بررسي عددي انتشار آلاينده هاي احتراق هوا- متان در يک مشعل محيط متخلخل

مسعود ضياء بشرحق[i]؛ رضا ابراهيمي[ii]؛ محمدرضا رجائي[iii]

چکيده

در مشعل‌هاي محيط متخلخل دماي ناحيه احتراق در مقايسه با مشعل‌هائي که شعله آزاد دارند، پائين تر است، که اين امر باعث کاهش انتشار NOx در اين مشعل‌ها مي‌شود. به علاوه، چون محيط متخلخل سبب مي‌شود که فرصت کافي براي احتراق وجود داشته باشد، انتشار CO و هيدروکربن‌هاي نسوخته نيز کاهش مي‌يابند. در اين پژوهش، ميزان انتشار آلاينده‌ها در يک مشعل متخلخل يکپارچه با مبدل حرارتي با توان ۵ kW مورد بررسي قرار گرفته است. معادلات ناويراستوکس، انرژي و بقاي اجزاء شيميائي در يک محيط متخلخل با فرض تعادل حرارتي موضعي بين فازهاي جامد و گاز، حل شده است. ميدان دماي دو بعدي و غلظت اجزاء شيميائي براي احتراق پيش مخلوط هوا- متان ارائه شده و تأثير هواي اضافي بر روي انتشار CO و NO مورد بررسي قرار گرفته است. مقادير پيش بيني شده براي CO و NO تطابق قابل قبولي با نتايج آزمايشگاهي داشته و همچنين از لحاظ کمي و کيفي به برخي از مدل سازي‌ها برتري دارد.

كلمات كليدي

احتراق، آلاينده ها، محيط متخلخل، مدل سازي عددي و هوا- متان

An Investigation of Pollutants Emission of Methane-Air Combustion in Porous Burners (PBs), from the view point of numerical modeling

Ziabasharhagh, M.; Ebrahimi, R.; Rajaei, M. R.

ABSTRACT

Combustion zone temperature in porous burners (PBs) is lower than free flame burners, which leads to a reduction in NOx emission. Furthermore, because of enough resident time for complete combustion, amount of CO emission will be reduced. In this research, pollutant emissions are investigated for a 5 kW porous burner integrated with a heat exchanger. Navier-Stockes, energy and the chemical species transport equations in a porous media with local thermal equilibrium assumption between the solid and gas are solved. 2D temperature field and species concentrations are presented in the premixed methane - air combustion. The effect of excess air on CO and NO emission are investigated. Results are acceptable with comparison of experimental data, also the results of this simulation are better than some simulations in quantitative and qualitative sense.

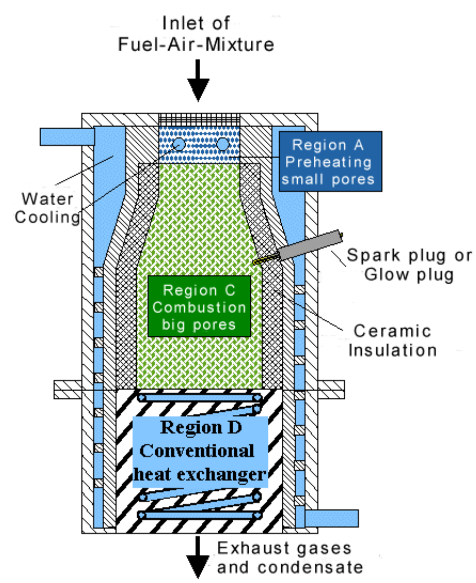
[i] استاديار دانشكده مهندسي مكانيک دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي؛ تهران، ميدان ونك، خيابان پرديس، پلاك ١٧؛ Email: mzia@kntu.ac.ir
[ii] استاديار دانشكده مهندسي هوافضا دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي؛ Email: rebrahimi@kntu.ac.ir
[iii] كارشناسي ارشد مهندسي مكانيک دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي؛ Email: m.r.rajaei@nioc.org

