

بررسی عددی اثرات پارامترهای مختلف در مشعل‌های محیط متخلخل همراه با تخلخل متغیر، بر روی احتراق و ایجاد آلاینده‌ها در حالت دوبعدی و متقارن محور

ایمان محمدی^{۱*} و سیامک حسین پور^{۲**}

دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی مکانیک

نویسنده مخاطب: ایمان محمدی (i_mohammadi@sut.ac.ir)

چکیده

در این مقاله نتایج حاصل از مدل سازی دو بعدی و متقارن محور احتراق پیش آمیخته‌ی متان- هوا با سینتیک چند مرحله ای در داخل محیط متخلخل با تغییر تخلخل ارائه شده است که در آن برای مشخص کردن خصوصیات ترموفیزیکی و ترموشیمیایی از برنامه *CHEMKIN II* و اطلاعات پایه آن استفاده شده است. معادلات پیوستگی، ناویر استوکس، معادلات انتقال حرارت فاز گاز و جامد و معادلات حاکم بر گونه های شیمیایی با استفاده از روش حجم محدود حل شده و برای ارتباط بین سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل (*SIMPLE*) استفاده شده است. مشعل مورد مطالعه شامل دو ناحیه ی پیش گرم و احتراقی می باشد. در این مقاله نتایج ناشی از اعمال دو پروفیل تغییر تخلخل مختلف به جای تخلخل ثابت دو ناحیه ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با اعمال تخلخل متغیر در طول مشعل می توان میزان دمای ماکزیمم را حدود ۴/۵٪ کاهش داد و به تبع آن میزان آلاینده های خروجی نظیر NOx نیز کاهش می یابد. در حالی که افت فشار در طول مشعل به میزان بسیار ناچیزی افزایش پیدا می کند. همچنین اثرات نسبت هوای اضافی، سرعت ورودی، سینتیک شیمیایی و دمای دیواره بر روی مشعل های محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: مشعل محیط متخلخل، تخلخل متغیر، احتراق متقارن محور، روش حجم محدود، سینتیک شیمیایی

۱- مقدمه

امروزه به دلیل افزایش تقاضا و رو به اتمام بودن منابع سوخت های فسیلی و از سوی دیگر ایجاد آلاینده های خطرناکی مانند NOx، SOx، CO و CO2 نیاز به بهبود عملکرد سیستم های احتراقی موجود و همچنین کاهش آلودگی ها احساس می شود. قوانین سخت گیرانه ای که امروزه برای کاهش NOx و دیگر آلاینده ها وضع می شود موجب گردیده که تحقیقات بیشتری در زمینه ی کاهش آلاینده های حاصل از احتراق در مشعل ها و افزایش راندمان آنها صورت پذیرد در همین زمینه موضوع نسبتاً جدیدی که در طی سه دهه ی اخیر مورد توجه بسیاری از دانشمندان فن قرار گرفته است، استفاده از مواد متخلخل در سیستم های احتراقی می باشد که از آن جمله می توان به مشعل ها اشاره نمود. احتراق در محیط متخلخل نسبت به سیستم های احتراقی پیشین دارای مزایای بیشماری است که از آن میان می توان به موارد زیر اشاره نمود.

۱- نزدیک شدن به احتراق کامل و کاهش مونو اکسید کربن و مخلوط نسوخته در محصولات احتراق بواسطه ی عبور مخلوط سوخت و هوا از داخل خلل و فرج محیط متخلخل

۲- کاهش دمای ماکزیمم در محفظه ی احتراق و کاهش تشکیل NOx و آلاینده های دیگر بواسطه ی خروج قسمتی از انرژی احتراق و انتقال انرژی حرارتی از محصولات احتراق به محیط متخلخل

۳- افزایش راندمان فرآیند احتراق بواسطه ی پیش گرم شدن مخلوط ورودی سوخت و هوا قبل از رسیدن به محفظه ی احتراق

* دانشجوی کارشناسی ارشد- نویسنده مخاطب (i_mohammadi@sut.ac.ir)

** دانشیار دانشکده مکانیک (hossainpour@sut.ac.ir)

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 (خشک کن ها)، گرمایش اتاق خودرو، موتور های احتراق داخلی، دستگاه های مولد بخار، کاربردهای شیمیایی، استفاده در محفظه های احتراقی توربین گازی، احتراق سوخته های با ارزش حرارتی پایین و بسیاری دیگر از کاربرد ها استفاده گردد.

توسعه و بهینه سازی مشعل های محیط متخلخل مستلزم شبیه سازی های تجربی و عددی خواهد بود. از آنجا که تحقیقات آزمایشگاهی مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد است، استفاده از شبیه سازی عددی برای بررسی عملکرد و تأثیر متغیرهای مختلف بر روی توزیع دما و نحوه تولید آلاینده ها ضروری به نظر می رسد.

