



شبیه‌سازی احتراق درون مشعل متخلخل استوانه‌ای با در نظر گرفتن اثرات اغتشاش

مجید اسحق نیموری^۱، مهدی معرفت^{۲*}، مصطفی خسروی الحسینی^۳، نیما فلاح جویباری^۴

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار مهندسی مکانیک، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران

۴- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

چکیده- در مطالعه حاضر، اثرات اغتشاش موجود درون حفره‌های مشعل متخلخل بر روی جریان احتراقی مخلوط متان- هوا درون این مشعل‌ها بررسی شده است. مدل‌سازی جریان اغتشاشی با استفاده از یک مدل $k-\varepsilon$ که برای جریان درون محیط متخلخل اصلاح شده است انجام می‌شود. از مکانیزم GRI 3.0 برای احتراق متان- هوا و از روش جهت‌های مجزا برای در نظر گرفتن اثرات تشعشع در معادله انرژی جامد استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که دمای گاز به دست آمده از مدل اغتشاشی کمتر از مدل آرام بوده و به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. همچنین اثرات اغتشاش به واسطه افزایش پدیده نفوذ سبب افزایش ضخامت شعله می‌شود. اگرچه مقادیر حاصل برای آلایندہ CO از مدل‌های آرام و اغتشاشی تقریباً برابر است، اما اثرات اغتشاش سبب می‌شود که مقادیر پیش‌بینی شده برای سرعت شعله و آلایندہ NO به نتایج تجربی نزدیک‌تر شود.

کلیدواژگان: مشعل متخلخل، احتراق، اغتشاش، توزیع دما، سرعت سوزش.

Numerical simulation of combustion inside a cylindrical porous burner including turbulence effects

M. E. Nimvari¹, M. Maerefat^{2*}, M. K. El-Hossaini³, N. F. Jouybari⁴

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

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

3- Assist. Prof., Mech. Eng., Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran

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

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

Abstract- In the present study, the effect of intra-pore turbulence within porous burners has been investigated on combustion of methane/air mixture in such burners. A $k-\varepsilon$ model is adapted to the porous structure to models turbulence flow. The GRI 3.0 chemical reaction mechanism is utilized for the combustion of methane/air mixture and radiative part of the solid phase energy equation is obtained using the discrete ordinate method. The numerical results show that the gas temperature obtained from turbulence model stays below the corresponding laminar model temperature all over the combustion region, and the flame thickness becomes wider in turbulence model. Although the CO emission are insensitive to laminar or turbulence model, the burning speed and NO emission predictions are found to be significantly improved when the effects of turbulence are taken into account.

Keywords: Porous Burner, Combustion, Turbulence, Temperature Distribution, Burning Speed.

۱- مقدمه

بیشتر تحقیقات پیشین در زمینه مشعل‌های متخلخل، جریان درون محیط متخلخل را آرام فرض نموده‌اند. در حالی که بررسی‌های تجربی نشان می‌دهد که درون محیط متخلخل، گذار از رژیم آرام به معشوش در اعداد رینولدز حفره بسیار پایین اتفاق می‌افتد [۱-۳]. مسلماً پارامترهای مهمی مانند سرعت شعله، دماهای جامد و گاز، ضخامت شعله و غلظت گونه‌ها تحت تاثیر اغتشاش موجود درون حفره‌های مشعل متخلخل قرار می‌گیرد [۴].

اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی‌های عددی آرام و داده‌های تجربی برای سرعت شعله و میزان آلاینده‌ها توسط محققین مختلفی گزارش شده است [۵-۸]. این ناهمخوانی در نسبت هم‌ارزی نزدیک به یک که سرعت شعله در آن بالاتر است بیشتر مشهود است. این محققین یکی از دلایل این ناهمخوانی در نتایج را عدم در نظر گرفتن اثرات اغتشاش در مدل‌سازی عنوان کرده‌اند. شبیه‌سازی هکرت و همکاران [۹] در مقیاس حفره نشان می‌دهد که مستقل از روش حل در نظر گرفته شده برای محیط متخلخل (شبیه‌سازی مقیاس حفره و یا میانگین‌گیری حجمی)، انحراف از نتایج تجربی برای نسبت هم‌ارزی‌های بالا وجود دارد. برای از بین بردن این اختلاف و مدل‌سازی بهتر احتراق درون مشعل متخلخل پیشنهاد شده که در معادلات حاکم، اثر اغتشاش ناشی از شبکه جامد بر مکانیزم‌های انتقال حرارت و انتقال جرم لحاظ شود [۱۰، ۱۱].

در چند سال اخیر مدل‌های اغتشاشی مختلفی برای جریان درون محیط متخلخل معرفی شده‌اند [۱۲-۱۵]. این مدل‌ها از آنجا که برای جریان درون محیط متخلخل به کار می‌روند بایستی قادر باشند تا اثر شبکه جامد را بر تولید و یا استهلاك اغتشاش در نظر بگیرند [۱۲]. روش رایج بین تمامی مدل‌های موجود، استفاده از یک میانگین‌گیری زمانی برای در نظر گرفتن اثرات اغتشاش و همچنین استفاده از یک میانگین‌گیری مکانی برای در نظر گرفتن پیچیدگی هندسه محیط متخلخل می‌باشد. تفاوت مدل‌های موجود نه تنها تقدم در میانگین‌گیری‌های زمانی یا مکانی می‌باشد بلکه به تعاریف مختلف مقادیر ماکروسکوپیک اغتشاشی مانند انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ اتلاف آن نیز برمی‌گردد [۱۵].

تقریباً تمام مدل‌های توسعه داده شده برای مدل‌سازی

اغتشاش درون محیط متخلخل بر پایه مدل $k-\varepsilon$ می‌باشد که برای در نظر گرفتن اثرات شبکه جامد در تولید و استهلاك اغتشاش درون محیط متخلخل اصلاح شده‌اند. علاوه بر این، این مدل‌ها عموماً برای جریان‌های غیر واکنشی درون محیط متخلخل به کار رفته‌اند [۱۶].

اولین بار در سال ۲۰۰۹ دلموس [۱۷] اثر اغتشاش ناشی از شبکه جامد را بر احتراق متان درون محیط متخلخل مطالعه نمود. به واسطه هندسه یک‌بعدی استفاده شده در مرجع [۱۷] اثرات اغتشاش بر توزیع دما بسیار ناچیز می‌باشد. یاراحمدی و همکاران [۱۸] با استفاده از مدل اغتشاشی پداس و دلموس [۱۴] و مکانیزم احتراق تک‌مرحله‌ای، اثرات اغتشاش را بر احتراق متان درون مشعل متخلخل بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که اثرات اغتشاش سبب افزایش بازده تشعشعی مشعل می‌شود. همچنین، توزیع دمای مدل معشوش هم‌خوانی بهتری با نتایج تجربی نسبت به مدل آرام دارد.

با توجه به مطالعات گذشته، در تحقیق حاضر اثرات اغتشاش بر جریان احتراقی مخلوط متان - هوا درون مشعل متخلخل استوانه‌ای به صورت عددی بررسی شده است. معادلات انتقال به صورت میانگین‌گیری زمانی و مکانی بیان شده و مدل اغتشاشی پداس و دلموس [۱۳] برای در نظر گرفتن تولید اغتشاش ناشی از شبکه جامد استفاده شده است. در مطالعات پیشین که اثرات اغتشاش را درون مشعل متخلخل بررسی نموده‌اند، استفاده از هندسه یک‌بعدی [۱۷] و همچنین احتراق تک‌مرحله‌ای و مدل‌سازی ساده تشعشع [۱۸، ۱۷] سبب شده است تا امکان بررسی دقیق اثرات اغتشاش بر سرعت شعله و انتشار آلاینده‌ها میسر نباشد. از این‌رو در مطالعه حاضر از مکانیزم GRI 3.0 که شامل ۳۲۵ واکنش و ۵۳ گونه می‌باشد برای احتراق متان - هوا استفاده شده است. با توجه به عدم تعادل حرارتی در احتراق، معادلات انرژی جداگانه‌ای برای سیال و جامد حل شده است. تشعشع در معادله انرژی فاز جامد نیز توسط روش جهت‌های مجزا^۱ حل شده است. نتایج حاصل از مدل‌های اغتشاشی و آرام برای سرعت شعله، ضخامت شعله، توزیع دما و آلاینده‌های CO و NO در نسبت هم‌ارزی‌های متفاوت آورده شده و با نتایج تجربی موجود مقایسه شده‌اند.