KEYWORDS

Combustion, Pollutants, Porous Media, Numerical Modeling and Methane-Air

۱- مقدمه

امروزه کنترل و کاهش میزان آلاینده‌هاي خروجي از دستگاه‌هاي احتراقي در جهت حفظ منابع طبيعي و پاكيزگي محيط زيست به عنوان عاملي مهم در طراحي اين دستگاه ها به شمار ميرود. از اين رو در دهه اخير، روشهاي زيادي به منظور كم كردن ميزان آلاينده‌هاي دستگاه هاي احتراقي ابداع شده است. يكي از اين روش‌ها، تكنيک احتراق در محيط متخـلخل مي‌باشد. در شعله‌هاي پيش مخلوط آزاد آرام، سرعت شعله و در نتيجه پايداري شعله و نرخ حرارت رها شده بر واحد سطح ورودي در يک سوخت معين، وابسته و محدود به هدايت حرارتي و تشعشع حرارتي مخلوط گاز مي‌باشد. در مشعلهاي شعله آزاد، درجه حرارت به طور موضعي به دليل ناكافي بودن دفع حرارت از ناحيه واكنش، بالا مي‌باشد. اين امر سبب افزايش تشكيل NOx مي‌شود. با قرار دادن يک ماتريس متخلخل در محفظه احتراق، دفع حرارت از ناحيه واكنش بهتر انجام شده و از افزايش موضعي درجه حرارت جلوگيري و به تبع آن تشكيل NOx كاهش مي‌يابد. شكل (۱) نمونه‌اي از اين مشعل ها را نشان مي‌دهد.



شكل (۱): يک نمونه مشعل متخلخل [۱۵]

در اين مشعل پيش مخلوط سوخت و هوا ابتدا وارد ناحيه پيش گرمايش (A) مي‌شود. چون دماي مواد جامد بالاتر از دماي گازهاي ورودي است، گازهاي پيش مخلوط در حين عبور از خلل و فرج مواد متخلخل به واسطه انتقال حرارت جابجائي پيش گرم شده و به دماي اشتعال نزديک مي‌شوند. در اين هنگام گازهاي پيش مخلوط وارد ناحيه احتراق (C) شده و واكنش‌هاي شيميائي فعال مي‌شود. قسمت زيادي از گرماي واكنش، عمدتا" به وسيله انتقال حرارت تشعشعي و هدايت حرارتي از طريق مواد جامد به ناحيه پيش گرمايش (A) منتقل مي‌شود و باقيمانده گرماي واكنش از طريق مواد جامد و گازهاي محصولات احتراق به پائين دست جريان منتقل مي‌شود. در پائين دست جريان معمولا" يک مبدل حرارتي (ناحـيه D) به منـظور جـذب حـرارت توليـد شده قـرار داده مي‌شود. اين مبدل با گردش آب، گرماي واكنش و در بعضي از شرايط با تقطير بخار آب موجود در محصولات احتراقي، گرماي نهان تقطير آب را نيز جذب مي‌نمايد.

مزاياي متعدد احتراق در محيط متخلخل از جمله افزايش سرعت و پايداري شعله، افزايش نرخ حرارت رها شده بر واحد سطح و كاهش تشكيل NOx از نتايج مستقيم مكانيزم احتراقي ياد شده مي باشد. به علاوه چـون محيـط متخلـخل سبب مي شود كه فرصت كافي براي احتراق وجود داشته باشد و اختلاط بسيار مناسبي از گازهاي احتراق ايجاد شود، انتشار CO و هيدروكربن‌هاي نسوخته نيز كاهش مي‌يابد.

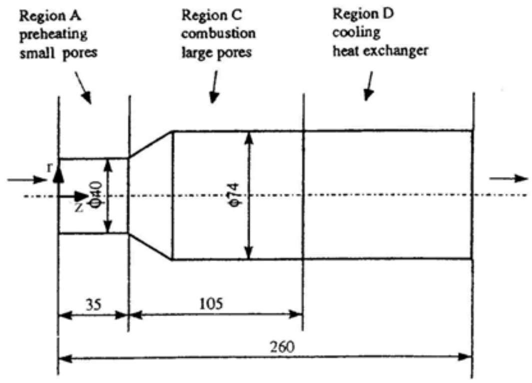
در سال‌هاي اخير، مطالعات گسترده‌اي در اين زمينه انجام شده است. از آنجا كه مدل سازي عددي، كمک مؤثري به توسعه و بهينه نمودن و طراحي اين تكنيک و به خصوص مشعل‌هاي متخلخل مي‌كند، مدل‌هاي عددي متفاوتي ارائه شده است. اغلب اين مدل‌ها يک بعدي است و به بررسي سرعت و پايداري شعله و مكانيزم انتقال حرارت اختصاص يافته است. ابراهيمي و همكارانش [۱] يک مدلسازي دو بعدي با واكنش تک قدمي برگشت ناپذير انجام داده‌اند. استفاده از واكنش عمومي تک قدمي اگرچه براي بسط فرآيند احتراق، روشي ساده و از لحاظ كامپيوتري ارزان قيمت است و سرعت شعله را نسبت به سينتيک چند مرحله‌اي، دقيق تر پيش بيني مي‌كند، ليكن اين روش در ارائه ميزان انتشار آلاينده ها ناكارآمد است و بايد از سينتيک چند مرحله‌اي استفاده شود. پريرا و همكارانش [۱۲] از اولين كساني هستند كه مدل‌هايي عددي براي تعيين ميزان انتشار آلاينده‌ها در محيط متخلخل ارائه داده اند، البته در اين پژوهش‌ها، جريان يک بعدي فرض شده است. محمد و همكارانش [۸] يک مدل دو بـعدي (كارتـزين) ارائــه داده‌اند. آنها مشعل متخلخل همگني را كه توسط لوله‌هاي خنک كننده محصور شده بود، مدل نمودند.

