



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

سال چهل و پنج، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۲، صفحه ۵۱ تا ۶۱
Vol. 45, No.1, Summer 2013, pp. 51-61



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)

Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)
(AJSR - ME)

اثرات استفاده از معادلات تغییر تخلخل در عملکرد و تولید مواد آلاینده در مشعل‌های محیط متخلخل

ایمان محمدی^۱، سیامک حسین پور^{۲*}

۱ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی سهند تبریز
۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(دریافت ۱۳۹۱/۶/۶، پذیرش ۹۲/۲/۹)

چکیده

در این مقاله نتایج حاصل از مدل‌سازی دو بعدی و متقارن محور احتراق پیش آمیخته‌ی متان- هوا با سینتیک چند مرحله‌ای در داخل محیط متخلخل با تغییر تخلخل ارائه شده است که در آن برای مشخص نمودن خصوصیات ترموفیزیکی و ترموشیمیایی از برنامه کمکین^۲ و اطلاعات پایه آن استفاده شده است. معادلات پیوستگی، ناویر استوکس، معادلات انتقال حرارت فاز گاز و جامد و معادلات حاکم بر گونه‌های شیمیایی با استفاده از روش حجم محدود حل شده و برای ارتباط بین سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل^۳ استفاده شده است. در این مقاله سعی بر آنست تا با اعمال پروفیل‌های تغییر تخلخل مختلف به جای تخلخل ثابت دو ناحیه‌ای، اثرات تغییر تخلخل در طول مشعل را مورد بررسی قرار دهیم. نتایج نشان می‌دهند که با اعمال تخلخل متغیر در طول مشعل می‌توان میزان دمای بیشینه را حدود ۴/۵٪ کاهش داد و به تبع آن میزان آلاینده‌های خروجی نظیر اکسیدهای نیتروژن^۳ نیز کاهش می‌یابد. در حالی که افت فشار در طول مشعل به میزان بسیار ناچیزی افزایش می‌یابد. همچنین اثرات سرعت ورودی و دمای دیواره بر روی مشعل‌های محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد با افزایش سرعت ورودی بیشینه دمای گاز کاهش پیدا می‌کند و به تبع آن میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن کاهش می‌یابد همچنین با افزایش دمای دیواره، بیشینه دما افزایش پیدا می‌کند و این امر سبب افزایش اکسیدهای نیتروژن می‌گردد.

کلمات کلیدی

محیط متخلخل، احتراق متقارن محور، سینتیک شیمیایی، انتقال حرارت، روش حجم محدود

* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email:hossainpour@sut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه به دلیل افزایش تقاضا و رو به اتمام بودن منابع سوخت‌های فسیلی و از سوی دیگر ایجاد آلاینده‌های خطرناکی مانند اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد^۱، کربن مونواکسید^۲ و کربن دی‌اکسید^۳ نیاز به بهبود عملکرد سامانه‌های احتراقی موجود و همچنین کاهش آلودگی‌ها احساس می‌شود. قوانین سخت‌گیرانه‌ای که امروزه برای کاهش اکسیدهای نیتروژن و دیگر آلاینده‌ها وضع می‌شود موجب شده که تحقیقات بیشتری در زمینه‌ی کاهش آلاینده‌های حاصل از احتراق در مشعل‌ها و افزایش راندمان آنها صورت پذیرد. در همین زمینه موضوع به نسبت جدیدی که در طی سه دهه‌ی اخیر مورد توجه بسیاری از دانشمندان فن قرار گرفته است، استفاده از مواد متخلخل در سامانه‌های احتراقی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به مشعل‌ها اشاره نمود. احتراق در محیط متخلخل نسبت به سامانه‌های احتراقی پیشین مزایای زیادی دارد که از آن میان می‌توان به مواد زیر اشاره نمود:

۱- نزدیک شدن به احتراق کامل و کاهش مونواکسیدکربن و مخلوط نسوخته در محصولات احتراق بواسطه‌ی عبور مخلوط سوخت و هوا از داخل خلل و فرج محیط متخلخل.

۲- کاهش دمای ماکزیمم در محفظه‌ی احتراق و کاهش تشکیل اکسیدهای نیتروژن و آلاینده‌های دیگر بواسطه‌ی خروج قسمتی از انرژی احتراق بصورت تابش و انتقال انرژی حرارتی از محصولات احتراق به محیط متخلخل.

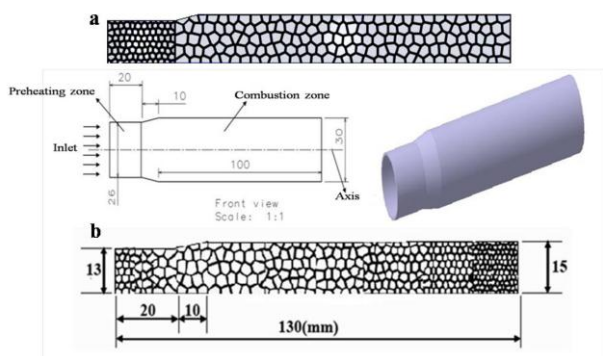
۳- افزایش راندمان فرآیند احتراق (راندمان احتراق بیانگر نسبت انرژی گرمایی تولید شده به سوخت مصرف شده می‌باشد) بواسطه‌ی پیش گرم شدن مخلوط ورودی سوخت و هوا قبل از رسیدن به محفظه‌ی احتراق.

۴- افزایش راندمان حرارتی سیستم (راندمان حرارتی در مشعل بیانگر نسبت انرژی گرمایی جذب شده توسط محیط به مقدار انرژی سوخت مصرفی آن می‌باشد) بواسطه‌ی صدور انرژی حرارتی تابشی آزاد شده در فرآیند احتراق به ناحیه‌ی پیش گرمایش.

این مزایا و بسیاری دیگر از قبیل، گستره تنظیم توان بالا، ۱ تا ۳۰ برابر بودن سرعت شعله، طراحی آزاد و راحت و کوچکتر شدن ابعاد آن سبب شده است که از آن در کاربردهای متنوعی از جمله، سیستم گرمایش خانگی، سیستم گرمایش هوا (خشک‌کن‌ها)، گرمایش اتاق خودرو، موتورهای احتراق داخلی، دستگاه‌های مولد بخار، کاربردهای شیمیایی، استفاده در محفظه‌ی احتراقی توربین گازی، احتراق سوخته‌های با ارزش حرارتی پایین و بسیاری دیگر از کاربردها استفاده شود.

توسعه و بهینه‌سازی مشعل‌های محیط متخلخل مستلزم شبیه‌سازی‌های تجربی و عددی خواهد بود. از آنجا که تحقیقات آزمایشگاهی مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد است، استفاده از شبیه‌سازی عددی برای بررسی عملکرد و تأثیر متغیرهای مختلف بر روی توزیع دما و نحوه تولید آلاینده‌ها، ضروری به نظر می‌رسد.