جدول ۱ خواص محیط متخلخل استفاده شده در مدل‌سازی [۱۹]

لایه اول	لایه دوم	
جنس ماده	زیرکونیا	زیرکونیا
اندازه حفره (ppcm)	۲۵/۶	۳/۹
نسبت تخلخل	۰/۸۳۵	۰/۸۷
ضریب خاموشی (m^{-1})	۱۷۰۷	۳۷۶
ضریب هدایت ($Wm^{-1}K^{-1}$)	۰/۲	۰/۱
نسبت تفرق (آلبدو)	۰/۸	۰/۸
ضریب صدور	۱/۰	۱/۰
ضریب C در معادله (۱۲)	۰/۶۳۸	۰/۱۴۶
ضریب m در معادله (۱۲)	۰/۴۲	۰/۹۶
چگالی (kgm^{-3})	۵۱۰	۵۱۰
ظرفیت گرمایی ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	۸۲۴	۸۲۴

$$\nabla \cdot (\rho_f \bar{u}_D) = 0 \quad (۱)$$

$$\nabla \cdot \left(\rho_f \frac{\bar{u}_D \bar{u}_D}{\phi} \right) = -\nabla \cdot (\phi \langle \bar{P} \rangle^i) + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{u}_D) + \nabla \cdot (-\rho_f \phi \langle \bar{u}' u' \rangle^i) - \left[\frac{\mu \phi}{K} \bar{u}_D + \frac{c_f \phi \rho_f |\bar{u}_D| \bar{u}_D}{\sqrt{K}} \right] \quad (۲)$$

در معادله (۲)، $\rho_f \phi \langle \bar{u}' u' \rangle^i$ - تانسور تنش رینولدز ماکروسکوپیک بوده که به صورت معادله (۳) مدل‌سازی می‌شود.

$$-\rho_f \phi \langle \bar{u}' u' \rangle^i = \rho_f v_{t\phi} 2 \langle \bar{D} \rangle^v - \frac{2}{3} \phi \rho_f \langle k \rangle^i I \quad (۳)$$

که در آن:

$$\langle \bar{D} \rangle^v = \frac{1}{2} \left[\nabla (\phi \langle \bar{u} \rangle^i) + \left[\nabla (\phi \langle \bar{u} \rangle^i) \right]^T \right] \quad (۴)$$

ماتریس نرخ کرنش ماکروسکوپیک می‌باشد. $v_{t\phi}$ نیز لزجت گردابه‌ای ماکروسکوپیک بوده که برای محیط متخلخل در مدل معشوش پداس و دلموس [۱۴] همانند جریان در محیط آزاد مدل می‌شود.

$$v_{t\phi} = \mu_{t\phi} / \rho_f = \frac{c_\mu \langle k \rangle^{i2}}{\langle \varepsilon \rangle^i} \quad (۵)$$

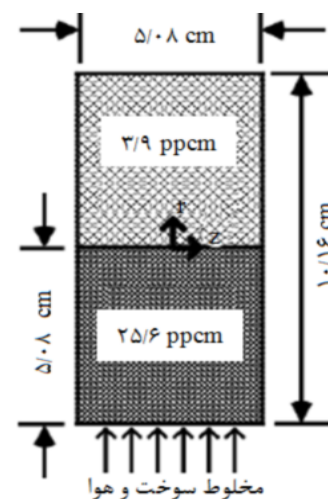
در معادله (۲)، K نفوذپذیری ماده متخلخل بوده که مقادیر آن در لایه اول و دوم مشعل به ترتیب برابر $1/34 \times 10^{-8}$ و $6/3 \times 10^{-7}$ مترمربع می‌باشد.

۲- هندسه مساله و معادلات حاکم

هندسه مشعل متخلخل دولایه‌ای مورد مطالعه به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. مشعل متخلخل غیر کاتالیزتی و شامل دو ناحیه می‌باشد: ناحیه پیش‌گرم با حفره‌های ریزتر از جنس زیرکونیا^۱ و ناحیه احتراق با حفره‌های بزرگتر از همان جنس. خصوصیات ماده متخلخل مذکور برابر مقادیر جدول ۱ در نظر گرفته شده است [۱۹]. مشعل مورد مطالعه استوانه‌ای شکل با قطر ۵/۰۸ سانتی‌متر بوده و طول هر لایه آن نیز ۵/۰۸ سانتی‌متر می‌باشد. این ابعاد به منظور مقایسه بهتر نتایج تحقیق حاضر، برابر با ابعاد مشعل مورد مطالعه توسط هسو و همکاران [۵] و شافین و همکاران [۲۰] انتخاب شده است. خصوصیات ترموفیزیکی مخلوط گازی تابعی از دما و غلظت گونه‌های واکنش بوده و توسط کد محاسباتی کمکین^۲ به دست می‌آید [۲۱].

۱-۲- معادله پیوستگی و مومنتم

پس از اعمال عملگرهای میانگین‌گیری زمانی و مکانی، جریان سیال درون مشعل متخلخل به وسیله معادله متوسط‌گیری شده دارسی - فورچیمر مدل‌سازی می‌شود. با در نظر گرفتن هندسه با تقارن محوری، سیال نیوتنی و جریان دائم، معادلات پیوستگی و مومنتم متوسط‌گیری شده به ترتیب به صورت معادلات (۱) و (۲) بیان می‌شوند [۲۲].



شکل ۱ شماتیک مشعل مورد مطالعه

1. Partially Stabilized Zirconia (PSZ)
2. CHEMKIN

استفاده از ضریب انتقال حرارت جابجایی مدل‌سازی می‌شود. ضریب انتقال حرارت جابجایی بین گاز و جامد با استفاده از رابطه تجربی یونیس و ویسکانتا [۲۳] از معادله (۱۲) به دست می‌آید که ثوابت آن (C و m) برای هر یک از لایه‌های مشعل در جدول ۱ آورده شده است

$$h_v = k_f Nu_v / d_p^2; \quad Nu_v = C Re_p^m \quad (12)$$

۲-۴- معادله انتقال تشعشع (RTE)

برای محاسبه شار حرارت تشعشعی، فازهای جامد و سیال به عنوان یک فاز همگن پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. ترم چشمه، ∇q_{rad} ، در معادله انرژی جامد (معادله (۹)) از معادله (۱۳) به دست می‌آید.

$$\nabla q_{\text{rad}} = k_a (4\pi I_b - \int_{4\pi} I d\Omega) \quad (13)$$

شدت تشعشع با حل معادله RTE (معادله (۱۴)) به دست می‌آید.

$$\frac{dI(\vec{r}, \hat{s})}{ds} = -(k_a(\vec{r}) + \sigma_s(\vec{r}))I(\vec{r}, \hat{s}) + S(\vec{r}, \hat{s}) \quad (14)$$

که در معادله (۱۴)، تابع چشمه، $S(\vec{r}, \hat{s})$ ، عبارتست از:

$$S(\vec{r}, \hat{s}) = k_a(\vec{r})I_b(\vec{r}) + \frac{\sigma_s(\vec{r})}{4\pi} \int_{4\pi} I(\vec{r}, \hat{s}') \Phi(\hat{s}', \hat{s}) d\Omega' \quad (15)$$

شدت تشعشع $I(\vec{r}, \hat{s})$ ، تابعی از مکان و جهت می‌باشد. ترم سمت چپ معادله (۱۴) گرادیان شدت تشعشع را در جهت خاص $\hat{s}$ نشان می‌دهد. ترم اول در سمت راست، اتلاف شدت تشعشع را بر اثر جذب و پراکندگی آن نشان می‌دهد. ترم چشمه در معادله (۱۵) بیانگر افزایش شدت تشعشع در اثر جذب و پراکندگی ورودی از جهات دیگر می‌باشد [۲۴].