در کار حاضر یک هندسه متقارن محوري دو بعدي بر اساس مشعل متخلخل آزمايشي دورست و همکارانش [۲] که متصل به یک مبدل حرارتي است، مدل شده است. اين مشعل قبلا" توسط ماليکو و همکارانش [۶] مدل سازي گرديده، ليکن آنها در تعيين ميزان انتشار آلاينده ها چندان موفق نبودند زيرا محاسبات آنها ميزان انتشار CO را کمتر و ميزان انتشار NO را بيشتر از مقادير آزمايشگاهي نشان مي‌داد. آنها با فرض عدم تعادل موضعي بين فازهاي جامد و گاز دو معادله انرژي جداگانه براي اين دو فاز در نظر گرفتند. اين محققين از روش گام زماني و یک روش عددي بر مبناي دو تکه کردن معادلات انرژي فاز گاز و بقاي اجزاء شيميائي، استفاده نمودند. اين روش باعث کوپلينگ ضعيف معادلات شده و زمان محاسبات را افزايش مي‌دهد. بدين جهت آنها در عمل نتوانستند به یک همگرايي مناسب دست يابند. براي غلبه بر اين محدوديت در پژوهش حاضر، معادلات انرژي و بقاي اجزاء شيميائي به صورت یکپارچه حل شده‌اند و با فرض تعادل حرارتي موضعي بين فاز جامد و گاز، یک معادله انرژي براي اين محيط حل شده و از یک ضريب هدايت حرارتي مؤثر که به روش معکوس به دست آمده [۱۳] ، استفاده شده است.

تعادل حرارتي موضعي بين فازهاي جامد و گاز، استفاده از یک ضريب هدايت حرارتي مؤثر، به کار گرفتن مکانيزم کاهش يافته (پنج واکنش، هفت جزء شيميائي) که سبب کاهش زمان محاسبات مي‌شود و در نهايت حل یکپارچه معادلات انرژي و بقاي اجزاء شيميائي از نوآوري‌هاي پژوهش حاضر نسبت به کارهاي قبلي به شمار مي‌رود.

۲- مدل فيزيکي

در اين پژوهش یک مشعل متخلخل نمونه که در دانشگاه ارلنگن- نورنبرگ توسط دورست و همکارانش [۲] LSTM آزمايش و توسعه داده شده (شکل ۲) به صورت کامپيوتري شبيه سازي شده و نتايج آن با آزمايشات آنها مقايسه شده است.



شکل (۲): شماتيک مشعل متخلخل [۲]

اين مشعل از سه قسمت پيش گرمايش (A)، ناحيه احتراق (C) و مبدل حرارتي (D) تشکيل شده است. ساختار خلل و فرج‌ها در قسمت‌هاي مختلف اين مشعل به گونه اي طراحي شده است که در ناحيه (A) و (D) شعله منتشر نمي‌شود و تنها در ناحيه (C) امکان انتشار شعله وجود دارد. ناحيه پيش گرمايش و مبدل حرارتي از گوي‌هاي ناپيوسته اکسيد آلومينيوم با قطرهاي ۳ الي ۵ ميلي متر تشکيل شده است. طول ناحيه (A) ۳۵ ميلي متر و قطر آن ۴۰ ميلي متر است. پيش مخلوط سوخت و هوا پس از پيش گرمايش در ناحيه (A) از طريق یک نازل واگرا وارد ناحيه احتراق مي‌شود. ناحيه احتراق که شامل ديفيوزر و یک لوله با مقطع ثابت است، از فوم سراميکي SiC با نسبت تخلخل ۱۰ppi (تعداد سوراخ‌ها در یک اينچ) تشکيل شده است. حداکثر قطر داخلي اين ناحيه ۷۴ ميلي متر و طول آن ۱۰۵ ميلي متر است. در پايان، محصولات احتراق وارد ناحيه(D) با طول ۱۲۰ ميلي متر مي‌شوند. ديواره‌هاي مشعل با آب، خنک مي‌شود، ليکن براي داشتن احتراق کامل و دائمي، دور تا دور ناحيه احتراق و ورودي با استوانه سراميکي عايق شده است.