تاریخچه ای استفاده از مواد متخلخل به سال ۱۹۸۲ بر می گردد که در آن اچیگو (Echigo) [۱]، بازیافت انرژی از گازهای خروجی دستگاه های با دمای بالا را مد نظر قرار داد. وی دریافت که با این کار می توان قسمت اعظمی از انرژی حرارتی گاز را از طریق جابه جایی به محیط متخلخل منتقل نمود و همچنین با افزایش درجه حرارت گاز ورودی کارایی لایه محیط متخلخل در امر بازیافت بیشتر می گردد. بعد از آن در سال ۱۹۸۴ ونگ (Wang) و تین (Tien) [۲]، مطالعاتی را در همین زمینه با استفاده از روش دو شار حرارتی برای معادلات انتقال حرارت تشعشعی و با در نظر گرفتن پخش انرژی تشعشعی توسط محیط متخلخل انجام دادند و دریافتند که پخش انرژی تشعشعی توسط لایه ی متخلخل سبب می شود که میزان انرژی جذب شده توسط محیط متخلخل از طریق جابه جایی کمتر شده و باعث کاهش راندمان لایه محیط متخلخل در امر بازیافت می شود. در سال ۱۹۹۸ جی سی اف پیرا (J.C.F.Pereira) و ایکس وای زو (X.Y.Zhou) [۳]، احتراق گاز متان را با استفاده از چهار مدل احتراقی، Full Mechanism، که شامل ۴۹ گونه و ۲۲۷ واکنش شیمیایی، Skeletal، که شامل ۲۷ گونه و ۷۳ واکنش شیمیایی، 4-step reduced mechanism، که شامل ۹ گونه و ۴ واکنش شیمیایی و IGM که شامل ۴ گونه و ۱ واکنش کلی است بررسی نمودند و دریافتند که 4RM بیشترین تطابق را با FM خواهد داشت. مالیکو و همکاران [۴] در سال ۱۹۹۹ از تحلیل عددی دو بعدی برای بررسی احتراق و انتشار آلاینده ها در محیط متخلخل، بررسی اثرات نسبت هوای اضافی، ضریب هدایت حرارتی، ضریب انتقال حرارت همرفت و خواص تشعشعی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با در نظر نگرفتن اثرات جذب، جبهه ی شعله به سمت پایین دست جریان حرکت کرده، ماکزیمم دما افزایش یافته و در نتیجه انتشار آلاینده ها افزایش می یابد.

چانگ جن در سال ۲۰۰۲ [۵] 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 CO افزایش پیدا می کند. در سال ۲۰۰۷ لاری [۶]، به آنالیز حرارتی مشعل های متخلخل در حالت گذرا با استفاده از مدل دو شار حرارتی پرداخت و اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که مشعل های با ضخامت اپتیکال بیش تر، دارای پیک دمایی پایین تر می باشند. همچنین تشعشع خروجی از مشعل افزایش پیدا نموده و به تبع آن بازده مشعل افزایش می یابد.

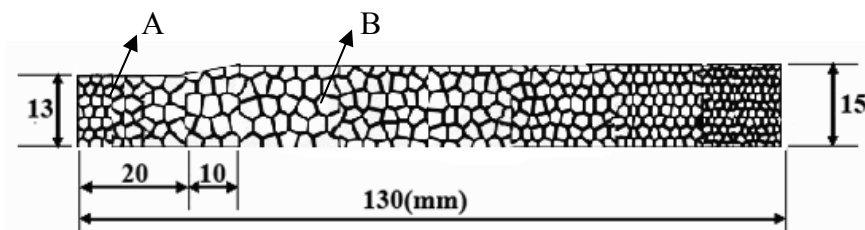
حسین پور وحدادی [۷] در سال ۲۰۰۸ اثرات پارامترهای کوره متخلخل را بر روی احتراق و تشکیل آلاینده ها با استفاده از یک مدل یک بعدی و سینتیک چند مرحله ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با کاهش ضریب انتقال حرارت حجمی، اختلاف دمایی بین گاز و جامد کاهش می یابد و همچنین با کاهش تخلخل، سرعت افزایش می یابد. بعد از آن در سال ۲۰۰۹ حسین پور و معلمی [۸] به بررسی اثرات استفاده از چند سینتیک شیمیایی چند مرحله ای متفاوت بر روی نمودارهای دما، جزء جرمی گونه ها و انتشار آلودگی ها پرداختند و دریافتند که نتایج حاصل از سینتیک های مختلف با یکدیگر مطابقت دارند.

در کار حاضر سعی بر این است تا تأثیر تغییر تخلخل را بر عملکرد مشعل های محیط متخلخل مورد بررسی قرار دهیم که برای این کار برنامه ای به زبان فرترن برای حالت دو بعدی و متقارن محور و مکانیزم های چند مرحله ای ایجاد شده است. امروزه با پیشرفت علم و تکنولوژی در عرصه ی ساخت مواد متخلخل، امکان تولید موادی با تخلخل متغیر دور از دسترس نخواهد بود [۹]. استفاده از تخلخل متغیر امکان تنظیم دمای ماکزیمم شعله را فراهم می آورد که به تبع آن می توان تولید مواد

آلاینده را نیز کاهش داد. در این مقاله نتایج اعمال مدل سازی 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 داده ایم.

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 مجدداً به سمت انتهای آن کاهش می یابد.



شکل ۱- شماتیکی از مشعل محیط متخلخل مورد بررسی همراه با تخلخل متغیر

مخلوط سوخت و هوا ابتدا وارد ناحیه A (ناحیه ی پیش گرمایش) می شود چون دمای مواد جامد بالاتر از دمای گاز است، گازهای پیش مخلوط در حین عبور از خلل و فرج این ناحیه بواسطه ی انتقال حرارت جابه جایی پیش گرم شده و به دمای اشتعال نزدیک می شوند در این هنگام مخلوط وارد ناحیه ی B شده و به دمای احتراق می رسد و واکنش شیمیایی اتفاق می افتد. با انجام واکنش شیمیایی، آنتالپی احتراق آزاد می شود، قسمتی از گرمای واکنش بواسطه ی انتقال حرارت تشعشی و هدایت حرارتی از طریق مواد جامد به ناحیه ی ورودی A منتقل می شود و مابقی گرمای واکنش از طریق مواد جامد و گازهای محصولات احتراق بواسطه ی انتقال حرارت هدایت، تشعشع، جابه جایی به پایین دست جریان واگذار می شود [۱۰].

فرضیات بکار رفته در حل مسئله

- ۱- جریان سیال پایدار، آرام و نیوتنی است.
 - ۲- با وجود تغییر تخلخل، برای محاسبه ی افت فشار و بقیه پارامترها در ماتریس متخلخل همچنان معادله ی داری و فورهایمر برقرار است.
 - ۳- اثر ویسکوزیته و نیروی حجمی ناچیز است.
 - ۴- از اثرات کاتالیزوری ماده ی متخلخل در دمای بالا صرف نظر شده است.
 - ۵- از اثرات انتقال حرارت تشعشی 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 می شوند [۱۱].

