تعیین صحت تغییرات اعمال شده در کد پس از هر مرحله نتایج صحت سنجی شدند. مقایسه ی نتایج تحقیق حاضر برای جریان غیرواکنشی با نتایج عددی سایر مراجع نشان دهنده ی مطابقت آن ها است. برای جریان واکنشی صحت سنجی نتایج در مرحله ی پیش گرمایش تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند اما به علت اینکه احتراق به صورت یک مرحله ای مدل شده است، نتایج ناحیه ی احتراق با نتایج آزمایشگاهی اختلاف دارد.

۶- مراجع

- [1] Avdic F., Application of the porous medium gas combustion technique to household heating systems with additional energy sources, Thesis, PhD Thesis, University of Erlangen-Nuremberg, 2004.
- [2] Mujeebu M. A., Abdullah M., Bakar M. A., Mohamad A., Abdullah M., Applications of porous media combustion technology—a review, *Applied Energy*, Vol. 86, No. 9, pp. 1365-1375, 2009.
- [3] Nimvari M., *Numerical Simulation of Reacting Flow Within Cylindrical Porous Burner*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, 2013. (In Persian)
- [4] Lage J., De Lemos M., Nield D., MODELING TURBULENCE IN, *Transport phenomena in porous media II*, pp. 198, 2002.
- [5] Travkin V., Catton I., A two-temperature model for turbulent flow and heat transfer in a porous layer, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 181-188, 1995.