۳- معادلات اساسي

با فرض جريان دائم، آرام و نيوتني در یک محيط ايزوتروپ و بدون کاتاليست براي تمام مناطق مشعل، معادلات حاکم بر جريان و انتقال حرارت محيط متخلخل را مي‌توان به صورت روابط (۱) تا (۵) نوشت:

معادله پيوستگي

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}=0 \qquad (۱)$$

معادلات اندازه حرکت در دو امتداد محوري و شعاعي

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j u_i - \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\Delta P}{\Delta X_i} \qquad (۲)$$

معادله انرژي

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j c_p T - \lambda_{eff,j} \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) = \varphi \sum_{k=1}^{N_s} \dot{\omega}_k h_k W_k \qquad (۳)$$

معادله انتقال اجزاء شيميائي

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j Y_k - \varphi \rho D_{km} \frac{\partial Y_k}{\partial x_j}\right) = \varphi \dot{\omega}_k \;\; , \;\; k=1,2,...,N_s \qquad (٤)$$

معادله حالت

$$\rho = \frac{\overline{W} P}{R_u T} \qquad \overline{W} = \sum_{k=1}^{N_s} X_k W_k \qquad (۵)$$

φ ضريب تخلخل، Y كسرجرمي، $\dot{\omega}_k$ ترم چاه يا چشمه اجزاء شيميائي، D_{km} ضريب نفوذ جزء k ام در مخلوط و h آنتالپي است. از انتقال انرژي در اثر نفوذ اجزاء شيميائي صرف نظر شده است. $\Delta P/\Delta X_i$ افت فشار ناشي از ماتريس متخلخل است که براي محاسبه آن از مدل ارگان [۳] که توسط مک دونالد و همکارانش [۵] اصلاح شده، استفاده شده است.

معادله انرژي بر مبناي تعادل حرارتي موضعي بين فاز جامد و گاز نوشته شده است. در اين معادله براي انتقال حرارت بين جامد و گاز پارامتري بنام ضريب هدايت حرارتي مؤثر λ_{eff} تعريف شده است. ضريب هدايت حرارتي مؤثر مانند ضريب هدايت حرارتي مولكولي به كار گرفته مي‌شود، با اين تفاوت كه اين پارامتر شامل مكانيزم‌هاي مهم انتقال انرژي در محيط متخلخل مي‌باشد. پن و همكارانش [۱۰] به طور آزمايشگاهي رابطه‌اي را براي ضريب هدايت حرارتي مؤثر تعيين نموده‌اند. آنها پروفيل درجه حرارت را در يک محيط متخلخل براي شرايط دائمي و به ازاي دبي‌ها و درجه حرارتهاي ورودي مختلف اندازه گيري و از روش معكوس، ضريب هدايت حرارتي مؤثر را تخمين زدند. در روش معكوس، آنها ابتدا يک مقدار، براي هدايت حرارتي مؤثر شعاعي و محوري حدس زدند. سپس پروفيل درجه حرارت در محيط متخلخل را با فرض تعادل حرارتي موضعي با استفاده از يک كد حجم محدود محاسبه نمودند. آنها اين كار را تا زماني كه خطاي بين ميدان اندازه گيري شده و شبيه سازي شده، حداقل شود ادامه دادند. اين روند باعث مي شود كه رابطه اي براي ضريب هدايت حرارتي مؤثر به صورت تابعي از سرعت جريان (نُرم) و درجه حرارت به دست آيد. اين ضريب براي ساختار اكسيد آلومينيوم و SiC در جدول (۱) ارائه شده است.

براي محاسبه خواص ترموديناميكي از معادلات چند جمله اي كد تعادل شيميائي ناسا [۴] استفاده شده است. كليه خواص انتقالي از جمله ضريب لزجت و ضريب نفوذ، غير ثابت فرض شده است [۱۴].

٤- مكانيزم شيميائي احتراق

در اين تحقيق از مكانيزم عمومي پنج قدمي اكسيداسيون متان همراه با تشكيل NO استفاده شده است. اين مكانيزم داراي دقت بسيار بالائي است و توسط نيكول و همكارانش [۹] ارائه شده است. مكانيزم يادشده شامل پنج واكنش شيميائي و هفت جزء شيميائي مهم N_2، CH_4، O_2، CO_2، H_2O، CO و NO مي باشد كه در جدول (۲) قابل ملاحظه است.