معادلات حاکم

با توجه به فرضیات مسئله معادلات حاکم به صورت زیر می باشند

معادله ی پیوستگی

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

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 ترم مربوط به افت فشار بصورت زیر محاسبه می گردد.

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

که در آن K_1 و K_2 به ترتیب تانسورهای نفوذ پذیری برای جریان آرام و درهم می باشند و V_s بیانگر سرعت ظاهری (Superficial) است که در محیط متخلخل بصورت زیر تعریف می شود

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

که ε بیانگر تخلخل ماده می باشد.

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، λ_f و ρ به ترتیب ضریب هدایت گرمایی و چگالی مخلوط گاز هستند.

معادله انرژی فاز جامد

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

که ضریب انتقال گرمای هدایت موثر (λ_{eff_i}) بصورت زیر تعریف می گردد.

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

که در آن λ_{eff}° انتقال گرمای هدایتی بدون وجود جریان و قسمت دوم مربوط به اثرات نفوذ همرفت می باشد که در آن $\frac{\dot{m}}{A}$ شار جرمی بر واحد سطح، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، d قطر مشخصه و K_i ، ضرایب پخش گرمایی مدل می باشند [۱۳، ۱۲].

معادله بقای گونه های شیمیایی

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

که N_s تعداد گونه های شیمیایی است.

ویژگی های ترمو شیمیایی و ترموفیزیکی برای مخلوطی با N_s گونه توسط زیر برنامه ی Tranfit و اطلاعات ترمودینامیکی پایه Chemkin بدست می آید. نرخ تولید و یا از بین رفتن گونه ها به دلیل واکنش های شیمیایی به عنوان ترم چشمه و چاه در معادلات انرژی گاز و انتقال گونه های شیمیایی وارد می شود.

$$\dot{\omega}_k = M_k \sum_{l=1}^{N_R} (v''_{kl} - v'_{kl}) K_1 \cdot \left(\prod_{reactants} C^{v'_{kl}} - \frac{1}{K_c} \prod_{products} C^{v''_{kl}} \right) \quad (10)$$

که N_R تعداد واکنش های شیمیایی، M_k وزن مولکولی، K_c ثابت تعادل شیمیایی، v'_{kl} و v''_{kl} ضرایب استوکیومتریکی گونه های شیمیایی است که ضرایب استوکیومتریکی از طریق یک مکانیزم واکنشی به صورت معادله ۱۱ به هم مرتبط می شوند.

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

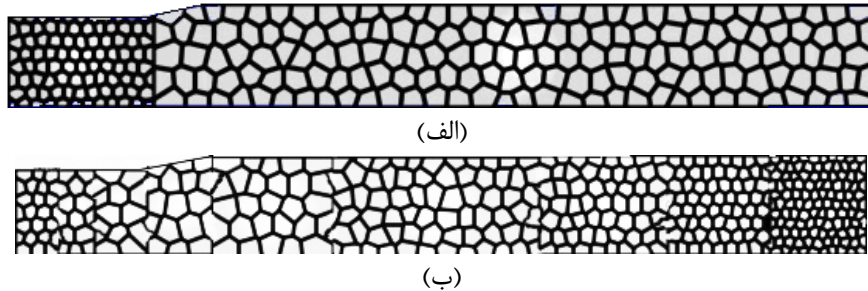
ثابت ویژه سرعت واکنش K_1 از رابطه ی آرنیوس بصورت زیر بدست می آید [۱۴].

$$K_1 = K_1^0 T^{\beta_1} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \quad (12)$$

K_I^0 فاکتور فرکانس برخورد (Collision frequency)، β_I توان دما و E_I انرژی فعال سازی برای هر واکنش می باشد که در سینتیک احتراقی مناسب تعیین شده است.

معادله تغییر تخلخل

در اشکال زیر مشعل محیط متخلخل مورد بررسی را در دو حالت مشاهده می کنید که در حالت (الف) از تخلخل ثابت دو ناحیه ای و در حالت (ب) از تخلخل متغیر خطی و درجه دوم (پروفیل تخلخل) استفاده نموده ایم.

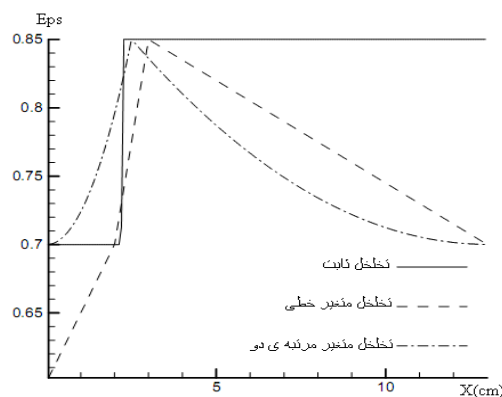


شکل ۲- الف) مشعل با تخلخل ثابت دو ناحیه ای با تخلخل ۰/۷ در ناحیه پیش گرمایش و ۰/۸۵ در ناحیه احتراق
ب) مشعل با تخلخل متغیر در طول مشعل
برای مشعل با تخلخل متغیر توابع ۱۳ و ۱۴ استفاده شده است که در آن X نشان دهنده طول مشعل می باشد.

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

$$\begin{cases} 0.024X^2 + 0.7 & 0 \leq X \leq 2.5 \\ 0.00136X^2 - 0.03536X + 0.93 & 2.5 \leq X \leq 13 \end{cases} \quad (14)$$

نمودار تغییرات تخلخل در طول مشعل در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار تغییر تخلخل در طول مشعل

شرایط مرزی

شرایط مرزی وارد بر هندسه مشعل بصورت زیر در نظر گرفته می شود.

۱- شرط مرزی ورودی

سرعت، دما و غلظت گونه ها، در ورود به مشعل داده شده فرض می شود و بقیه متغیرها در ورودی مشعل به صورت معادلات ۱۵

می باشند.

$$u = u_{in}, \quad V = 0, \quad T_g = T_{g,in}, \quad Y_i = Y_{i,in}, \quad (1-\varepsilon)\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = -\varepsilon_r \sigma (T_s^4 - T_o^4) \quad (15)$$

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 می گیریم.