تاریخچه‌ی استفاده از مواد متخلخل در ساختمان دستگاه‌های با درجه حرارت بالا به سال ۱۹۸۲ بر می‌گردد که در آن اچیگو^۴ [۲]، بازیافت انرژی از گازهای خروجی دستگاه‌های با دمای بالا را مدنظر قرار داد. او دریافت که با این کار می‌توان قسمت بیشتری از انرژی حرارتی گاز را از راه جابه‌جایی به محیط متخلخل منتقل نمود و همچنین با افزایش درجه حرارت گاز ورودی کارایی لایه محیط متخلخل در امر بازیافت بیشتر می‌شود. پس از آن در سال ۱۹۸۴ ونگ^۵ و تین^۶ [۳]، مطالعاتی را در همین زمینه با استفاده از روش دو شار حرارتی برای معادلات انتقال حرارت تابشی و با در نظر گرفتن پخش انرژی تابشی توسط محیط متخلخل انجام دادند و دریافتند که پخش انرژی تابشی توسط لایه‌ی متخلخل سبب می‌شود که میزان انرژی جذب شده توسط محیط متخلخل از راه جابه‌جایی کمتر شده و باعث کاهش راندمان لایه محیط متخلخل در امر بازیافت می‌شود. در سال ۱۹۹۸ جی سی اف پیرا^۷ و ایکس وای زو^۸ [۴]، احتراق گاز متان را با استفاده از چهار مدل احتراقی، سامانه کامل^۹، که شامل ۴۹ گونه و ۲۲۷ واکنش شیمیایی، اسکلتال^{۱۰}، که شامل ۷۳ واکنش شیمیایی، سامانه کاهش یافته چهار گامی^{۱۱}، که شامل ۹ گونه و ۴ واکنش شیمیایی و سامانه تک گامی^{۱۲} که شامل ۴ گونه و ۱ واکنش کلی است بررسی نمودند و دریافتند که سامانه کاهش یافته چهار گامی بیشترین برابری را با سامانه کامل خواهد داشت. مالیکو^{۱۳} و همکاران [۵] در سال ۱۹۹۹ از تحلیل عددی دو بعدی برای بررسی احتراق و انتشار آلاینده‌ها در محیط متخلخل، بررسی اثرات نسبت هوای اضافی، ضریب هدایت حرارتی، ضریب انتقال حرارت همرفت و خواص تابشی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با در نظر نگرفتن اثرات جذب، جبهه‌ی شعله به سمت پایین دست جریان حرکت نموده، ماکزیمم دما افزایش یافته و در نتیجه انتشار آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. چانگ جن^{۱۴} در سال ۲۰۰۲ [۶] از یک مدل عددی یک بعدی برای بررسی اثرات افزودن هیدروژن بر روی احتراق متان در یک کوره متخلخل استفاده نمود. نتایج نشان داد که با افزودن هیدروژن به سوخت، سرعت شعله و انتشار کربن مونواکسید افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۰۷ لاری^{۱۵} [۷]، به تحلیل حرارتی مشعل‌های متخلخل در حالت گذرا با استفاده از مدل دو شار حرارتی



شکل (۱) شماتیکی از مشعل محیط متخلخل مورد بررسی در

دو حالت تخلخل ثابت دو ناحیه‌ای و تخلخل متغیر پیوسته

مخلوط سوخت و هوا ابتدا وارد ناحیه‌ی پیش‌گرمایش^{۱۱} می‌شود چون دمای مواد جامد بالاتر از دمای گاز است، گازهای پیش مخلوط در حین عبور از خلل و فرج این ناحیه بواسطه‌ی انتقال حرارت جابه‌جایی، پیش‌گرم شده و به دمای اشتعال نزدیک می‌شوند در این هنگام مخلوط وارد ناحیه‌ی احتراقی شده و به دمای احتراق می‌رسد و واکنش شیمیایی اتفاق می‌افتد. با انجام واکنش شیمیایی، آنتالپی احتراق آزاد می‌شود، قسمتی از گرمای واکنش بوسیله‌ی انتقال حرارت تابشی و هدایت حرارتی از راه مواد جامد به ناحیه‌ی ورودی پیش‌گرمایش منتقل می‌شود و مابقی گرمای واکنش از طریق مواد جامد و گازهای محصولات احتراق بواسطه‌ی انتقال حرارت هدایت، تابش و جابه‌جایی به پایین دست جریان واگذار می‌شود [۱۲].

۳- فرضیات بکار رفته در حل مسئله

۱- جریان سیال دائم، آرام و نیوتنی است.

۲- با وجود تغییر تخلخل، برای محاسبه‌ی افت فشار و بقیه پارامترها در ماتریس متخلخل همچنان معادله‌ی داری و فورهایم برقرار است.

۳- اثر ویسکوزیته و نیروی حجمی ناچیز است.

۴- از اثرات سرعت بخشی ماده‌ی متخلخل در دمای بالا صرف نظر شده است.

۵- از اثرات انتقال حرارت تابشی صرف نظر شده است.

دو معادله جداگانه برای فاز جامد و گاز حل شده است که این دو معادله به وسیله ضریب انتقال حرارت همرفت، که دلالت بر انتقال حرارت همرفت بین دو فاز دارد، به هم مرتبط می‌شوند [۱۳].

۴- معادلات حاکم

با توجه به فرضیات مسئله معادلات حاکم عبارتند از:

پرداخت و اثر عوامل مختلف بر عملکرد سامانه را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که مشعل‌های با ضخامت نوری بیش‌تر، دارای قله دمایی پایین‌تر می‌باشند. همچنین تابش خروجی از مشعل افزایش پیدا نموده و به تبع آن بازده مشعل افزایش می‌یابد. حسین پور و حدادی [۸] در سال ۲۰۰۸ اثرات عوامل کوره متخلخل را بر روی احتراق و تشکیل آلاینده‌ها با استفاده از یک طرح یک بعدی و سینتیک چند مرحله‌ای مورد بررسی قراردادند. نتایج نشان داد که با کاهش ضریب انتقال حرارت حجمی، اختلاف دمایی، بین گاز و جامد کاهش می‌یابد و همچنین با کاهش تخلخل، سرعت افزایش می‌یابد. بعد از آن در سال ۲۰۰۹ حسین پور و معلمی [۱] به بررسی اثرات استفاده از چند سینتیک شیمیایی چند مرحله‌ای متفاوت بر روی نمودارهای دما، جزء جرمی گونه‌ها و انتشار آلودگی‌ها پرداختند و دریافته‌اند که نتایج حاصل از سینتیک‌های مختلف با یکدیگر برابری دارند. در همین سال مائو^{۱۹} و همکاران [۹] به بررسی اثرات جنس ماده متخلخل پرداختند و دریافته‌اند که ساختار ماده متخلخل تاثیر بسزایی در عملکرد مشعل خواهد داشت و برای ناحیه احتراقی بهتر است از ماده‌ای با تخلخل بالا استفاده گردد. در سال ۲۰۱۰ بیدی و نوبری [۱۰] به بررسی پایداری شعله با استفاده از روش مینیمم کردن انتروپی تولیدی ۲۰ پرداختند و دریافته‌اند که زمانی که شعله در بالادست جریان اتفاق می‌افتد، پایداری آن است. آنها همچنین اثرات نسبت هم‌ارزی و تخلخل را مورد بررسی قرار دادند و دریافته‌اند که با افزایش نسبت هم‌ارزی بازگشت ناپذیری‌ها افزایش می‌یابد.