۵- شرايط مرزي

در ورودي جريان، سرعت، دما و غلظت اجزاء شيميائي مشخص است. در مقطع خروجي فرض مي‌شود كه گراديان غلظت اجزاء شيميائي صفر است و جريان به محيطي با فشار معين تخليه مي‌شود. سرعت محوري با استفاده از برآورده شدن معادله پيوستگي در سلول خروجي به دست مي‌آيد. گفتني است كه در كار حاضر فقط نواحي پيش گرمايش و ناحيه احتراق مدل شده است. بنابراين، مي‌بايستي به ترتيب مناسبي، تأثير مبدل حرارتي بر روي ميدان حل، مدل سازي شود. به دليل آنكه در خروجي ناحيه احتراق چاه حرارتي ناشي از تشعشع حرارتي جامد به مبدل حرارتي، قابل ملاحظه است، مي‌توان در خروجي ناحيه احتراق يک تشعشع حرارتي از جامد به مبدل حرارتي لحاظ نمود. در اين مدل سازي مبدل حرارتي، يک جسم سياه با درجه حرارت معين در نظر گرفته شده است. چون خواص تشعشعي محيط متخلخل علاوه بر وابستگي به مواد جامد، به ساختار اين محيط نيز وابسته است، بنابراين، براي رسيدن به بهترين شبيه سازي از نتايج آزمايشگاهي محاسبه ضريب صدور استفاده شده است. در كار حاضر از ضريب صدور مرجع [۷] استفاده شده است. رابطه ضريب صدور در جدول (۱) ارائه شده است. بر روي خط مركزي شرط تقارن و در روي سطح ديواره‌ها شرط عمومي عدم لغزش و عدم نفوذپذيري در معادلات اندازه حركت لحاظ شده است و گراديان كسر جرمي در امتداد عمود بر سطح صفر درنظر گرفته شده است..

۶- مدل عددي

براي محاسبه ميدان جريان از روش حجم محدود و الگوريتم سيمپل [۱۱] که روشي نيمه ضمني است، استفاده شده است. معادلات (۱) الي (۴) را مي‌توان به صورت کلي معادلات بيضوي نوشت.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j \Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j}\right) = S_\Phi \qquad (۶)$$

ميدان حـل به وسـيله شبکه‌هاي با سازمان با المان‌هاي چهار ضلعي (۱۴۰*۳۷) تقسيم بندي شده است (در اين تعداد شبکه حل غير وابسته به تعداد المانهاي موجود شبکه است).

از آن جائي که جمله چشمه در معادله انرژي به درجه حرارت و در معادله بقاي اجزاء شيميائي به کسر جرمي اجزاء وابسته است، مي‌بايستي اين وابستگي به يک شکل خطي بيان شود. جـمله‌هاي چشـمه اغلـب موجب واگـرائي مي‌شوند و عموماً رسيدن به جواب همگرا شده بستگي به درست خطي کردن جمله چشمه دارد. در روش عددي حاضر، جمله چشمه معادله انرژي به صورت رابطه (۷) خطي شده است.

$$S = S_c + S_p T_p \qquad (۷)$$

براي محاسبه S_p در آغاز بايد قاعده اصلي منفي بودن اين جمله رعايت شود، سپس چون در پايان قصد حل معادله انفصال [۱۱]

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b \qquad (۸)$$

با ضرايب

$$b = S_c r_i \Delta r \Delta z \qquad (۹)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S - S_p r_i \Delta r \Delta z \qquad (۱۰)$$

وجود دارد، بهتر است بزرگي S_p برابر بزرگي ديگر ضرايب معادله انفصال (۸) در نـظر گرفته شود. اين کار سـبب مي‌شود که بزرگي تمام ضرايب يکسان شود و مشکلاتي که در اثر غـالب بودن S_p به وجود مي‌آيد، مرتفع شود. بنـابراين، براي به دست آوردن S_p مي‌توان چنين عمل نمود.

$$S_\circ = \mathrm{Max}\,(a_E, a_W, a_S, a_N) \qquad (۱۱)$$

$$S_p r_i \Delta r \Delta z = -\left| S_\circ \right| \qquad (۱۲)$$

در نتيجه،

$$S_p = -\frac{\left| S_\circ \right|}{r_i \Delta r \Delta z} \qquad (۱۳)$$

$$S_c = S^* - S_p T_P^* \qquad (۱۴)$$

علامت * نشان دهنده مقادير تکرار قبل مي‌باشد.

براي خطي کردن جمله چشمه معادله بقاي اجزاء شيميائي از روشي استفاده شده است که کسر جرمي بين حدود منطقي، يعني صفر و يک باقي بماند. با فرض

$$S = S_c + S_p Y_p \qquad (۱۵)$$

مقادير S_c و S_p از روابط

$$\bar{Y}_P = 1 \qquad S^* > 0 \qquad (۱۶)$$

$$\bar{Y}_P = 0 \qquad S^* < 0 \qquad (۱۷)$$

$$S_c = \frac{S^* \bar{Y}_P}{\bar{Y}_P - Y_P^*} \qquad (۱۸)$$

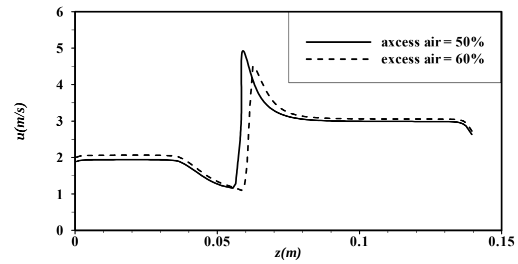
$$S_p = -\frac{S^*}{\bar{Y}_P - Y_P^*} \qquad (۱۹)$$

محاسبه شده‌اند.