۲- شرط مرزی خروجی

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial T_g}{\partial x} = \frac{\partial Y_i}{\partial x} = 0, \quad (1-\varepsilon)\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = -\varepsilon_r \sigma (T_s^4 - T_o^4) \quad (16)$$

۳- شرط مرزی دیوار

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

۴- شرط مرزی تقارن

معادله ۱۷ روابط مربوط به شرط مرزی محور تقارن را نشان می دهد که در آن تغییرات کلیه پارامترها در جهت شعاعی صفر می باشد و سرعت شعاعی برابر صفر در نظر گرفته شده است.

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

مدل سازی عددی

در این مقاله معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی، مومنتم، معادله انرژی فاز جامد (ماتریس متخلخل)، معادله انرژی فاز گاز و معادلات بقاء گونه های شیمیایی براساس روش حجم محدود گسسته سازی شده اند و فشار و سرعت از طریق الگوریتم سیمپل (Simple) به هم ارتباط داده شده اند. به دلیل سخت بودن (Stiffness)، معادلات انرژی گاز و انتقال گونه های شیمیایی، جملات چشمه مربوط به این معادلات توسط زیربرنامه DVODE حل می شوند [۱۵]. جملات مربوطه به صورت معادلات ۱۸ و ۱۹ تعریف می گردند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) = \omega_k W_k \quad (18)$$

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

زیربرنامه DVODE معادلات دیفرانسیل مرتبه اول را بر اساس الگوریتم هیندرمارش-گیر [۱۶] (Hindmarsh-Gear) حل می کند. که این الگوریتم به صورت معادلات ۲۰ و ۲۱ تعریف می شود.

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

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

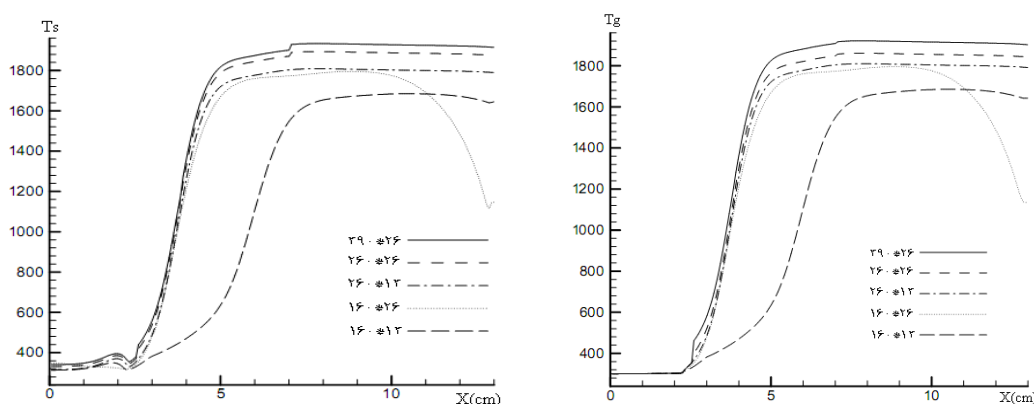
که در آن $[Y_i]^{old}$ و $[T_g]^{old}$ به ترتیب جزء جرمی و دمای گاز در تکرار قبلی، $[\Delta Y_i]^{transport}$ و $[\Delta T_g]^{transport}$ به ترتیب تفاضل جزء جرمی و دما قبل و بعد از حل معادلات ۶ و ۹ با صرف نظر نمودن از ترم های مربوطه و $[\Delta Y_i]^{source}$ و $[\Delta T_g]^{source}$ تفاضل جزء جرمی و دما قبل و بعد از حل معادلات ۱۸ و ۱۹ می باشد.

در آن برای اعمال سینتیک شیمیایی و ویژگی های ترمو فیزیکی و ترمو شیمیایی و نرخ پیشرفت واکنش از زیربرنامه Tranfit و Chemkin استفاده شده است [۱۷].

و برای شبیه سازی فرایند احتراق از پنج مکانیزم Skeletal [۱۸] و مکانیزمی با ۱۷ گونه و ۵۸ واکنش شیمیایی و سینتیک GRI-3.0 و سینتیک GRI-2.11 و GRI-1.2 [۱۹]، استفاده شده است.

بررسی استقلال از مش بندی

هنگامی که از مش درشت استفاده می کنیم اولاً احتمال همگرا شدن بیشتر می شود و ثانیاً زمان انجام محاسبات کاهش پیدا می کند. در این مقاله برای بررسی استقلال از مش، شبکه بندی های مختلفی را مورد بررسی قرار دادیم که نتایج آنها به صورت شکل های زیر ارائه شده است. همانگونه که در شکل های ۵ و ۴ مشاهده می شود تغییرات متغیرها با ریز تر شدن شبکه از مش 26×26 بسیار ناچیز و در حدود ۰.۴٪ خواهد بود که در کارهای مهندسی قابل صرف نظر کردن می باشد در حالی که مدت زمان انجام محاسبات (جدول ۱) برای مش یاد شده نسبت به مش های ریز تر به سرعت کاهش پیدا می نماید. به همین دلیل کلیه نتایج محاسبات براساس مش ذکر شده گزارش شده است.