در کار حاضر سعی بر آن است تا تأثیر تغییر تخلخل را بر عملکرد مشعل‌های محیط متخلخل مورد بررسی قرار دهیم که برای این کار برنامه‌ای به زبان فرترن برای حالت دو بعدی و متقارن محور و مکانیزم‌های چند مرحله‌ای ایجاد شده است. امروزه با پیشرفت علم و فناوری در عرصه‌ی ساخت مواد متخلخل، امکان تولید موادی با تخلخل متغیر دور از دسترس نخواهد بود [۱۱]. استفاده از تخلخل متغیر امکان تنظیم دمای ماکزیمم شعله را فراهم می‌آورد که به تبع آن می‌توان تولید مواد آلاینده را نیز کاهش داد. در این مقاله نتایج اعمال مدل‌سازی عددی با تخلخل متغیر در چند حالت مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین اثرات پارامترهای مختلفی را بر روی عملکرد مشعل مورد مطالعه قرار داده‌ایم.

۲- مشعل مورد مطالعه

در شکل (۱) یک مشعل با تخلخل متغیر نشان داده شده است. در نمونه نشان داده شده تخلخل از ابتدای مشعل ابتدا افزایش و دوباره به سمت انتهای آن کاهش می‌یابد.

۵- معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot (\rho V_s) = 0 \quad (1)$$

۵-۱- معادلات مومنتم

$$\nabla \cdot (\rho u V_s) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_x \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho v V_s) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} - \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_y \quad (3)$$

در این معادلات جمله مربوط به افت فشار بصورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_i = \frac{\mu}{K_1} V_s + \frac{\mu}{K_2} V_s |V_s| \quad (4)$$

که در آن K_1 و K_2 به ترتیب تانسورهای نفوذپذیری برای جریان آرام و درهم می‌باشند و V_s بیانگر سرعت ظاهری^{۲۲} است که در محیط متخلخل بصورت زیر تعریف می‌شود

$$V_s = \varepsilon V \quad (5)$$

که ε بیانگر تخلخل ماده‌ی متخلخل می‌باشد.

۵-۲- معادله انرژی فاز گاز

$$\nabla \cdot (\rho V_s C_p T_f) = \nabla \cdot (\varepsilon \lambda_f \nabla T_f) + H(T_s - T_f) - \sum_{k=1}^{N_s} \dot{\omega}_k h_k \quad (6)$$

که H ضریب انتقال گرمای حجمی، T_s دمای ماده متخلخل، T_f دمای مخلوط گاز، C_p ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط گاز، ρ و λ_f به ترتیب ضریب هدایت گرمایی و چگالی مخلوط گاز هستند.

۵-۳- معادله انرژی فاز جامد

$$\nabla \cdot ((1-\varepsilon)\lambda_{eff} \nabla T_s) + H(T_f - T_s) = 0 \quad (7)$$

که ضریب انتقال گرمای هدایت موثر (λ_{eff}) بصورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$\lambda_{eff_i} = \lambda_{eff}^0 + \frac{\dot{m}}{A} \cdot \frac{C_p \cdot d}{K_i} \quad (8)$$

که در آن λ_{eff}^0 ، انتقال گرمای هدایتی بدون وجود جریان و قسمت دوم مربوط به اثرات نفوذ همرفت می‌باشد که در آن $\frac{\dot{m}}{A}$ ، شار جرمی بر واحد سطح، C_p ، ظرفیت گرمایی ویژه، d ، قطر مشخصه و $(K_1$ و $K_2)$ ، ضرایب پخش گرمایی مدل می‌باشند [۱۴، ۱۵].

۵-۴- معادله بقای گونه‌های شیمیایی

$$\nabla \cdot (\rho V_s Y_k) = \nabla \cdot (\rho \mathcal{D}_{km} \nabla Y_k) + \dot{\omega}_k, K \in [1, N_s] \quad (9)$$

که در آن N_s ، تعداد گونه‌های شیمیایی و D ، ضریب نفوذ جرم مخلوط گازی است.

ویژگی‌های ترموشیمیایی و ترموفیزیکی برای مخلوطی با N_s گونه توسط زیر برنامه‌ی ترن‌فیت^{۲۳} و اطلاعات ترمودینامیکی پایه کمکین^{۲۴} بدست می‌آید. نرخ تولید و یا از بین رفتن گونه‌ها به دلیل واکنش‌های شیمیایی به عنوان ترم چشمه و چاه در معادلات انرژی گاز و انتقال گونه‌های شیمیایی وارد می‌شود:

$$\dot{\omega}_k = M_k \sum_{l=1}^{N_R} (v_{kl}''' - v_{kl}') K_l \left(\prod_{reactant} C^{v_{kl}'} - \frac{1}{K_c} \prod_{product} C^{v_{kl}''} \right) \quad (10)$$

که N_R ، تعداد واکنش‌های شیمیایی، M_k ، وزن مولکولی، K_c ، ثابت تعادل شیمیایی، v_{kl}' و v_{kl}'' ضرایب استوکیومتریکی گونه‌های شیمیایی است که ضرایب استوکیومتریکی از راه یک روش واکنشی به صورت معادله (۱۱) به هم مرتبط می‌شوند.

$$\sum_{k=1}^{N_s} v_{kl}' A_k \leftrightarrow \sum_{k=1}^{N_s} v_{kl}'' A_k \quad (11)$$

ثابت ویژه سرعت واکنش K_l ، از رابطه‌ی آرنیوس بدست می‌آید [۱۶].

$$K_l = K_l^0 T^{\beta_l} \exp\left(-\frac{E_l}{RT}\right) \quad (12)$$

K_l^0 ، عامل فرکانس برخورد^{۲۵}، β_l ، توان دما و E_l ، انرژی فعال‌سازی برای هر واکنش می‌باشد که در سامانه احتراقی مناسب تعیین شده است.

۵-۵- معادله تغییر تخلخل

برای مشعل با تخلخل متغیر توابع ۱۳ و ۱۴ استفاده شده است که در آن X نشان‌دهنده‌ی طول مشعل می‌باشد.

$$\begin{aligned} 0.05X + 0.6 & \quad 0 \leq X \leq 2 \\ 0.15X + 0.4 & \quad 2 < X \leq 3 \\ -0.015X + 0.895 & \quad 3 < X \leq 13 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial T_g}{\partial x} = \frac{\partial Y_i}{\partial x} = 0, \quad (16)$$

$$(1-\varepsilon)\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = -\varepsilon_r \sigma (T_s^4 - T_o^4)$$

۳-۶- شرط مرزی دیوار

بر روی دیوار شرط عدم لغزش را اعمال نموده و گرادیان جزء جرمی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین دمای دیواره ثابت و برابر با ۱۴۱۰ کلوین فرض می‌شود.