۲-۵- معادله بقای گونه

انتقال گونه‌ها توسط معادله (۱۶) بیان می‌شود [۲۲].

$$\nabla \cdot \left(\rho_f \bar{u}_D \langle \bar{Y}_k \rangle^i \right) = \phi \nabla \cdot \left(\rho_f D_{\text{eff}} \cdot \nabla \langle \bar{Y}_k \rangle^i \right) + \phi W_k \langle \bar{\omega}_k \rangle^i \quad (16)$$

تانسور انتقال گونه مؤثر، D_{eff} ، برابر است با:

$$D_{\text{eff}} = \left[D_{kN} + \frac{\nu_t \phi}{Sc_t} \right] I \quad (17)$$

$\dot{\omega}_k$ نرخ مولی تولید گونه k ام در اثر احتراق می‌باشد. از آنجا

۲-۲- معادلات اغتشاشی درون محیط متخلخل

معادلات انتقال برای انرژی جنبشی اغتشاشی ماکروسکوپی و نرخ اتلاف آن توسط معادلات (۶) و (۷) بیان می‌شود [۲۲].

$$\nabla \cdot (\bar{u}_D \langle k \rangle^i) = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t \phi}{\sigma_k} \right) \nabla (\phi \langle k \rangle^i) \right] + P^i + \phi G_k^i - \phi \langle \varepsilon \rangle^i \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\bar{u}_D \langle \varepsilon \rangle^i) = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t \phi}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla (\phi \langle \varepsilon \rangle^i) \right] + (c_1 P^i - c_2 \phi \langle \varepsilon \rangle^i) \frac{\langle \varepsilon \rangle^i}{\langle k \rangle^i} + \phi G_\varepsilon^i \quad (7)$$

$P^i = -\langle \bar{u}' \bar{u}' \rangle^i : \nabla \bar{u}_D$ نرخ تولید انرژی جنبشی اغتشاشی

به واسطه گرادیان سرعت است. مدل جریان مغشوش برای محیط متخلخل دو ترم اضافی را به همراه دارد. $G_k^i = c_k c_2 \langle \varepsilon \rangle^i |\bar{u}_D| / \sqrt{K}$ و $G_\varepsilon^i = c_k \langle k \rangle^i |\bar{u}_D| / \sqrt{K}$ که به ترتیب بیانگر تولید انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ اتلاف آن به دلیل وجود شبکه جامد می‌باشد [۲۲].

۲-۳- معادلات انرژی سیال و جامد

با در نظر گرفتن حرارت آزاد شده به دلیل احتراق در معادله انرژی سیال و اثرات تشعشع در معادله انرژی ماتریس جامد، معادلات انرژی به صورت معادلات (۸) و (۹) خواهد بود [۲۲].

$$\left(\rho_f C_{pf} \bar{u}_D - \phi \sum_{k=1}^M \rho_f C_{pk} D_{kN} \nabla \langle \bar{Y}_k \rangle^i \right) \cdot \nabla \langle \bar{T}_f \rangle^i = \nabla \cdot \left[K_{\text{eff},f} \cdot \nabla \langle \bar{T}_f \rangle^i \right] + h_v \left(\langle \bar{T}_s \rangle^i - \langle \bar{T}_f \rangle^i \right) + \phi \sum_{k=1}^M h_k \langle \bar{\omega}_k \rangle^i \quad (8)$$

$$0 = \nabla \cdot \left[K_{\text{eff},s} \cdot \nabla \langle \bar{T}_s \rangle^i \right] - h_v \left(\langle \bar{T}_s \rangle^i - \langle \bar{T}_f \rangle^i \right) - \nabla q_{\text{rad}} \quad (9)$$

$K_{\text{eff},f}$ و $K_{\text{eff},s}$ به ترتیب تانسورهای ضریب هدایت

حرارتی مؤثر سیال و جامد بوده و عبارتند از:

$$K_{\text{eff},f} = \left[\phi k_f + \phi \rho_f C_{p,f} \frac{\nu_t \phi}{\sigma_T} \right] I \quad (10)$$

$$K_{\text{eff},s} = [(1 - \phi) k_s] I \quad (11)$$

در معادلات (۸) و (۹) حرارت مبادله شده بین دو فاز با

$$v = u = \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = \frac{\partial T_f}{\partial r} = \frac{\partial T_s}{\partial r} = \frac{\partial Y_k}{\partial r} = 0 \quad (23)$$

سطوح مشعل خاکستری، گسیل‌کننده تشعشع و همچنین منعکس‌کننده آن در نظر گرفته می‌شود. از این‌رو شرط مرزی برای معادله شدت تشعشع عبارت است از:

$$I(\vec{r}) = \varepsilon I_b(\vec{r}) + \frac{1-\varepsilon}{\pi} \int_{\hat{s} \cdot n < 0} I(\vec{r}, \hat{s}) |\hat{s} \cdot n| d\Omega \quad (24)$$

که در معادله (24)، n ، ε و Ω به ترتیب بردار نرمال واحد عمود بر سطح، ضریب صدور و زاویه فضایی می‌باشد.

معادلات بر مبنای روش حجم محدود و با استفاده از شبکه هم‌مکان [26] گسسته شده‌اند. گسسته‌سازی شارهای جابجایی با استفاده از روش هیبرید انجام شده است. از الگوریتم سیمپل [27] برای حل معادلات مومنتم و پیوستگی استفاده می‌شود. از توابع دیواره استاندارد برای محاسبه جریان در نزدیک دیواره برای جریان مغشوش استفاده شده است [26]. مقدار y^+ در تمامی نقاط نزدیک دیواره کوچک‌تر از 4 بوده که در محدوده قابل قبول برای تابع دیواره استاندارد است. معادله انرژی فاز جامد نیز توسط روش حجم محدود حل شده و شار تشعشعی با استفاده از روش جهت‌های مجزا (S_g) محاسبه می‌شود. دستگاه معادلات جبری توسط الگوریتم SIP [26] تا دقت هم‌گرایی 10^{-6} حل می‌شود. مراحل حل معادلات تا رسیدن به جواب مطلوب به صورت زیر می‌باشد:

۱- در مرحله اول معادلات در یک بعد (بعد z) به منظور به‌دست آوردن مقادیر تقریبی برای غلظت گونه‌ها و دمای سیال حل می‌شوند. این مقادیر به عنوان شرط اولیه برای حل دوبعدی استفاده می‌شود که این عمل زمان حل مسئله را به شدت کاهش می‌دهد.

۲- با استفاده از مقادیر اولیه دما و غلظت گونه‌ها (ذکر شده در مرحله ۱) خصوصیات ترموفیزیکی محاسبه می‌شوند.

۳- میدان جریان با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتم حل می‌شود.

۴- معادلات انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ اتلاف آن حل و مقادیر لزجت گردابه‌ای جدید محاسبه شده و ضرایب نفوذ در معادلات مختلف اصلاح می‌گردند.

۵- معادله انرژی فاز سیال و معادلات غلظت گونه‌ها حل می‌شوند.