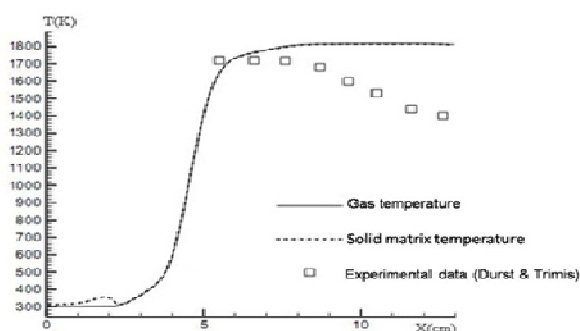
شکل (۴) نمودار دمای گاز برای حالات مش بندی متفاوت شکل (۵) نمودار دمای ماتریس جامد برای حالات مش بندی متفاوت

جدول ۱- مدت زمان انجام محاسبات مربوطه با توجه به مش بندی های متفاوت

مشخصات مش	29×26	26×26	26×13	16×26	16×13
دمای گاز	$T_g(K)$	$T_g(K)$	$T_g(K)$	$T_g(K)$	$T_g(K)$
دمای ماتریس	$T_s(K)$	$T_s(K)$	$T_s(K)$	$T_s(K)$	$T_s(K)$
مدت زمان انجام محاسبات مربوطه					
بر حسب دقیقه	۹۲۰	۸۰۲	۶۷۲	۴۳۳	۳۷۵

صحت سنجی نتایج

شکل نمودار مربوط به دمای گاز و ماتریس جامد را برای سینتیک GRI-3.0 در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از دراست و تریمیس [۲۰] نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می کنید بین نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی وجود دارد.



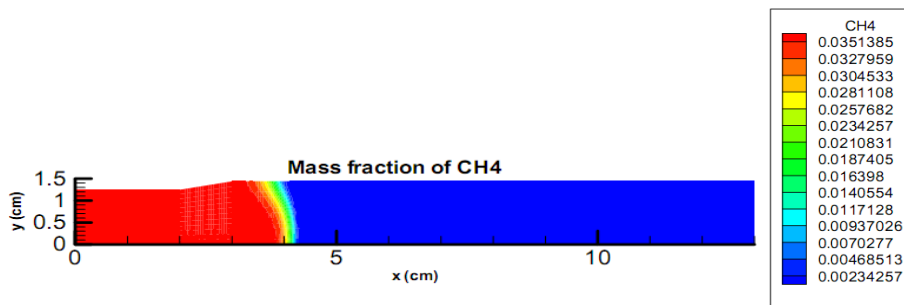
شکل (۶) -مقایسه توزیع دمای بدست آمده از سینتیک GRI-3.0 با نتایج تجربی در مشعل محیط متخلخل با نسبت هوای اضافی ۱.۵

علت این اختلاف در بین مقادیر آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده از شبیه سازی های عددی را می توان 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 جستجو نمود.

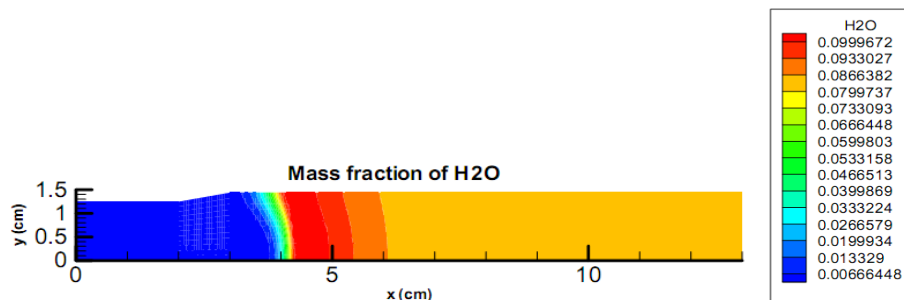
بحث و نتایج

نتایج کار حاضر در چند بخش ارائه می شود. در قسمت اول نمودارهای مربوط به بعضی از گونه های شرکت کننده در واکنش برای مکانیزم GRI-3.0 نشان داده شده اند که صرفاً درستی انجام محاسبات به وسیله ی کد مورد نظر را نشان می دهند. برای این منظور گونه ها به طریقی انتخاب شده اند که یا صرفاً تولید (CH₄) و یا مصرف (H₂O) می گردد و یا به عنوان یک گونه میانی (CH) در سینتیک شیمیایی مورد نظر مطرح می باشند. در قسمت بعدی تغییرات دما بر اساس تغییر تخلخل، تغییرات NOx 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 می شود.

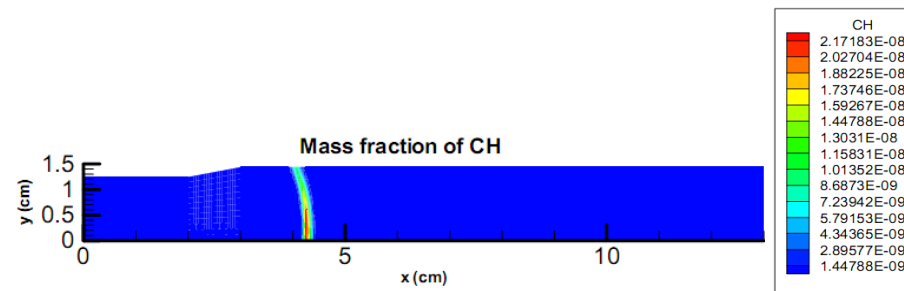
شکل های ۷، ۸ و ۹ کانتورهای مربوط به گونه های متان، H₂O و CH را برای سینتیک GRI-3.0 نشان می دهند. حالت متقارن محوری به خوبی در این اشکال دیده می شود.



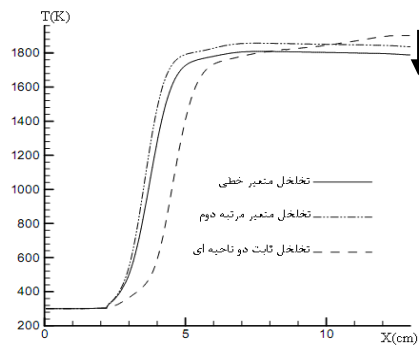
شکل (۷) کانتور کسر جرمی متان با سینتیک GRI-3.0



شکل (۸) کانتور کسر جرمی H₂O با سینتیک GRI-3.0

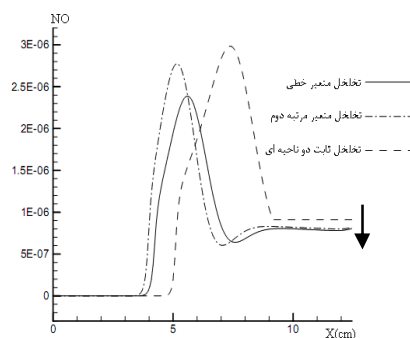


شکل (۹) کانتور کسر جرمی CH با سینتیک GRI-3.0



در شکل ۱۰ 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 مشاهده می‌شود مقدار دمای ماکزیمم در حالتی که تخلخل به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شود حدود ۴/۵٪ کاهش پیدا می‌کند. کاهش دمای ماکزیمم می‌تواند منجر به کاهش آلاینده‌های خروجی از مشعل گردد.