۴-۶- شرط مرزی تقارن

معادله ۱۷ روابط مربوط به شرط مرزی محور تقارن را نشان می‌دهد که در آن تغییرات همه پارامترها در جهت شعاعی صفر می‌شود، همچنین سرعت شعاعی برابر صفر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial T_g}{\partial y} = \frac{\partial T_s}{\partial y} = \frac{\partial Y_i}{\partial y} = 0, \quad V = 0 \quad (17)$$

۷- مدل سازی عددی

در این مقاله معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی، مومنتم، معادله انرژی فاز جامد (ماتریس متخلخل)، معادله انرژی فاز گاز و معادلات بقا گونه‌های شیمیایی براساس روش حجم محدود گسسته‌سازی شده هستند و فشار و سرعت از طریق الگوریتم سیمپل به هم ارتباط داده شده اند. به دلیل سخت بودن^{۲۶} معادلات انرژی گاز و انتقال گونه‌های شیمیایی، جملات چشمه مربوط به این معادلات توسط زیربرنامه‌ی دی‌و^{۲۷} حل می‌شوند [۱۷]. جملات مربوطه به صورت معادلات ۱۸ و ۱۹ تعریف می‌گردند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) = \dot{\omega}_k \cdot W_k \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T_f) = -\sum_{K=1}^{N_s} \dot{\omega}_k h_k W_k \quad (19)$$

زیربرنامه دی‌و معادلات دیفرانسیل مرتبه‌ی اول را بر اساس الگوریتم هیندرمارش-گیر^{۲۸} [۱۸] حل می‌نماید. که این الگوریتم به صورت معادلات ۲۰ و ۲۱ تعریف می‌شود.

$$[Y_i]^{new} = [Y_i]^{old} + [\Delta Y_i]^{transport} + [\Delta Y_i]^{source} \quad (20)$$

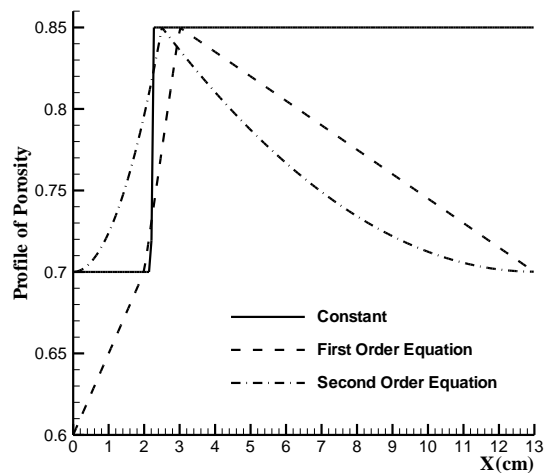
$$[T_g]^{new} = [T_g]^{old} + [\Delta T_g]^{transport} + [\Delta T_g]^{source} \quad (21)$$

که در آن $[Y_i]^{old}$ و $[T_g]^{old}$ به ترتیب جزء جرمی و دمای گاز در تکرار قبلی، $[\Delta Y_i]^{transport}$ و $[\Delta T_g]^{transport}$ به ترتیب تفاضل جزء جرمی و دما قبل و بعد از حل معادلات ۶ و ۹ با

$$0.024X^2 + 0.7 \quad 0 \leq X \leq 2.5$$

$$0.00136X^2 - 0.03536X + 0.93 \quad 2.5 \leq X \leq 13 \quad (14)$$

نمودار تغییرات تخلخل در طول مشعل در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲) نمودار تغییر تخلخل در طول مشعل

۶- شرایط مرزی

شرایط مرزی وارد بر هندسه‌ی مشعل بصورت زیر در نظر گرفته می‌شوند.

۱-۶- شرط مرزی ورودی

سرعت، دما و غلظت گونه‌ها، در ورود به مشعل داده شده، فرض می‌شود و بقیه متغیرها در ورودی مشعل به صورت معادلات (۱۵) می‌باشند:

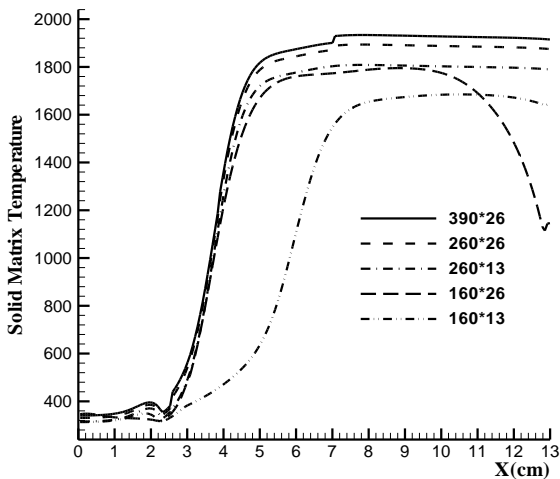
$$u = u_{in}, \quad V = 0, \quad T_g = T_{g,in}, \quad (15)$$

$$Y_i = Y_{i,in}, \quad (1-\varepsilon)\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = -\varepsilon_r \sigma (T_s^4 - T_o^4)$$

که در آن σ ، ثابت استفان بولتزمن که برابر 5.67×10^{-8} است، ε_r ضریب انتشار سطح و T_o دمای محیط که برابر ۳۰۰ کلوین در نظر می‌گیریم. همچنین نسبت هوای اضافی برابر با ۱/۵ می‌باشد.

۲-۶- شرط مرزی خروجی

کلیه متغیرها شامل سرعت محوری، سرعت شعاعی، دمای گاز و غلظت گونه‌ها در خروجی مشعل به صورت توسعه یافته فرض می‌شوند که به صورت معادلات ۱۶ در برنامه اعمال می‌شوند.



شکل (۴): نمودار دمای ماتریس جامد برای حالات شبکه بندی متفاوت

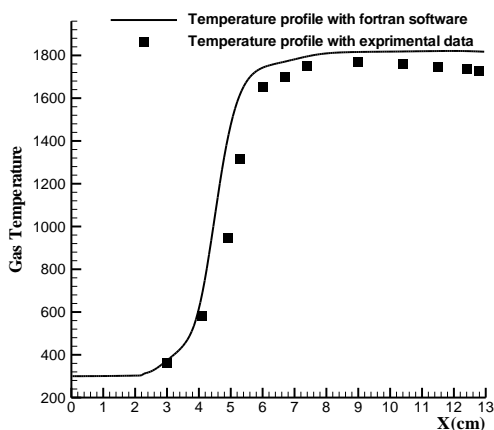
جدول (۱): مدت زمان انجام محاسبات مربوطه با توجه به شبکه

بندی های متفاوت

شبکه	۳۹۰×۲۶	۲۶۰×۲۶	۲۶۰×۱۳	۱۶۰×۲۶	۱۶۰×۱۳
دما	Tg,Ts	Tg,Ts	Tg,Ts	Tg,Ts	Tg,Ts
زمان همگرایی کمینه	۹۲۰	۸۰۲	۶۷۲	۴۳۳	۳۷۵

۹- بررسی درستی نتایج

شکل ۵ نمودار مربوط به دمای گاز را برای سامانه GRI-3.0 در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از تحقیقات دراست و ترمیم [۲۲] نشان می دهد. همان گونه که دیده می شود بین نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی برابری قابل قبولی وجود دارد.