۷- نتايج و بحث

۷-۱- سرعت محوري

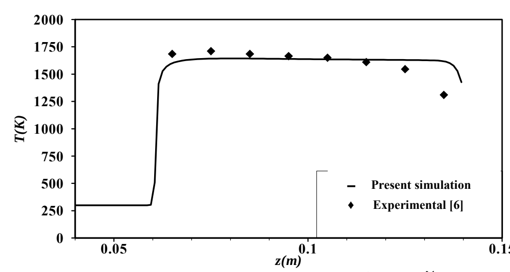
در شکل (۳) تغييرات سرعت محوري روي خط تقارن نشان داده شده است. در روي جبهه شعله سرعت حدوداً ۲/۵ برابر سرعت ورودي افزايش يافته است. چون چگالي گاز به دليل افزايش دما، روي جبهه شعله کاهش مي‌يابد، در نتيجه با توجه به ثابت بودن دبي جـرمي، سـرعت روي جبـهه شعـله افـزايش مي‌يابد. اين افزايش سرعت، منطقي مي‌باشد. چون در روي خط مرکزي، جريان گاز عمود بر جبهه شعله مي‌باشد، سرعت گاز همان سرعت شعله مي‌باشد، بنابراين، سرعت شعله براي ۶۰ درصد هواي اضافي در حدود ۱۰۹ cm/s پيش بيني شده است که اين مقدار نزديك ۶ برابر سرعت شعله آزاد آرام با ۶۰ درصد هواي اضافي (۱۷cm/s [۱۴]) مي‌باشد. که از مزاياي احتراق در محيط متخلخل است. ابراهيمي و همکارانش [۱] بطور مشروح در مورد دلايل اين افزايش بحث نموده‌اند.



شكل (۳): تغييرات سرعت محوري روي خط مركزي براي توان kW ۵ و ۵۰% و ۶۰ هواي اضافي

۷-۲- درجه حرارت

شكل (۴) مقايسه بين نتايج آزمايشگاهي دورست و تريميس [۲] و داده‌هاي پيش بيني شده را براي درجه حرارت خط تقارن نشان مي‌دهد. درجه حرارت‌هاي پيش بيني شده در منطقه ورودي به مبدل حرارتي چندان با نتايج آزمايشگاهي مطابقت ندارد. اين عدم تطابق بدين دليل است كه در ناحيه خروجي مشعل، مبدل حرارتي تنها به صورت يک چاه حرارتي مدل شده است، كه براي رسيدن به نتايج بهتر مي‌بايستي مبدل حرارتي نيز مدل شود.

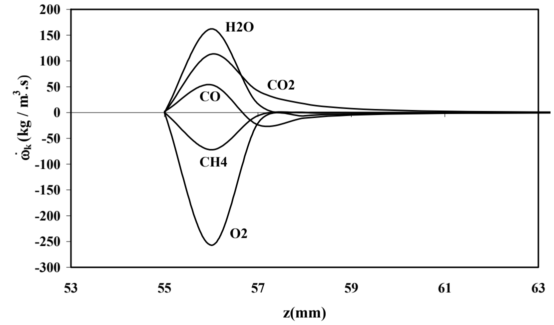


شكل (۴): نتايج آزمايشگاهي [۲] و عددي درجه حرارت خط مركزي براي توان kW ۵ و ۶۰% هواي اضافي

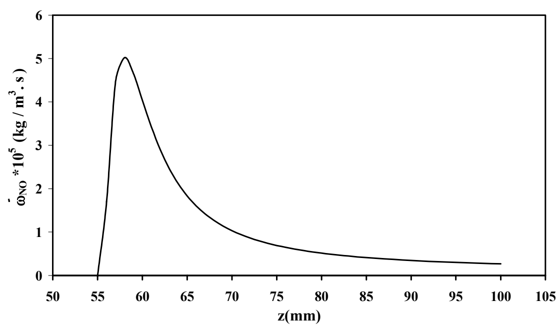
در شكل (۵) كه در انتهاي مقاله آمده است كانتور درجه حرارت براي ۶۰ درصد هواي اضافي و توان ۵kW ارائه شده است.