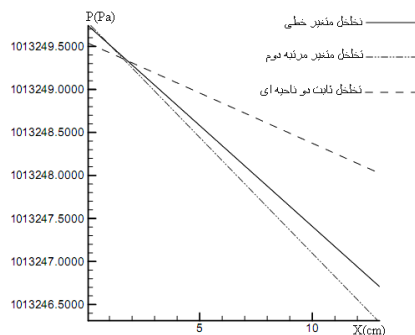
شکل (۱۰) نمودار دمای گاز برای حالات تخلخل متفاوت



شکل ۱۱ نمودار تغییرات کسر جرمی گونه‌ی NOx را نشان می‌دهد همانگونه که انتظار می‌رود با کاهش دمای ماکزیمم، میزان NOx خروجی کاهش پیدا می‌نماید. نکته قابل توجه در این مسأله این است که با در نظر گرفتن تخلخل به صورت تابعی بر حسب طول مشعل مقدار NOx تولیدی کاهش خواهد یافت و به تبع آن مقدار این آلاینده در خروجی تقریباً معادل با کاهش دمای ماکزیمم، کاهش پیدا خواهد نمود.

شکل (۱۱) نمودار تغییرات کسر جرمی گونه‌ی

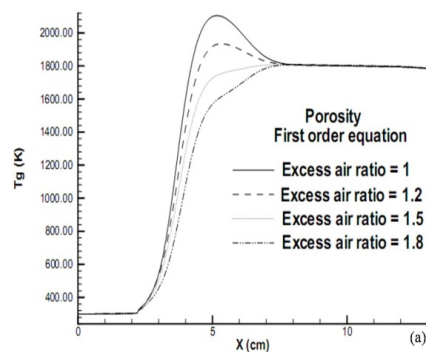
NOx با استفاده از سینتیک GRI-3.0



در کنار مزیت‌هایی که ذکر شد این کار معایبی نیز دارد که از آن جمله می‌توان به مسأله‌ی افت فشار بیشتر اشاره نمود. شکل ۱۲ نمودار افت فشار در طول مشعل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل افزایش افت فشار مقدار بسیار ناچیز و در حدود ۰/۰۰۰۱٪ و قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

شکل (۱۲) نمودار افت فشار برای مقایسه حالات

تخلخل ثابت و متغیر

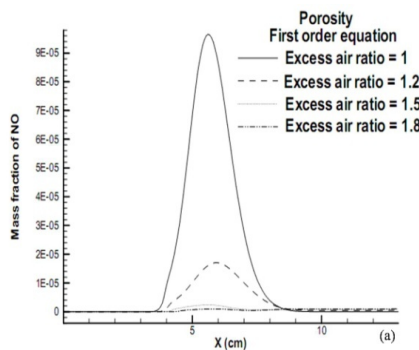


بررسی پارامتریک

بررسی اثرات نسبت هوای اضافی

همانطوری که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هوای اضافی مقدار دمای ماکزیمم کاهش پیدا می‌کند علت این امر را می‌توان این گونه توضیح داد، با افزایش نسبت هوای اضافی، نرخ جریان افزایش پیدا می‌کند و این امر سبب می‌شود مواد متخلخل در منطقه‌ی بالادست بهتر خنک شود و سبب می‌شود جبهه‌ی شعله به سمت پایین دست جریان حرکت کند و مقدار دمای ماکزیمم کاهش پیدا نماید.

شکل (۱۳)

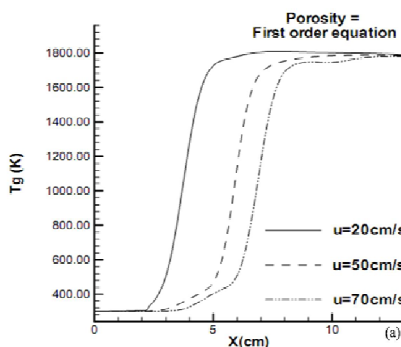


اثرات نسبت هوای اضافی بر روی دمای گاز

شکل ۱۴ اثرات نسبت هوای اضافی را بر روی میزان انتشار NO_x نشان می‌دهد. با توجه به اینکه با افزایش نسبت هوای اضافی مقدار دمای ماکزیمم کاهش پیدا می‌کند میزان انتشار NO_x نیز کاهش پیدا می‌کند.