شکل (۵)-مقایسه توزیع دمای بدست آمده از سامانه GRI-3.0 با نتایج تجربی در مشعل محیط متخلخل با نسبت هوای اضافی ۱/۵

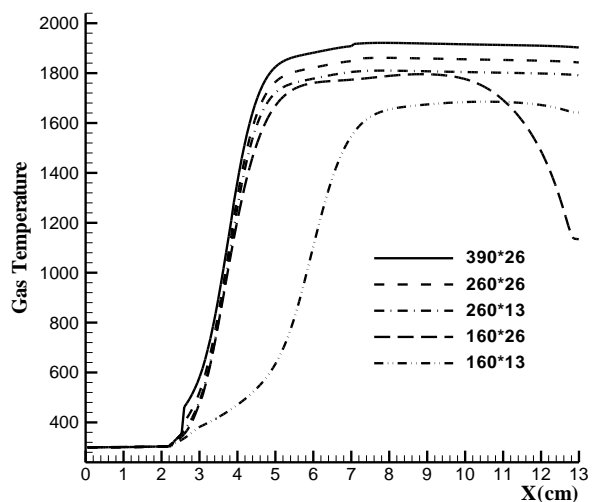
صرف نظر نمودن از ترمهای مربوطه و $[\Delta Y_i]^{source}$ و $[\Delta T_g]^{source}$ تفاضل جزء جرمی و دما قبل و بعد از حل معادلات ۱۸ و ۱۹ هستند.

در این برنامه برای اعمال سامانه شیمیایی و ویژگی های ترمو فیزیکی و ترمو شیمیایی و نرخ پیشرفت واکنش از زیر برنامه ی ترن فیت و کمکین استفاده شده است [۱۹].

برای شبیه سازی فرایند احتراق از پنج سامانه، اسکلتال [۲۰] و سامانه های با ۱۷ گونه و ۵۸ واکنش شیمیایی و سامانه GRI-3.0 و سامانه GRI-2.11 و GRI-1.2 [۲۱]، استفاده شده است.

۸- بررسی استقلال از شبکه

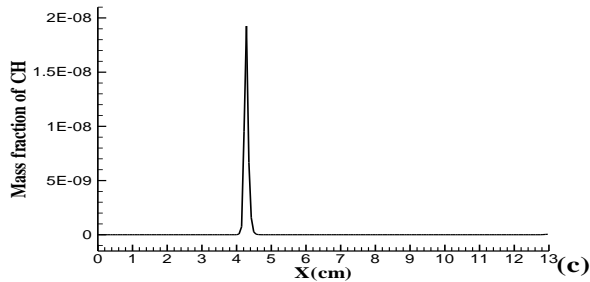
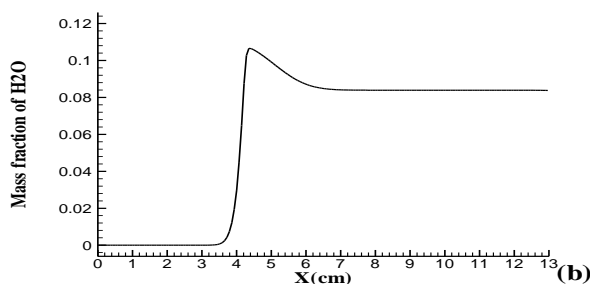
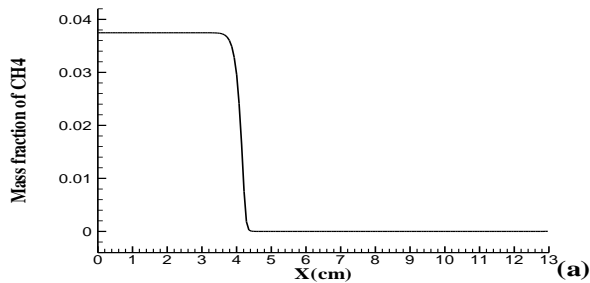
هنگامی که از شبکه درشت استفاده می کنیم اول احتمال همگرا شدن بیشتر می شود و دوم زمان انجام محاسبات کاهش می یابد. در این مقاله برای بررسی استقلال از شبکه، شبکه بندی های مختلفی را مورد بررسی قرار دادیم که نتایج آنها به صورت شکل های زیر ارائه شده است. همان گونه که در شکل های (۳) و (۴) دیده می شود تغییرات متغیرها با ریزتر شدن شبکه از ۲۶×۲۶ بسیار ناچیز و در حدود ۰.۴٪ خواهد بود که در کارهای مهندسی قابل صرف نظر می باشد در حالی که مدت زمان انجام محاسبات (جدول ۱) برای شبکه یاد شده نسبت به شبکه های ریزتر به سرعت کاهش می یابد. به همین دلیل همه نتایج محاسبات براساس شبکه گفته شده گزارش شده است.



شکل (۳): نمودار دمای گاز برای حالات شبکه بندی متفاوت

جدول (۲): میزان انتشار آلاینده NOx

نقطه آزمون	تخلخل ثابت	تخلخل متغیر مرتبۀ اول	تخلخل متغیر مرتبۀ دوم
cm ۱۲/۲۲۴۱	۰۰۷E-۱۱/۴۲۵۹	۰۰۷E-۷/۸۵۲۹	۰۰۷E-۷/۶۷۲۷



شکل (۶): نمودار کسر جرمی گونه‌های (a) متان، (b) H2O و (c) CH با سامانه GRI-3.0

در کنار مزیت‌هایی که گفته شد این کار معایبی نیز دارد که از آن جمله می‌توان به مسأله‌ی افت فشار بیشتر اشاره نمود. شکل (۹) نمودار افت فشار در طول مشعل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۹) افزایش افت فشار مقدار بسیار ناچیز و در حدود ۰/۰۰۰۱٪ و قابل صرف نظر می‌باشد:

علت این اختلاف در بین مقادیر آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی را می‌توان در اختلاف بین بعضی از خواص مواد متخلخل مانند ضریب انتقال گرمای حجمی، هدایت حرارتی و همچنین شرایط مرزی خروجی و دمای دیواره بالای در نظر گرفته شده برای مشعل دانست.