۷-۳- كسر جرمي

شكل (۶) و (۷) منحني تغييرات غلظت اجزاي شيميائي بر روي خط مركزي را نـشان مي‌دهد.

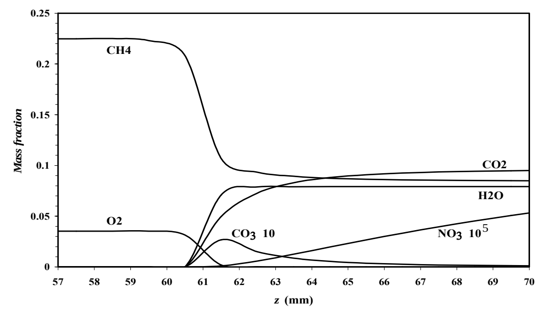


شكل (۶): منحني تغييرات غلظت اجزاء شيميائي بر روي خط مركزي و براي توان kW ۵ و ۴۵% درصد هواي اضافي



شكل (۷): منحني تغييرات غلظت NO بر روي خط مركزي و براي توان kW ۵ و ۴۵% درصد هواي اضافي

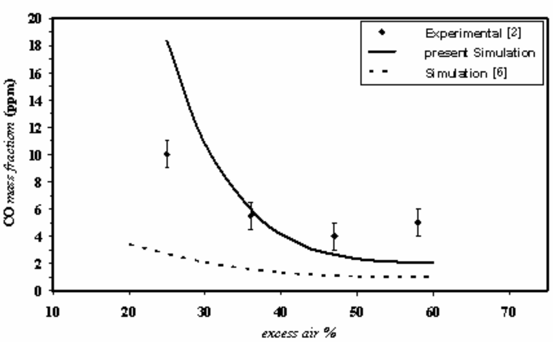
در شكل (۸) كسر جرمي اجزاي شيميائي در روي خط مركزي و نزديک و روي جبهه شعله ارائه شده است. همان طور كه ملاحظه مي‌شود واكنشهاي شيميائي حدوداً در ۶۰ ميلي متري ورودي فعال مي‌شوند. نكته قابل توجه در اشكال (۶)، (۷) و (۸) آن است كه كسر جرمي CH_4 در طول ۲ ميلي متر به سرعت كاهش و كسر جرمي H_2O در طول ۲ ميلي متر به سرعت افزايش مي‌يابد، و ليكن كسر جرمي ديگر اجزاء شيميائي و به خصوص كسر جرمي NO، با سرعت كمتري تغيير مي‌كنند. ديگر نكته قابل ملاحظه در اين شكل تغييرات كسر جرمي CO مي‌باشد. هنگامي كه مخلوط شيميائي فقير باشد، يعني هواي ورودي به سيستم بيشتر از هواي حالت استوكيومتري باشد، مخلوط كاملاً مي‌سوزد و واكنش كامل مي‌شود، در نتيجه CO پس از تشكيل شدن در جبهه شعله از بين مي‌روند. بنابراين، غلظت جزء شيميائي CO پس از توليد در جبهه شعله، به مرور كاهش مي‌يابد. شكلهاي (۹) و (۱۰) كه در انتهاي مقاله آورده شده كانتورهاي كسر جرمي دو آلاينده CO و NO را نشان مي‌دهد.



شکل (۸): کسر جرمي اجزاء نزديک جبهه شعله براي توان ۵ kW و ۶۰% .هواي اضافي (کسر جرمي CO در ده و کسر جرمي NO در صد هزار ضرب شده است)

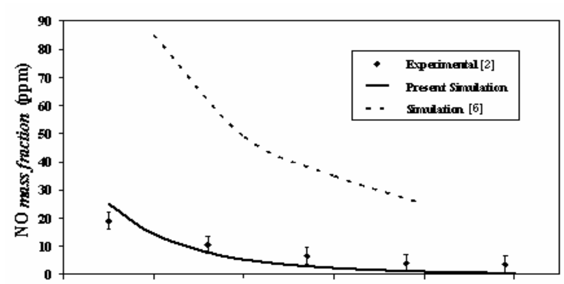
۴-۷- تأثير درصد هواي اضافي بر روي کسر جرمي NO و CO

در شکل (۱۱) و (۱۲) تأثير درصد هواي اضـافي بر روي کـسر جرمي CO و NO نشان داده شده و مقادير پيش بيني شده، با نتايج آزمايشگاهي [۲] و نتايج حل عددي ماليکو و همکارانش [۶] مقايسه شده است.