شکل (۱۴) اثرات نس

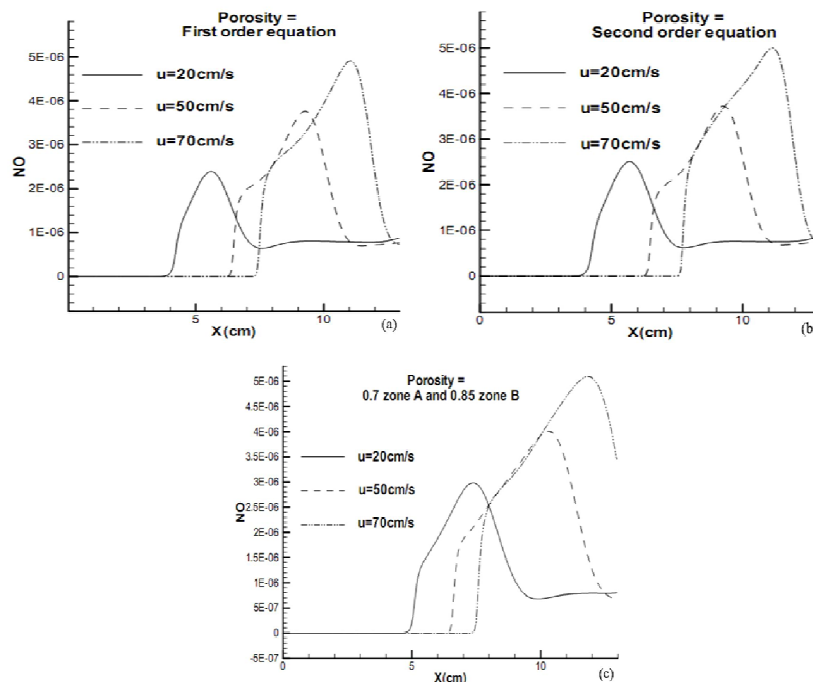
توزیع کسر جرمی O_2



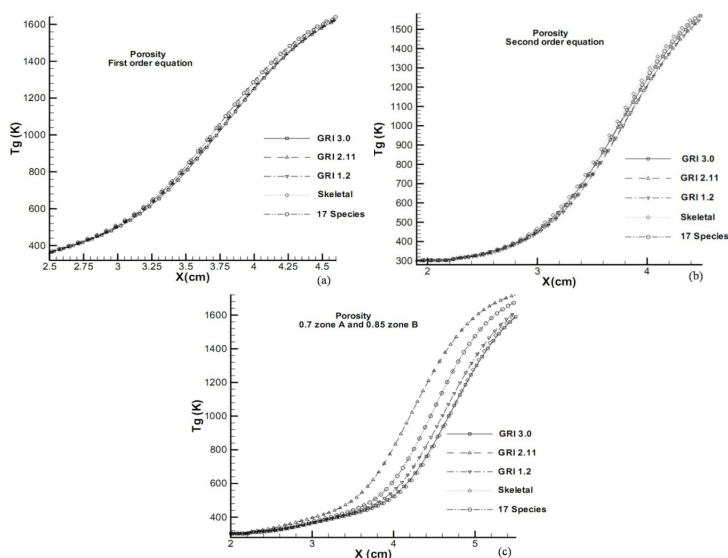
بررسی اثرات تغییر سرعت ورودی

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت ورودی ماکزیمم دمای گاز کاهش پیدا می‌کند. و به تبع آن میزان انتشار NO_x کاهش می‌یابد. تولید بیشتر NO_x در سرعت‌های بالاتر را می‌توان اینگونه توضیح داد که در سرعت‌های بالاتر عدم تعادل حرارتی سبب تولید بیشتر NO_x می‌شود و در ضمن در سرعت‌های بالاتر چون فرصت کافی برای مکانیزم‌های برگشت وجود ندارد، سبب می‌شود که میزان این آلایند در خروجی افزایش پیدا کند. میزان انتشار این آلایند در شکل ۱۶ نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت تخلخل ثابت دو ناحیه‌ای میزان انتشار این آلایند بیشتر خواهد بود.

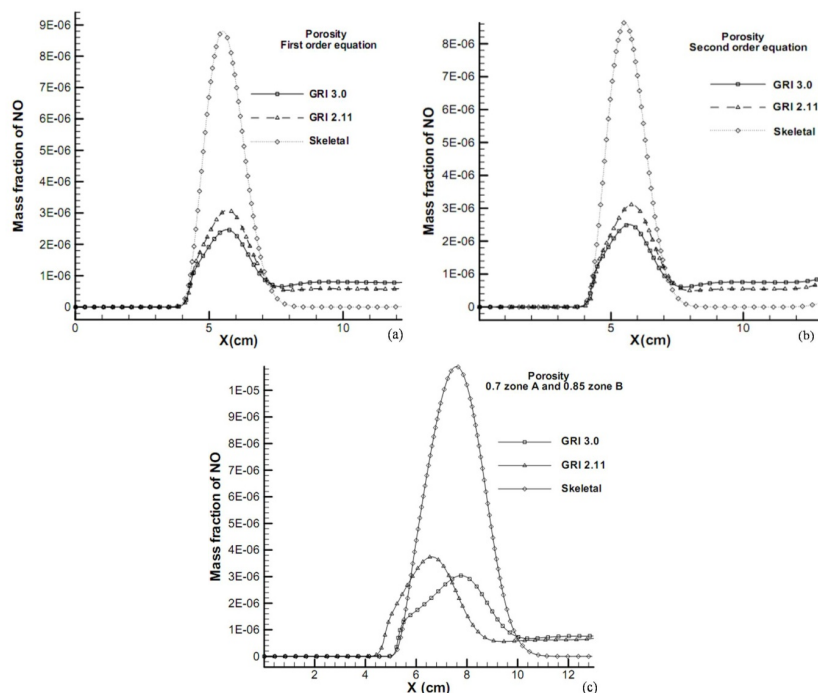
شکل (۱۵) اثرات تغییر سرعت ورودی بر روی دمای گاز