۱۰- بحث و نتایج

نتایج کار حاضر در چند بخش ارائه خواهد شد. در قسمت اول نمودارهای مربوط به بعضی از گونه‌های شرکت کننده در واکنش برای سامانه GRI-3.0 نشان داده شده است که فقط درستی انجام محاسبات به وسیله‌ی کد مورد نظر را نشان می‌دهند. برای این منظور گونه‌ها طوری انتخاب شده اند که یا فقط تولید (CH₄) و یا مصرف (H₂O) می‌گردد و یا به عنوان یک گونه میانی (CH) در سامانه شیمیایی مورد نظر مطرح هستند. در قسمت بعدی تغییرات دما بر اساس تغییر تخلخل، تغییرات نیتروژن مونواکسید و افت فشار، نشان داده شده است. در قسمت سوم به بررسی پارامتریک، پرداخته شده است و سرانجام در قسمت انتهایی جمع بندی نتایج به دست آمده ارائه خواهد شد. شکل‌های (۶a)، (۶b) و (۶c) نمودارهای مربوط به گونه‌های متان، H₂O و CH را برای سامانه GRI-3.0 نشان می‌دهند. در شکل (۷) نمودار دمای گاز برای حالات تخلخل متغیر خطی، تخلخل متغیر مرتبه دوم و ثابت دو ناحیه‌ای (۰/۷) در ناحیه‌ی پیش‌گرمایش و ۰/۸۵ در ناحیه‌ی احتراق) ارائه شده است. همانطوری که دیده می‌شود مقدار دمای بیشینه در حالتی که تخلخل به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شود حدود ۰/۴/۵٪ کاهش پیدا می‌کند. کاهش دمای بیشینه می‌تواند منجر به کاهش آلاینده‌های خروجی از مشعل شود.

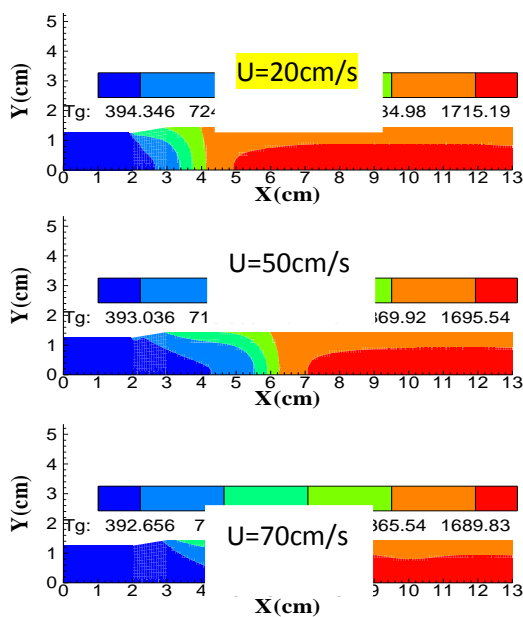
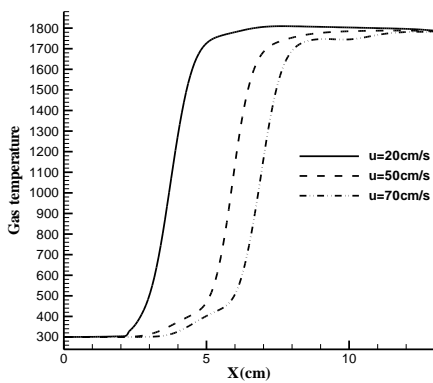
شکل (۸) نمودار تغییرات کسر جرمی گونه‌ی نیتروژن مونواکسید را نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود با کاهش دمای بیشینه، میزان نیتروژن مونواکسید خروجی کاهش پیدا می‌نماید. نکته قابل توجه در این مسأله آن است که با در نظر گرفتن تخلخل به صورت تابعی بر حسب طول مشعل، مقدار نیتروژن مونواکسید تولیدی کاهش خواهد یافت و به تبع آن مقدار این آلاینده در خروجی کاهش می‌یابد.

با توجه به نقطه‌ی آزمون داده شده در جدول (۲) که از شکل (۸) به دست آمده است، درصد کاهش انتشار نیتروژن مونواکسید برای پروفیل تخلخل مرتبه‌ی اول نسبت به تخلخل ثابت ۳۱/۲۷٪ و برای پروفیل مرتبه دوم ۳۲/۸۴٪ است.

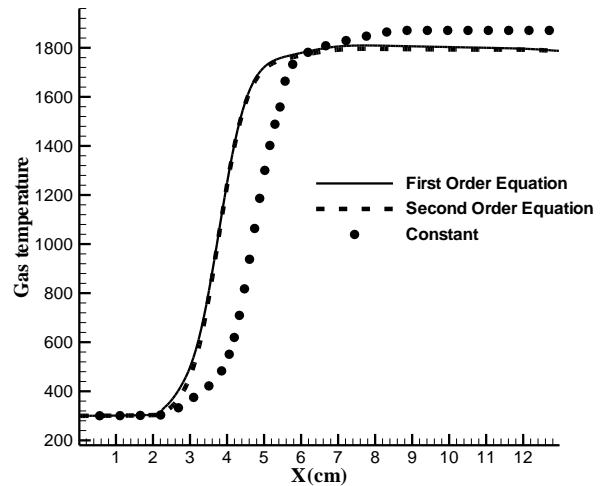
۱۱- بررسی پارامتریک

۱۱-۱- بررسی اثرات تغییر سرعت ورودی

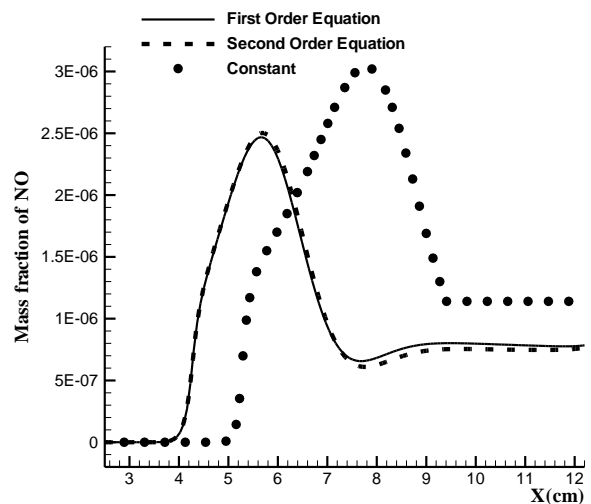
همان‌طور که در شکل (۱۰) دیده می‌شود با افزایش سرعت ورودی، بیشینه دمای گاز کاهش می‌یابد. و به تبع آن میزان انتشار نیتروژن مونواکسید کاهش می‌یابد. تولید بیشتر نیتروژن مونواکسید در سرعت‌های بالاتر را می‌توان اینگونه توضیح داد که در سرعت‌های بالاتر عدم تعادل حرارتی سبب تولید بیشتر نیتروژن مونواکسید می‌شود و در ضمن در سرعت‌های بالاتر چون فرصت کافی برای سامانه‌های برگشت وجود ندارد، سبب می‌شود که میزان این آلاینده در خروجی افزایش پیدا کند. میزان انتشار دیده می‌شود در حالت تخلخل ثابت دو ناحیه‌ای میزان انتشار این آلاینده بیشتر خواهد بود.