۶- معادلات انرژی فاز جامد و معادلات تشعشع حل

که شعله در داخل حفره‌های کوچک مشعل متخلخل تشکیل می‌شود، چین و چروک شعله در این حالت ناچیز بوده و اثرات غالب اغتشاش تنها تقویت پدیده‌های نفوذ می‌باشد. بنابراین، $\dot{\omega}_k$ از رابطه آرنیوس برآورد می‌شود [18، 17، 5]. در تمامی معادلات، چگالی مخلوط گازی از رابطه گاز کامل محاسبه می‌شود.

$$\rho_f = \frac{P\bar{W}}{RT_f} \quad (18)$$

ثوابت استفاده شده در معادلات (5)، (6)، (7)، (10) و (17) در مدل $k-\varepsilon$ برای محیط متخلخل با ثوابت ارائه شده توسط جونز و لاندنر [25] برای جریان در محیط آزاد ($\phi=1$) و $K \rightarrow \infty$ یکسان می‌باشد. اما ثابت‌های c_k و c_F که در ارتباط با جریان مغشوش درون محیط متخلخل می‌باشند توسط دلموس [22] تعیین شده‌اند. مقادیر ثوابت عبارتند از:

$$\begin{aligned} c_\mu &= 0.09, c_1 = 1.44, c_2 = 1.92, \\ \sigma_k &= 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_T = 0.9, \\ Sc_t &= 0.7, c_F = 0.55, c_k = 0.28 \end{aligned} \quad (19)$$

۳- شرایط مرزی و روش حل عددی

شرط مرزی در ورودی:

$$\begin{aligned} u &= u_{in}, v = 0, T_f = T_{f,in} \\ k &= 3(u_{in} I)^2 / 2, \varepsilon = k^{3/2} \\ Y_k &= Y_{k,in} \quad k=1, 2, \dots, M \\ (1-\phi)k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} + \varepsilon_{in} \sigma (1-\phi)(T_s^4 - T_0^4) &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

که در معادله (20)، T_0 دمای محیط، I شدت اغتشاش در ورودی و ε ضریب صدور محیط متخلخل بوده و مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با 298 کلین، 0.5 درصد و 1 می‌باشد. شرط مرزی در خروجی:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial T_f}{\partial z} = \frac{\partial Y_k}{\partial z} &= 0 \\ (1-\phi)k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} + \varepsilon_{out} \sigma (1-\phi)(T_s^4 - T_0^4) &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

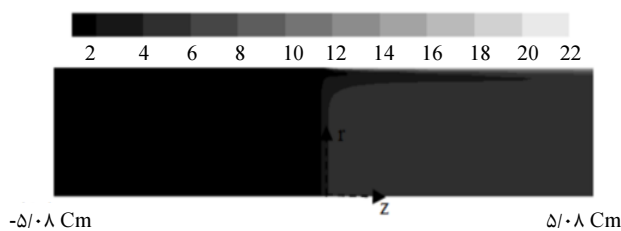
شرط مرزی در محور تقارن:

$$v = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = \frac{\partial T_f}{\partial r} = \frac{\partial T_s}{\partial r} = \frac{\partial Y_k}{\partial r} = 0 \quad (22)$$

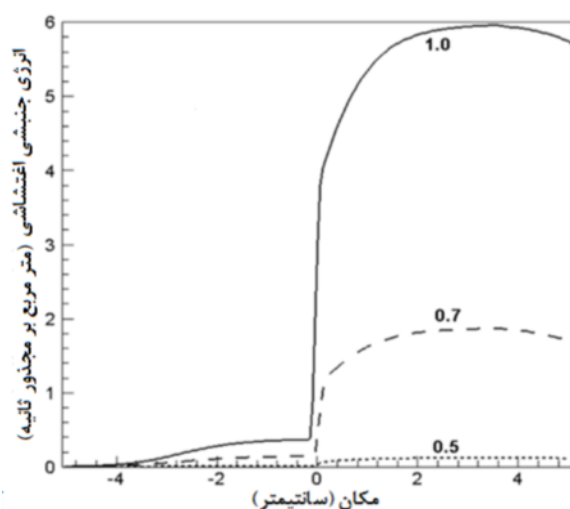
شرط مرزی در دیوار جانبی:

ناچیز باشد. بنابراین تولید انرژی جنبشی اغتشاشی عمدتاً در اثر G^1 می‌باشد که تولید انرژی جنبشی اغتشاشی را در اثر ماتریس متخلخل نشان می‌دهد. همان طور که در معادله انرژی جنبشی اغتشاشی بیان شده است (معادله (۶))، رابطه ارائه شده برای این ترم تولید به سرعت وابسته است. از سوی دیگر، انبساط حرارتی در احتراق سبب کاهش چگالی سیال شده که سرعت بالاتر سیال را پس از جبهه شعله در پی خواهد داشت که در نتیجه موجب افزایش تولید انرژی جنبشی اغتشاشی می‌شود. بنابراین، مقدار تولید انرژی جنبشی اغتشاشی در ناحیه پس از شعله افزایش می‌یابد. به علاوه، مقدار تولید انرژی جنبشی اغتشاشی در اثر افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره جامد افزایش یافته که منجر به توزیع دوبعدی نشان داده شده در شکل ۲ می‌شود.

شکل ۳ انرژی جنبشی اغتشاشی را در امتداد محور مشعل برای نسبت هم‌ارزی‌های متفاوت نشان می‌دهد.



شکل ۲ توزیع دوبعدی انرژی جنبشی اغتشاشی بر حسب مترمربع بر مجذورثابت درون مشعل متخلخل



شکل ۳ مقادیر انرژی جنبشی اغتشاشی برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

می‌شوند. با توجه به دمای جدید گاز و غلظت گونه‌های محاسبه شده از مرحله ۵ خواص ترموفیزیکی اصلاح می‌شود.

۷- محاسبات از مرحله ۳ تکرار شده تا تمامی معادلات هم‌گرا شوند.

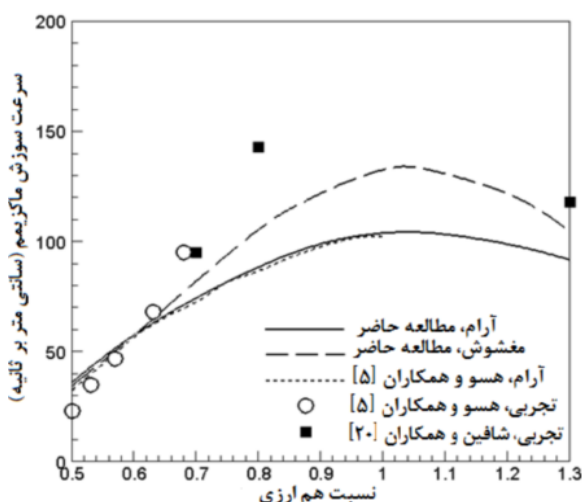
محاسبات بر روی یک شبکه با تعداد نقاط کم ۱۲ الی ۲۰ نقطه شروع می‌شود. پس از رسیدن به همگرایی تمامی معادلات، تغییرات تمامی پارامترها بین هر دو سلول مجاور شبکه محاسبه می‌شود. اگر تغییرات پارامترهای مختلف از حد مجاز شدیدتر باشد، ضرایب وزنی مختلف محاسبه شده و سلول‌های جدید به شبکه محاسباتی، در نقاطی که تغییرات شدید می‌باشد، اضافه خواهد شد. در ادامه میان‌یابی پارامترها در سلول‌های اضافه شده انجام می‌شود. با تکرار این روند شبکه محاسباتی به اندازه‌ای ریز می‌شود تا جواب مستقل از شبکه به دست آید. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برای دستیابی به جواب مستقل از شبکه، تعداد ۱۲ سلول در شبکه اولیه محاسباتی باید به ۲۵۰ تا ۳۰۰ سلول محاسباتی در راستای محور مشعل افزایش یابد [۲۱]. از آنجا که تغییرات در ناحیه شعله شدیدتر است اکثر نقاط شبکه محاسباتی در این ناحیه تمرکز می‌یابد.

۴- نتایج

استفاده از مشعل متخلخل دولایه با خصوصیات متفاوت اجازه می‌دهد تا شعله در محدوده وسیعی از سرعت‌های ورودی در هر نسبت هم‌ارزی پایدار شود [۱۹]. بنابراین برای هر نسبت هم‌ارزی یک سرعت کمینه و یک سرعت بیشینه وجود دارد که به ترتیب حدود خاموشی^۱ و بازگشت شعله^۲ را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر، نتایج حاصل از مدل‌سازی در سرعت بیشینه (حد خاموشی) با داده‌های تجربی مقایسه شده است.