شکل (۱۶) اثرات تغییر سرعت ورودی بر روی انتشار آلایند NO_x



شکل (۱۷) اثرات تغییر سینتیک شیمیایی بر روی پروفیل دمای گاز



شکل (۱۸) اثرات تغییر سینتیک شیمیایی بر روی انتشار آلایندگی NO_x

بررسی اثرات تغییر سینتیک شیمیایی

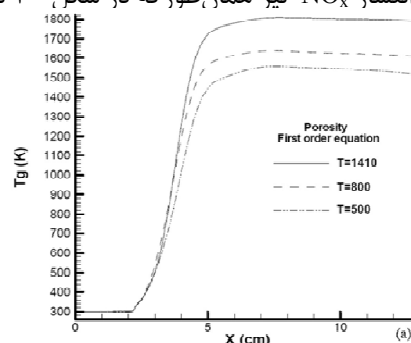
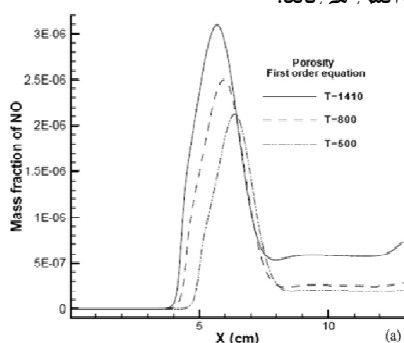
در این مقاله برای شبیه‌سازی واکنش‌های شیمیایی از پنج مکانیزم احتراقی که شامل GRI 1.2 (۳۲ گونه و ۱۷۷ واکنش شیمیایی)، GRI 2.11 (۴۹ گونه و ۲۷۹ واکنش شیمیایی)، GRI 3.0 (۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش شیمیایی)، اسکلتال (۲۷ گونه و ۷۷ واکنش شیمیایی) و مکانیزمی با ۱۷ گونه و ۵۸ واکنش شیمیایی است، استفاده شده است همانگونه که در شکل ۱۷ نشان داده شده است هنگامی که از تخلخل متغیر حالات (a,b) استفاده می‌شود مقدار اختلاف دمای ناشی از هر ۵ سینتیک شیمیایی بسیار ناچیز می‌باشد در حالی که هنگامی که از تخلخل ثابت استفاده می‌کنیم این اختلاف بیشتر خواهد شد. هنگامی که از تخلخل ثابت دو ناحیه‌ای استفاده می‌شود، نتایج ناشی از GRI 3.0 و GRI 2.11 دارای دقت تقریباً یکسان و سینتیک‌های اسکلتال و ۱۷ جزئی نیز دارای دقت نزدیک به هم می‌باشند.

شکل ۱۸ نمودار کسر جرمی NO_x را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مکانیزم اسکلتال میزان انتشار NO_x را در خروجی از مشعل صفر پیش‌بینی نموده، در حالی که مکانیزم‌های دیگر در رنجی نزدیک 10^{-6} پیش‌بینی می‌کنند. علت این امر به دلیل عدم پیش‌بینی صحیح مکانیزم‌های مربوط به گونه‌ی NO در سینتیک اسکلتال می‌باشد.

بررسی اثرات تغییر دمای دیواره

همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود با افزایش دمای دیواره، ماکزیمم 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 کرده و دمای گاز کمتر خنک می شود و در نتیجه مقدار دمای ماکزیمم افزایش پیدا می کند و به تبع آن میزان انتشار NO_x نیز همانطور که در شکل ۲۰ نشان داده شده است، افزایش می یابد.



شکل (۲۰) اثرات تغییر دمای دیواره بر روی انتشار آلاینده NO_x

شکل (۱۹) اثرات تغییر دمای دیواره بر روی دمای گاز

نتیجه گیری

- ۱- با استفاده از پروفیل تخلخل می توانیم مقدار دمای ماکزیمم را برای گاز و ماتریس جامد در حدود ۴/۵٪ کاهش دهیم.
- ۲- با توجه به اینکه مقدار NO_x خروجی از مشعل به دمای ماکزیمم بستگی دارد، کاهش دمای ماکزیمم، باعث کاهش مقدار NO_x 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 ۰/۰۰۱٪ می باشد، می توان از آن صرف نظر نمود.
- ۴- با افزایش نسبت هوای اضافی، جبهه شعله به سمت پایین دست جریان حرکت کرده و ماکزیمم دما کاهش پیدا می کند که این امر باعث کاهش انتشار آلاینده های خروجی نظیر NO_x خواهد شد.
- ۵- با افزایش سرعت ورودی، جبهه شعله به سمت پایین دست جریان منتقل می شود که این امر سبب کاهش دمای ماکزیمم می گردد اما با وجود کاهش دمای ماکزیمم به علت عدم تعادل حرارتی بر میزان تولید آلاینده ها افزوده می شود اما میزان انتشار آن کاهش می یابد.
- ۶- هنگامی که از تخلخل متغیر استفاده می شود نتایج ناشی از هر ۵ سینتیک شیمیایی مورد استفاده تقریباً یکسان خواهد بود و این در حالی است که در حالتی که از تخلخل ثابت دو ناحیه ای استفاده می کنیم اختلاف بین نتایج بهتر دیده می شود و در این حالت سینتیک های GRI 2.11 و GRI 3.0 دارای دقت تقریباً یکسان و نتایج ناشی از سینتیک های اسکاتال و ۱۷ جزئی نیز بسیار به هم نزدیک خواهند بود.
- ۷- با افزایش دمای دیواره، به علت نزدیک شدن به حالت آدیاباتیک، دمای ماکزیمم به شدت افزایش یافته و این امر به نوبه خود سبب افزایش NO_x خواهد شد.

تشکر و قدر دانی

این مقاله با حمایت شرکت بهینه سازی مصرف سوخت انجام شده است و از تمامی مسئولان این شرکت کمال تشکر را دارم.

منابع

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] MALICO, I. "Two-dimensional Numerical Study and pollutants Formation in P.M." combust. Sci. and Tech, vol. 152, pp 57-79, 1999.
- [5] Chung-jen Tseng, "Effect of Hydrogen addition on methane combustion in a porous medium burner" International journal of Hydrogen Energy 27, pp.699-707, 2002.
- [6] Lari K., Ganjalikhan Nassab S.A., "Transient thermal characteristics of porous radiant burners". Iranian Journal of Science and Technology, transaction b:engineering Vol.31, number b4, 407-420, 2007.
- [7] 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.
- [۸] 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.
- [9] Donald A. Neild and adrian Bejan, "Convection in Porous Media", Third Edition
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Vafai, K, Handbook of Porous Media, Taylor & Francis Group, LLC, 2005.
- [13] 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.
- [14] Kee, R, J, Rupley, F, M, and Miller, J, A, The Chemkin Thermodynamic Data Base. Sandia National Laboratories. Rept. SAND-8215B, 1992.
- [15] 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)
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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>.
- [20] Durst, and Trimis, D., "Compact Porous Medium Burner and Heat Transfer Exchanger for Household Applications" Ec project report, Contact no. JOEC-CT95-0019, 1996.