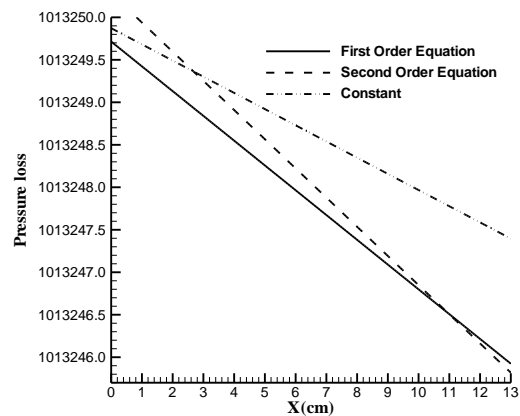
شکل (۱۰): نمودار و کانتور دمای گاز برای مقادیر مختلف سرعت ورودی



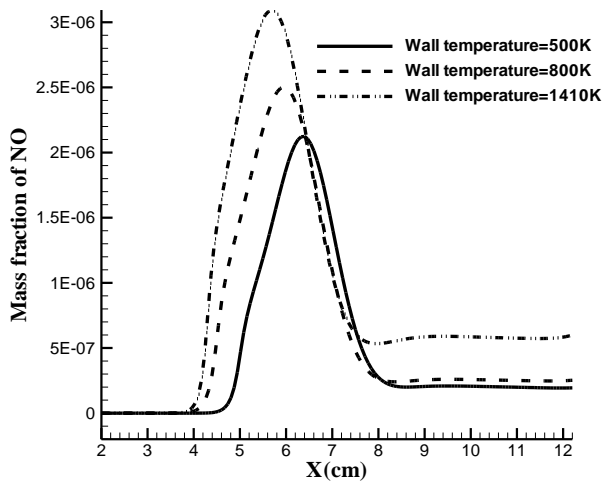
شکل (۷): نمودار دمایی گاز برای حالات تخلخل متفاوت



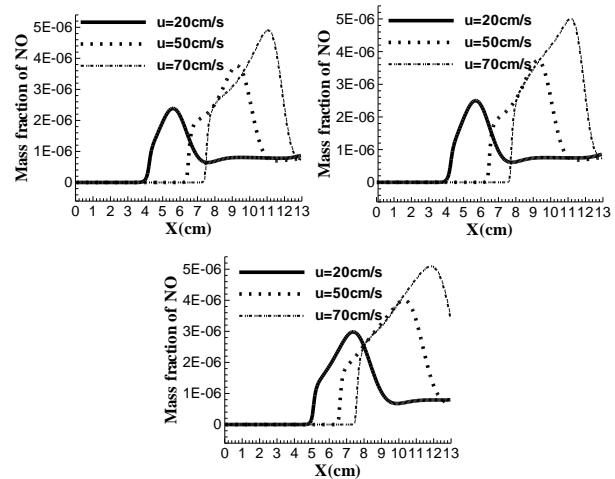
شکل (۸): نمودار تغییرات کسر جرمی گونه‌ی NOx با استفاده از سامانه GRI-3.0



شکل (۹): نمودار افت فشار برای مقایسه حالات تخلخل ثابت و متغیر



شکل (۱۳): اثرات تغییر دمای دیواره بر روی انتشار آلاینده‌ی NOx



شکل (۱۱): اثرات تغییر سرعت ورودی بر روی انتشار آلاینده NOx

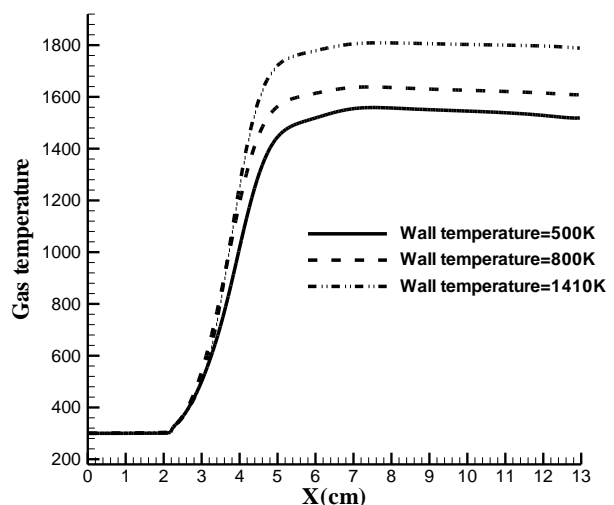
۱۲- نتیجه گیری

در این مقاله نتایج حاصل از مدل‌سازی دو بعدی و متقارن محور احتراق پیش آمیخته‌ی متان- هوا با سامانه چند مرحله‌ای در داخل محیط متخلخل با تغییر تخلخل ارائه شده و نتایج زیر به دست آمده است:

۱. با استفاده از پروفیل تخلخل می‌توان مقدار دمای بیشینه را برای گاز و ماتریس جامد در حدود ۴/۵٪ کاهش داد.
۲. با توجه به اینکه مقدار نیتروژن مونواکسید خروجی از مشعل به دمای بیشینه بستگی دارد، کاهش دمای بیشینه، باعث کاهش مقدار نیتروژن مونواکسید و متناسب با کاهش دما خواهد شد.
۳. انتخاب پروفیل تخلخل بهینه باعث افزایش افت فشار خواهد شد، اما از آنجاییکه مقدار این افت فشار بسیار ناچیز و در حدود ۰/۰۰۰۱٪ است، می‌توان از آن صرف‌نظر نمود.
۴. با افزایش سرعت ورودی، جبهه‌ی شعله به سمت پایین دست جریان منتقل می‌شود که این امر سبب کاهش دمای بیشینه می‌شود اما با وجود کاهش دمای بیشینه به علت عدم تعادل حرارتی بر میزان تولید آلاینده‌ها افزوده می‌شود اما میزان انتشار آن کاهش می‌یابد.
۵. با افزایش دمای دیواره، به علت نزدیک شدن به حالت آدیاباتیک، دمای بیشینه به شدت افزایش یافته و این امر، سبب افزایش نیتروژن مونواکسید خواهد شد.