شکل ۲ توزیع دوبعدی انرژی جنبشی اغتشاشی را برای احتراق مخلوط استوکیومتریک متان نشان می‌دهد. مقدار انرژی جنبشی اغتشاشی یک پرش ناگهانی در جبهه شعله دارد و سپس تا انتهای مشعل تقریباً ثابت باقی می‌ماند که در توافق با نتایج دلموس و پویم [۲۸] می‌باشد. توزیع سرعت یکنواخت درون محیط متخلخل سبب می‌شود که گرادیان سرعت و همچنین ترم تولید اغتشاش به واسطه گرادیان سرعت (P^i)

1. Blow Off
2. Flash Back



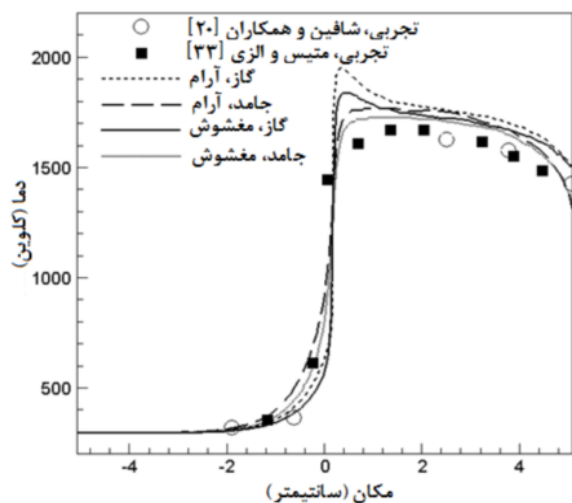
شکل ۴ نتایج سرعت سوزش ماکزیمم برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف و مقایسه با نتایج تجربی [۲۰، ۵] و عددی موجود [۵]

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، انحراف نتایج عددی از داده‌های تجربی با لحاظ کردن اثرات اغتشاش کاهش می‌یابد. اثرات اغتشاش سبب افزایش پدیده نفوذ در معادلات مومنتم، انرژی فاز سیال و بقای گونه‌ها می‌شود. تقویت ضریب نفوذ مؤثر در معادله انرژی فاز سیال منجر به افزایش پیش‌گرمایش مخلوط گازی [۲۹] و در نتیجه افزایش سرعت شعله خواهد شد. باقی‌مانده اختلاف بین نتایج عددی مدل اغتشاشی تحقیق حاضر و داده‌های تجربی را می‌توان به وجود حفره‌های بسته^۱ در محیط متخلخل واقعی ارتباط داد که مدل میانگین‌گیری حجمی برای محیط متخلخل قادر به پیش‌بینی آن نمی‌باشد. وجود حفره‌های بسته که در مراحل ساخت ماده متخلخل در آن ایجاد می‌شود سبب افزایش تولید اغتشاش در داخل ماده متخلخل شده و سرعت شعله را افزایش می‌دهد. مشاهدات تجربی وارتان و همکاران [۳۰] نشان می‌دهد که حد خاموشی به واسطه وجود حفره‌های بسته درون مشعل متخلخل افزایش می‌یابد.

نتایج مربوط به ضخامت شعله برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف در شکل ۵ آورده شده و با نتایج شعله آزاد و شعله مشعل متخلخل به‌دست آمده از مدل آرام [۳۱] مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود ضخامت شعله هم تحت تأثیر محیط متخلخل و هم اغتشاش قرار می‌گیرد. بلینت [۳۲] با بررسی تعاریف مختلف مربوط به ضخامت شعله نشان داد که

برای تمامی نسبت‌ها، انرژی جنبشی اغتشاشی در جبهه شعله افزایش یافته و سپس تقریباً ثابت باقی می‌ماند تا اینکه در انتهای مشعل کاهش اندکی را نشان می‌دهد. این کاهش در انتهای مشعل به دلیل کاهش دما در اثر تشعشع به محیط خنک پایین‌دست می‌باشد. بنابراین، به علت این کاهش دما، سرعت در انتهای مشعل کاهش یافته که منجر به روند کاهش انرژی جنبشی اغتشاشی در انتهای مشعل می‌شود. میزان انرژی جنبشی اغتشاشی به دلیل سرعت شعله کمتر در نسبت هم‌ارزی پایین ناچیز است (شکل ۳). برای نسبت هم‌ارزی ۰/۵، عدد رینولدز حفره برابر با ۶۰ می‌باشد و رژیم جریان آرام است [۱]. نمودار مربوط به این نسبت هم‌ارزی در شکل ۳ نیز مقدار ناچیزی از انرژی جنبشی اغتشاشی را نشان می‌دهد. بنابراین، برای جریان‌های با سرعت کم، حتی اگر مدل مغشوش برای آن در نظر گرفته شود میزان انرژی جنبشی اغتشاشی ناچیز باقی می‌ماند. برای نسبت هم‌ارزی برابر با یک، میزان عدد رینولدز حفره ۴ برابر بیشتر از نسبت هم‌ارزی ۰/۵ است. از این رو عدد رینولدز وارد محدوده‌ای می‌شود که رژیم جریان مغشوش می‌باشد [۲۸]. نمودار مربوطه به این نسبت هم‌ارزی در شکل ۳ نیز مقادیر قابل توجهی از انرژی جنبشی اغتشاشی را پیش‌بینی می‌کند.

بیشینه سرعت شعله (حد خاموشی) محاسبه شده از مدل‌های آرام و مغشوش بر حسب نسبت هم‌ارزی در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج حاصل از مطالعه حاضر با داده‌های تجربی موجود [۲۰، ۵] و همچنین با نتایج عددی آرام هسو و همکاران [۵] مقایسه شده است. اگرچه نتایج مدل آرام این تحقیق برای نسبت هم‌ارزی نزدیک به یک از نتایج تجربی فاصله دارد ولی تطابق خوبی را با نتایج عددی آرام هسو و همکاران [۵] نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است نتایج حاصل برای سرعت شعله در نسبت هم‌ارزی‌های پایین برای هر دو مدل آرام و مغشوش یکسان است. برای نسبت هم‌ارزی کوچک‌تر از ۰/۶۵، عدد رینولدز حفره کم و اثرات اغتشاش ناچیز است. افزایش نسبت هم‌ارزی منجر به افزایش سرعت شعله و در نتیجه افزایش عدد رینولدز حفره در داخل ماده متخلخل می‌شود. بنابراین، اثرات اغتشاش در نسبت هم‌ارزی بالای ۰/۶۵ غیر قابل چشم‌پوشی بوده و در نظر نگرفتن آن منجر به اختلاف نتایج عددی از داده‌های تجربی خواهد شد.



شکل ۶ نمودار دمای به دست آمده از مدل‌های آرام و مغشوش و مقایسه با نتایج تجربی [۳۳،۲۰]

اگرچه ماده متخلخل مورد استفاده توسط متیس و الزی [۳۳] با ماده متخلخل مورد استفاده در این مطالعه متفاوت است، اما نمودار دمای حاصل تطابق خوبی را با نتایج تجربی متیس و الزی [۳۳] نشان می‌دهد.

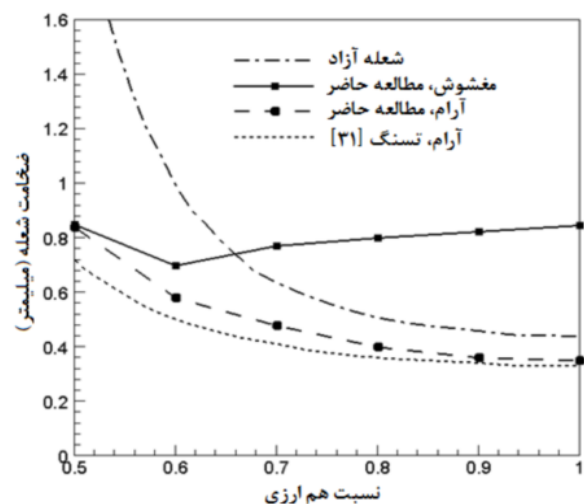
نمودار دمای گاز به دست آمده از مدل‌های آرام و مغشوش برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف در شکل ۷ مقایسه شده‌اند. وابستگی دمای بیشینه به نسبت هم‌ارزی در شکل ۷ کاملاً مشخص است. بالاترین دما برای نسبت هم‌ارزی استوکیومتریک می‌باشد. دمای گاز در ابتدای ناحیه پیش‌گرمایش تقریباً مستقل از نسبت هم‌ارزی است. برای نسبت هم‌ارزی‌های پایین، سرعت شعله کم و میزان انرژی جنبشی اغتشاشی ناچیز است. بنابراین، لزجت گردابه‌ای ماکروسکوپی که بیانگر اثرات اغتشاش در شبیه‌سازی عددی می‌باشد ناچیز بوده و تفاوتی بین دمای گاز در مدل‌های آرام و مغشوش دیده نمی‌شود. افزایش نسبت هم‌ارزی سبب افزایش سرعت سیال و افزایش لزجت گردابه‌ای ماکروسکوپی می‌شود. اثرات اغتشاش باعث افزایش ضریب هدایت مؤثر در سیال شده و افزایش پیش‌گرمایش و سرعت را در پی خواهد داشت. اگرچه تقویت ضریب هدایت مؤثر موجب افزایش پیش‌گرمایش می‌شود، سرعت ورودی بالاتر باعث افزایش اثر جابجایی مخلوط نسوخته سرد ورودی می‌شود [۲۹]. در نتیجه، دمای به دست آمده از مدل مغشوش به میزان اندکی در منطقه پیش‌گرمایش کمتر از مدل آرام می‌باشد. در ناحیه واکنش، هدایت حرارتی با حرارت آزاد شده در اثر احتراق به تعادل می‌رسد [۲۹]. از آنجا که اثرات

بواسطه این که تعریف ضخامت شعله بر مبنای گرادیان دما، اثرات انتقال حرارت و حرارت آزاد شده در واکنش شیمیایی را در خود دارد بهترین تعریف می‌باشد. بنابراین ضخامت شعله در این مطالعه از رابطه (۲۵) به دست می‌آید.

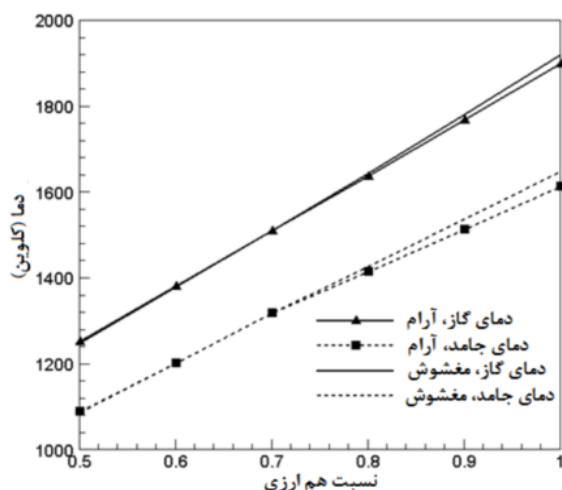
$$\delta_{\text{flame}} = \frac{T_{f,\text{max}} - T_{f,\text{in}}}{(dT_f/dx)_{\text{max}}} \quad (25)$$

نتایج حاصل از مدل آرام تطابق خوبی با نتایج آرام تسنگ [۳۱] نشان می‌دهد. با افزایش نسبت هم‌ارزی ضخامت شعله آرام در ماده متخلخل و شعله آزاد کاهش می‌یابد. در حالی که در مدل مغشوش ضخامت شعله با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد که این روند در توافقی با یافته‌های یاراحمدی و همکاران [۱۸] است. این ضخامت بیشتر در اثر نفوذ بیشتر در منطقه شعله به واسطه اثرات اغتشاش می‌باشد. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، ضخامت شعله در مدل مغشوش برای نسبت هم‌ارزی بالاتر از ۰/۷ به دلیل افزایش اثرات اغتشاش اندکی افزایش می‌یابد.

شکل ۶ مقایسه دمای به دست آمده از مدل‌های آرام و مغشوش را با نتایج تجربی شافین و همکاران [۲۰] و متیس و الزی [۳۳] در نسبت هم‌ارزی ۰/۷ نشان می‌دهد. استفاده از مدل مغشوش سبب کاهش در ماکزیمم دمای مشعل در مقایسه با نتایج مدل آرام شده و تطابق بهتری را با نتایج تجربی نشان می‌دهد.

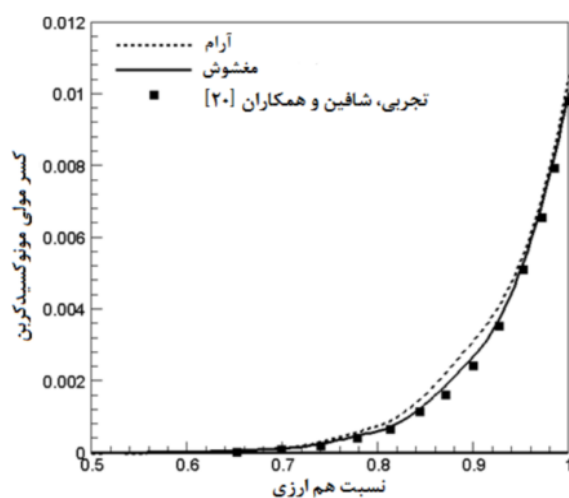


شکل ۵ ضخامت شعله حاصل از مدل‌های آرام و مغشوش برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف



شکل ۸ مقایسه دمای گاز و جامد به دست آمده از مدل‌های آرام و مغشوش در خروجی مشعل برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

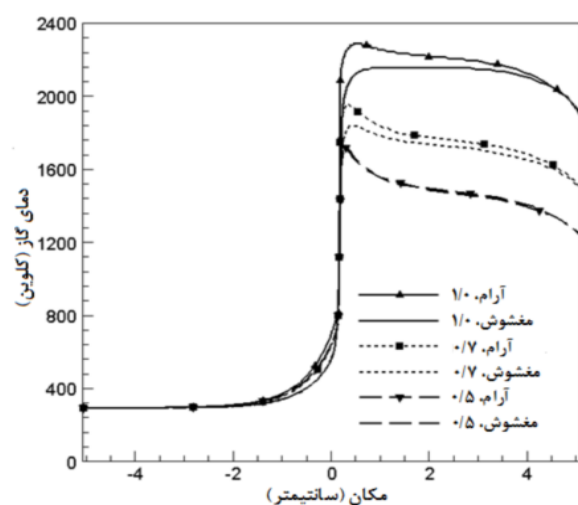
شکل ۹ مقادیر آلاینده CO پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی مطالعه حاضر و مقادیر اندازه‌گیری شده [۳۳] در خروجی مشعل متخلخل را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، میزان آلاینده CO در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر از ۰/۷۵، مستقل از آرام و یا مغشوش بودن مدل‌سازی می‌باشد. برای نسبت هم‌ارزی‌های بزرگتر از ۰/۷۵، اگر چه نتایج مدل آرام نیز تطابق خوبی با داده‌های تجربی نشان می‌دهد اما نتایج مدل مغشوش اندکی تطابق بهتری با داده‌های تجربی دارد. دمای پایین‌تر پیش‌بینی شده در مدل مغشوش سبب می‌شود تا میزان CO پیش‌بینی شده در این مدل به مقادیر تجربی نزدیک‌تر شود [۳۴].