۱۱-۲ بررسی اثرات تغییر دمای دیواره

همانطور که در شکل (۱۲) دیده می‌شود با افزایش دمای دیواره، بیشینه دما افزایش پیدا می‌کند علت این امر را می‌توان اینگونه توضیح داد که با افزایش دمای دیواره در واقع مشعل به حالت آدیاباتیک خود بسیار نزدیک می‌شود و انتقال حرارت کم‌تری توسط دیواره انتقال پیدا نموده و دمای گاز کمتر خنک می‌شود و در نتیجه مقدار دمای بیشینه افزایش پیدا می‌کند و به تبع آن میزان انتشار نیتروژن مونواکسید نیز همان‌طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، افزایش می‌یابد:



شکل (۱۲): اثرات تغییر دمای دیواره بر روی دمای گاز

۱۳- مراجع

- [۱] حسین پور، سیامک و معلمی، نگین " شبیه‌سازی عددی احتراق در محیط متخلخل در حالت دو بعدی با استفاده از چهار سازوکار شیمیایی چند مرحله‌ای مختلف " انجمن احتراق ایران، ۱۳۸۹.
- [۲] Echigo, R., "Effective Energy Conversion Method Between Gas Enthalpy and Thermal Radiation and Application to Industrial Furnaces," Proc. 7th Int. Heat Transfer conf., München, Vol. 6, pp. 361-366, 1982.
- [۳] Wang, K. and Tien, C. "Thermal Insulation in Flow System, Combined Radiation and Convection Through a Porous Segment." J. of Heat Transfer 106, pp. 453-459, 1984.
- [۴] X.Y.Zhou and J.C.F.Pereira. "Comparison of Four Combustion Models for Simulating the Premixed Combustion in inert Porous Media" FIRE AND MATERIALS. Fire Mater. 22, 187-197, 1998.
- [۵] MALICO. I. " Two-dimensional Numerical Study and pollutants Formation in P.M." combust. Sci. and Tech, vol. 152, pp 57-79, 1999.
- [۶] Chung-jen Tseng." Effect of Hydrogen addition on methae combustion in a porous medium burner" International journal of Hydrogen Energy 27, pp.699-707, 2002.
- [۷] Lari K.,Ganjalikhan nassab S.A. ,"Transient thermal characteristics of porous radiant burners".Iranian Journal of Science and Tecnology ,transaction b:engineering Vol.31,number b4,407-420, 2007.
- [۸] Hossainpour,S &Haddadi,B." Numerical Study of the Effects of Porous Burner Parameters on Combustion and Pollutants Formation. " , WCE,pp.1505-1509, April, 21, 2008.
- [۹] Mao-Zhao Xie, Jun-Rui Shi, Yang-Bo Deng, Hong Liu, Lei Zhou, You-Ning Xu, " Experimental and numerical investigation on performance of a porous medium burner with reciprocating flow", Original Research Article, Fuel, Volume 88, Issue 1, Pages 206-213, January 2009.
- [۱۰] Bidi. M, Nobari. M.R.H * , Saffar Avval. M," A numerical evaluation of combustion in porous media by EGM (Entropy Generation Minimization)" Energy 35 (2010) 3483-3500, 2 June 2010.
- [۱۱] Donald A.Neild and adrian Bejan,"Convection in Porous Media",Third Edition
- [۱۲] Durst, F., Trimis, D., "Compact low emission combustion reactors with integrated heat exchanger using porous medium combustion" in: Proceedings of the first European Conference on small burner Technology and Heating Equipment,Zurich, Switzerland, September 25-26, 1996
- [۱۳] Malico, I, Zhou, X, Y, and Pereira, J, C, F, "Two-dimensional Numerical Study on Combustion and Pollutants formation in Porous Burner," Combust, Sci and Tech, 152,pp,57-59,2000.
- [۱۴] Vafai, K, Handbook of Porous Media, Taylor & Francis Group, LIC, 2005.
- [۱۵] Nemoda, S, Trimis, D, and Zivkovich, G,"Numerical Simulation of Porous Burners and Hole Plate Surface Burners" J, THERMAL SCIENCE,8, No. 1,pp,3-17,2004.
- [۱۶] Kee, R, J, Rupley, F, M, and Miller, J, A, TheChemkin Thermodynamic Data Base. Sandia National Laboratories. Rept. SAND-8215B,1992.
- [۱۷] Brown, P. N., Byrne, G. D., and Hindmarsh, A. C., "VODE: a Variable Coefficient ODE Solver," SIAM J. Sci. Stat. Comput., 10, pp. 1038-1051, 1989.
- [۱۸] Malico, I, Zhou, X, Y, and Pereira, J, C, F, "Two-dimensional Numerical Study on Combustion and Pollutants formation in Porous Burner," Combust, Sci and Tech, 152,pp,57-59,2000.
- [۱۹] Kee, R, J., Dixon-LEWIS, G., Warnatz, J, Coltrin, M, E, and miller, J, A, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas Phase Multi-component Transport Properties ,"Sandia National lab. Report SAND 86-8246,1996.
- [۲۰] Glarborg, P., Lilleheie, N.I., Byggstoyl, S., Magnussen, B, F., Kilpinen, P, and Hupa, M., " A Reduced Mechanism for Nitrogen Chemistry in Methane Combustion," 24th Symposium (international) on Combustion , The Combustion Institute, 24,No. 1,pp.889-890,1992.
- [۲۱] Smith, G, P., Golden, D, M., Frenklach, M., Moriarty, N, W., Eiteneer, B.,Goldenberg, M., Bowman, C, T., Hanson, R, K., Song, S., Gardiner Jr, W, C., Lissianski, V., and Qin, Z., available at :http://www.me.berkeley.edu/gri-mech.
- [۲۲] Durst, and Trimis, D., "Compact Porous Medium Burner and Heat Transfer Exchanger for Household Applications" Ec project report, Contact no. JOEC-CT95-0019, 1996.

۱۴- فهرست علائم و اصطلاح های انگلیسی

Full Mechanism (FM)	مکانیزم کامل	Constant	تخلخل ثابت
Entropy Generation Minimization (EGM)	مینیمم کردن انتروپی تولیدی	First order equation	تخلخل متغیر مرتبه اول
Gas Research Institute (GRI)	موسسه تحقیقات گاز	Second order equation	تخلخل متغیر مرتبه دوم
U	سرعت ورودی	One Global Mechanism (1GM)	واکنش یک مرحله ای
Wall temperature	دمای دیواره	Four-Step Reduced Mechanism (4RM)	مکانیزم کاهش یافته ی ۴ مرحله ای

۱۵- پی نوشت‌ها

- ^۱ CHEMKIN II
- ^۲ SIMPLE
- ^۳ NO_x
- ^۴ SO_x
- ^۵ CO
- ^۶ CO₂
- ^۷ Echigo
- ^۸ Wang
- ^۹ Tien
- ^{۱۰} J.C.F.Pereira
- ^{۱۱} X.Y.Zhou
- ^{۱۲} Full Mechanism
- ^{۱۳} Skeletal
- ^{۱۴} 4-step reduced mechanism
- ^{۱۵} 1GM
- ^{۱۶} Malico
- ^{۱۷} Chung-jen
- ^{۱۸} Lari
- ^{۱۹} Mao
- ^{۲۰} (EGM)
- ^{۲۱} Preheating
- ^{۲۲} Superficial
- ^{۲۳} Tranfit
- ^{۲۴} Chemkin
- ^{۲۵} Collision frequency
- ^{۲۶} Stiffness
- ^{۲۷} DVODE
- ^{۲۸} Hindmarsh-Gear