شکل ۹ مقادیر CO در خروجی مشعل برای مدل‌سازی‌های آرام و مغشوش و مقایسه با نتایج تجربی برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

اغتشاش، هدایت حرارتی مؤثر را افزایش می‌دهد، حرارت آزاد شده ناشی از احتراق به سوی دو ناحیه پیش‌گرمایش و پس از شعله پراکنده می‌شود [۱۸]. بنابراین بیشینه دمای شعله در مدل مغشوش کمتر از مدل آرام می‌باشد. اختلاف دمای بیشینه بین جریان آرام و مغشوش در نسبت هم‌ارزی ۰/۷ و ۱ به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۱۴۰ کلوین خواهد بود. همچنین اختلاف بین نتایج پیش‌بینی شده برای دما از مدل‌های آرام و مغشوش با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش سرعت شعله به واسطه اثرات اغتشاش سبب کاهش زمان ماندگاری محصولات درون مشعل می‌شود. در نتیجه برخی از واکنش‌های بازگشتی احتراق در پایین‌دست شعله انجام می‌شود [۳۴] و مکان بیشینه دما به پایین‌دست مشعل منتقل می‌شود (شکل ۷). در انتهای مشعل، مستقل از مدل مغشوش و یا آرام، در اثر اتلاف حرارت تشعشعی از محیط جامد به پایین‌دست مشعل، کاهش دما مشاهده می‌شود.

در شکل ۸ دمای گاز و جامد خروجی در انتهای مشعل برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف و برای مدل‌های آرام و مغشوش با یکدیگر مقایسه شده است. اگر چه در تمام طول مشعل دمای گاز و جامد حاصل از مدل مغشوش کمتر از مدل آرام به دست می‌آید (شکل‌های ۶ و ۷)، به دلیل اثرات غالب تشعشع به محیط بیرون در انتهای مشعل، دمای گاز و جامد در خروجی مشعل مستقل از مدل آرام و مغشوش بوده و تقریباً با هم برابر است.



شکل ۷ مقایسه دمای به دست آمده از مدل‌های آرام و مغشوش در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

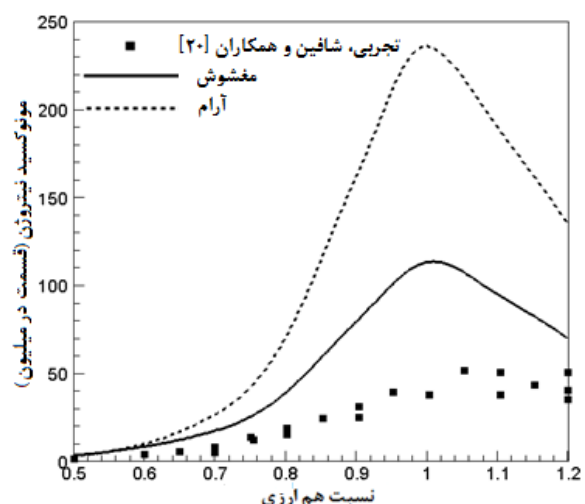
۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر شبیه‌سازی عددی احتراق درون مشعل متخلخل دولایه استوانه‌ای با در نظر گرفتن اثرات اغتشاش انجام شده است. جریان درون محیط متخلخل توسط معادله داری فورچیمر بیان شده و مدل مغشوش بر مبنای میانگین‌گیری حجمی برای در نظر گرفتن تولید اغتشاش به واسطه محیط متخلخل به کار رفته‌است. احتراق توسط مکانیزم GRI 3.0 مدل‌سازی شده و انتقال حرارت تشعشعی با استفاده از روش جهت‌های مجزا حل شده است. نتایج نشان می‌دهد که در اثر انبساط حرارتی در فرایند احتراق و در نتیجه افزایش سرعت در منطقه احتراق، توزیع انرژی جنبشی اغتشاشی پرش ناگهانی را در مکان شعله نشان می‌دهد. با افزایش نسبت هم‌ارزی، به واسطه افزایش سرعت انرژی جنبشی اغتشاشی نیز افزایش یافته و اغتشاش نقش مهم‌تری را در احتراق ایفا می‌کند. برای نسبت هم‌ارزی بزرگ‌تر از ۰/۶۵، به دلیل اثرات اغتشاش، سرعت شعله پیش‌بینی‌شده در مدل‌سازی مغشوش بیشتر از مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌سازی آرام بوده و تطابق بهتری را با داده‌های تجربی نشان می‌دهد. در نسبت هم‌ارزی کمتر از ۰/۶۵، سرعت شعله کمتر از حدی است که اثرات اغتشاش در آن مهم باشد و از این‌رو اختلافی بین نتایج مدل‌سازی‌های آرام و مغشوش مشاهده نمی‌شود. اغتشاش موجب افزایش ضخامت شعله و کاهش دمای بیشینه در داخل مشعل متخلخل می‌شود. به دلیل کاهش دمای بیشینه و همچنین زمان سکون کمتر محصولات به واسطه اثرات اغتشاش، مقادیر آلاینده NO کاهش یافته و به داده‌های تجربی نزدیک‌تر می‌شود. نتایج مطالعه حاضر آشکار می‌سازد که اغتشاش در مشعل متخلخل در نسبت هم‌ارزی‌های بالا پدیده بسیار اثرگذاری است و در نظر گرفتن آن منجر به خطای زیادی در نتایج مربوط به عملکرد حرارتی و مقادیر آلاینده مشعل متخلخل خواهد شد.

۶- فهرست علائم

C_F	ضریب فورچیمر
C_{μ}, C_1, C_2	ضرایب ثابت مدل مغشوش $k-\epsilon$
C_k	ضریب تولید اغتشاش در اثر شبکه جامد
C_{pf}	گرمای ویژه سیال ($Jkg^{-1}K^{-1}$)

در شکل ۱۰ مقادیر آلاینده NO در خروجی مشعل متخلخل از مدل‌های آرام و مغشوش با داده‌های تجربی [۳۳] مقایسه شده‌اند. میزان تولید NO به دمای بیشینه‌ای که در منطقه شعله اتفاق می‌افتد بستگی دارد [۳۵]. به‌علاوه، از آنجا که مکانیزم تولید NO فرایند آرامی است زمان سکون محصولات احتراقی درون مشعل متخلخل نیز پارامتر مهم دیگری است که بر مقادیر NO اثرگذار می‌باشد [۳۶]. استفاده از مدل مغشوش منجر به دمای پایین‌تری در مشعل متخلخل در مقایسه با مدل آرام می‌شود. همچنین سرعت شعله بالاتر به واسطه اثرات اغتشاش موجب می‌شود تا زمان سکون محصولات احتراقی درون مشعل کاهش یابد. به عنوان مثال، برای نسبت استوکیومتری، در مدل‌سازی مغشوش، بیشینه دما حدود ۱۴۰ کلوین (۶/۵ درصد) کمتر از مدل آرام و سرعت شعله در حدود ۲۹ سانتی‌متر بر ثانیه (۲۸ درصد) بیشتر از مدل آرام پیش‌بینی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، کاهش دمای بیشینه و زمان سکون محصولات احتراقی سبب می‌شود تا میزان NO به طرز چشمگیری در خروجی مشعل کاهش یابد. باقی‌مانده اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی مدل مغشوش و داده‌های تجربی را می‌توان به عدم قطعیت در خواص ترموفیزیکی محیط متخلخل [۵] و همچنین در نظر گرفتن اتلاف حرارت جانبی [۳۴، ۸] از دیواره‌های مشعل متخلخل نسبت داد.



شکل ۱۰ مقادیر NO در خروجی مشعل برای مدل‌سازی‌های آرام و مغشوش و مقایسه با نتایج تجربی برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

C_{pk}	گرمای ویژه گونه k ام ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	ε	نرخ اتلاف k (m^2s^{-3})
D	تانسور نرخ کرنش (s^{-1})	$\dot{\omega}_k$	نرخ مولی واکنش گونه k ام ($\text{kmolm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
D_{kN}	ضریب نفوذ دوتایی (m^2s^{-1})	σ_T	عدد پرانتل اغتشاشی برای انرژی سیال
d_p	قطر حفره (m)	σ_k	عدد پرانتل اغتشاشی برای k
h_v	ضریب جابجایی حجمی ($\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$)	σ_ε	عدد پرانتل اغتشاشی برای ε
h_k	انتالپی مولی گونه k ام (kJkmol^{-1})	σ_s	ضریب تفرق (m^{-1})
I	شدت اغتشاش ($u'/\bar{u}$)	Ω	زاویه فضایی (sr)
$I(\vec{r}, \hat{s})$	شدت تشعشع ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)	Φ	تابع فاز تفرق (sr^{-1})

۷- مراجع

- [1] 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 Fluid Engineering, Transaction of ASME*, Vol. 109, 1987, pp. 268-274.
- [2] Hall, M.J., Hiatt, J.P., "Exit Flows from Highly Porous Media", *Physics of Fluids*, Vol. 6, 1994, pp. 469-479.
- [3] Horton, N.A., Pokrajac, D., "Onset of Turbulence in a Regular Porous Medium: An Experimental Study", *Physics of Fluids*, Vol. 21, 2009, article No. 045104.
- [4] Lage, J.L., "The Fundamental Theory of Flow through Permeable Media from Darcy to Turbulence", *Transport Phenomena in Porous Media*, Ingham, D.B., Pop, I., (Eds.), Pergamon, 1998, pp. 11-30.
- [5] 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, 1993, pp. 149-172.
- [6] Malico, I., Zhou, X.Y., Pereira, J.C.F., "Two-dimensional Numerical Study of Combustion and Pollutants Formation in Porous Burners", *Combustion Science and Technology*, Vol. 152, 2000, pp. 57-72.
- [7] El-Hossaini, M.K., Maerefat, M., Mazaheri, K., "Numerical Modeling of Porous Radiant Burners Using Full and Reduced Kinetics Mechanisms", *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 27, 2008, pp. 53-63.
- [8] Maerefat, M., El-Hossaini, M.K., Mazaheri, K., "Numerical Modeling of Two-dimensional Cylindrical Porous Radiant Burners with Side Wall Heat Losses", *Journal of Porous Media*, Vol. 14, 2011, pp. 317-327.
- [9] Hackert, L.C., Ellzey, L.J., Ezekoye, A.O., "Combustion and Heat Transfer in Model Two-

K	نفوذپذیری (m^2)
k	ماتریس ضریب هدایت ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
k_a	ضریب جذب (m^{-1})
k	انرژی جنبشی اغتشاشی (m^2s^{-2})
k_f	ضریب هدایت سیال ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
k_s	ضریب هدایت جامد ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
Nu_v	عدد نوسلت حجمی ($h_v d_p^2 / k_f$)
P	فشار (Pa)
R	ثابت جهانی گازها ($\text{kJkmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)
Re_p	عدد رینولدز مبنای قطر حفره ($\rho_f u_D d_p / \mu$)
Sc_t	عدد اشمیت اغتشاشی
T_s	دمای جامد (K)
T_f	دمای سیال (K)
u	بردار سرعت (ms^{-1})
u_D	بردار سرعت داریسی (ms^{-1})
W_k	جرم مولی گونه k ام (kgkmol^{-1})
$\bar{W}$	جرم مولی متوسط مخلوط (kgkmol^{-1})
z, r	محورهای مختصات استوانه‌ای (m)
Y_k	کسر جرمی گونه k ام

علائم یونانی:

ϕ	نسبت تخلخل
ρ_f	چگالی سیال (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی سیال ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
$\mu_{t\phi}$	لزجت اغتشاشی ماکروسکوپی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ν	لزجت سینماتیکی سیال (m^2s^{-1})
$\nu_{t\phi}$	لزجت سینماتیکی اغتشاشی (m^2s^{-1})

- Laboratories, 1993.
- [22] De Lemos, M.J.S., *Turbulence in Porous Media: Modeling and Applications*, First Ed., Kidlington, Elsevier, 2006.
- [23] 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.
- [24] Modest, M.F., *Radiative Heat Transfer*, Second Ed., New Jersey, McGraw-Hill, 2003.
- [25] Jones, W.P., Launder, B.E., "The Prediction of Laminarization with Two-equation Model of Turbulence", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, 1972, pp. 301-314.
- [26] Peric, M., Ferziger, J.H., *Computational Method for Fluid Dynamics*, New York, Springer, 1990.
- [27] Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York, Hemisphere, 1980.
- [28] De Lemos, M.J.S., Pevim, A.C., "Turbulent Flow with Combustion in a Moving Bed", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, 2012, pp. 1-7.
- [29] Diamantis, D.J., Mastorakos, E., Goussis, D.A., "Simulations of Premixed Combustion in Porous Media", *Combustion Theory and Modeling*, Vol. 6, 2002, pp. 383-411.
- [30] 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", *Experimental in Fluids*, Vol. 38, 2005, pp. 701-707.
- [31] Tseng, C., "Effects of Hydrogen Addition on Methane Combustion in a Porous Medium Burner", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 27, 2002, pp. 699-707.
- [32] Blint, R.J., "The Relationship of the Laminar Flame Width to Flame Speed", *Combustion Science and Technology*, Vol. 49, 1986, pp. 79-92.
- [33] Mathis, W.M., Ellzey, J.L., "Flame Stabilization, Operating Range, and Emissions for a Methane/Air Porous Burner", *Combustion Science and Technology*, Vol. 175, 2003, pp. 825-839.
- [34] Brenner, G., Pickenacker, K., Pickenacker, O., Trimis, D., Wawrzinek, K., Weber, T., "Numerical and Experimental Investigation of Matrix-Stabilized Methane/Air Combustion in Porous Inert Media", *Combustion and Flame*, Vol. 123, 2000, pp. 201-213.
- [35] Williams, A., Woolley, R., Lawes, M.F., "Formation of NO_x in Surface Burner", *Combustion and Flame*, Vol. 89, 1992, pp. 157-166.
- [36] Afsharvahid, S., Ashman, P.J., Dally, B.B., "Investigation of NO Conversion Characteristics in a Porous Medium", *Combustion and Flame*, Vol. 152, 2008, pp. 604-615.
- dimensional Porous Burners", *Combustion and Flame*, Vol. 116, 1999, pp. 177-191.
- [10] Howell, J.R., Hall, M.J., Ellzey, J.L., "Combustion of Hydrocarbon Fuels within Porous Inert Media", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 22, 1996, pp. 121-145.
- [11] Kamal, M.M., Mohamad, A.A., "Combustion in Porous Media", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 220, 2006, pp. 487-508.
- [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 Fluids 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 I: Constitutive Equation and Model Closure", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, 2009, pp. 4264-4272.
- [16] Nimvari, M.E., Maerefat, M., El-Hossaini, M.K., "Numerical Simulation of Turbulent Flow and Heat Transfer in a Channel Partially Filled with a Porous Media", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 60, 2012, pp. 131-141.
- [17] De Lemos, M.J.S., "Numerical Simulation of Turbulent Combustion in Porous Materials", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, 2009, pp. 996-1001.
- [18] Yarahmadi, A., Nobari, M.R.H., Hosseini, R., "A Numerical Investigation of Laminar and Turbulent Premixed Flames in Porous Media", *Combustion Science and Technology*, Vol. 183, 2011, pp. 1164-1183.
- [19] Barra, A.J., Diepvens, G., Ellzey, J.L., Henneke, M.R., "Numerical Study of the Effects of Material Properties on Flame Stabilization in a Porous Burner", *Combustion and Flame*, Vol. 134, 2003, pp. 369-379.
- [20] Chaffin, C., Koenig, M., Koeroghlian, M., Matthews, R., Hall, M., Nichols, S., Lim, I., "Experimental Investigation of Premixed Combustion within Highly Porous Media", *Proceeding of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Vol. 4, 1991, p. 219.
- [21] Kee, R.J., Rupley, F.M., Miller, J.A., "CHEMKIN-II: A FORTRAN Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics", Report No. SAND89-8009B, Sandia National