شکل (۱۱): تأثير درصد هواي اضافي بر روي کسر جرمي CO براي مشعلي با توان ۵ kW

همان طور که ملاحظه مي‌شود نتايج مدل سازي حاضر از لحاظ کمي و کيفي بر مدل سازي [۶] برتري دارد و به طور نسبي مطابقت بسيار خوبي با نتايج آزمايشگاهي دارد.



شکل (۱۲): تأثير درصد هواي اضافي بر روي کسر جرمي NO براي مشعلي با توان ۵ kW

همان طور که ملاحظه مي‌شود با افزايش درصد هواي اضافي، انتشار CO کاهش مي‌يابد، زيرا که مقدار هواي کافي براي احتراق سوخت وجود دارد و بنابراين، ميزان انتشار CO کاهش مي‌يابد و مي‌توان نتيجه گرفت که هيدرو کربنهاي نسوخته نيز کاهش مي‌يابد. افزايش توليد CO در اثر کاهش درصد هواي اضافي در مشعل مورد مطالعه علاوه بر دليل يادشده علت فيزيکي ديگري نيز دارد، همان طور که از شکل (۱) مشخص است، ناحيه (A) از سوراخ‌هاي کوچکي تشکيل گرديده تا از انتشار شعله در اين ناحيه جلوگيري شود. با کاهش درصد هواي اضافي متوسط درجه حرارت ميدان و همچنين حداکثر درجه حرارت ميدان افزايش مي‌يابد، بنابراين، واکنش‌هاي احتراقي سريع‌تر فعال شده و به تبع آن مکان جبهه شعله به بالا دست جريان (ورودي) منتقل مي‌شود، با انتقال مکان جبهه شعله به بالا دست جريان، احتمال تشکيل شعله در ناحيه (A) قوت مي‌گيرد، از طرفي چون احتراق در محيط متخلخلي که داراي سوراخ هاي کوچکي مي‌باشد، سبب عدم تکميل احتراق و در نتيجه افزايش انتشار CO مي‌شود، بنابراين، با تشکيل جبهه شعله در ناحيه (A) انتشار CO افزايش خواهد يافت. بطور خلاصه با کاهش درصد هواي اضافي، مکان جبهه شعله به تدريج به ناحيه (A) منتقل شده و در نهايت انـتشار CO افـزايش مي‌يابد.

نتايج کسر جرمي NO در مدل سازي حاضر، اختلاف ناچيزي با مقادير آزمايشگاهي [۲] دارد، همچنين اين نتايج از لحاظ کيفي روند يکساني با نتايج آزمايشگاهي را نشان مي‌دهد. در واقع چون با افزايش درصد هواي اضافي متوسط درجه حرارت ميدان حل کاهش مي‌يابد، بنابراين، مقدار انتشار NO نيز کاهش مي‌يابد.

۸- خلاصه نتايج

در اين پژوهش احتراق پيش مخلوط هوا - متان در داخل يک مشعل متخلخل به منظور تعيين ميزان آلاينده‌هاي آن، به صورت عددي مورد مطالعه قرار گرفته است. نتايج مهم اين تحقيق را مي‌توان در قالب بندهاي الف تا هـ خلاصه کرد.

الف- از آنجا که با افزايش درصد هواي اضافي، مقدار هواي کافي براي احتراق سوخت وجود دارد ميزان انتشار CO کاهش مي‌يابد که نتايج مـدل سازي نـيز همـين رونـد را نشان مي‌دهد.

ب- در مشعل مورد مطالعه ناحيه (A) از سوراخهاي کوچکي تشکيل شده است، به جهت آنکه احتراق در محيط متخلخلي که داراي سوراخ هاي کوچکي مي‌باشد، سبب عدم تکميل احتراق و

در نتیجه افزایش انتشار CO مي‌شود، باید از عواملي که سبب انتقال مکان جبهه شعله به بالا دست جریان و در نتیجه ناحیه (A) مي‌شود، پرهیز نمود.

ج- با افزایش درصد هواي اضافي تولید NO کاهش مي‌یابد، زیرا با افزایش درصد هواي اضافي، متوسط درجه حرارت میدان حل کاهش مي‌یابد و نظر به دلیل تناسب تولید NO با درجه حرارت، میزان انتشار NO کاهش مي‌یابد.

د- بسبب بزرگي قابل توجه ضریب هدایت حرارتي مؤثر از ضریب هدایت حرارتي گاز در شعله‌هاي آزاد، سرعت سوزش در شعله‌هاي محیط متخلخل بزرگتر از سرعت سوزش در شعله‌هاي پیش مخلوط آزاد مي باشد، این مهم از مزایاي احتراق در محیط متخلخل است و به طراح اجازه مي‌دهد که در شرایط یکسان بتواند مشعل هائي کوچکتر از مشعل‌هاي شعله آزاد طراحي نماید.

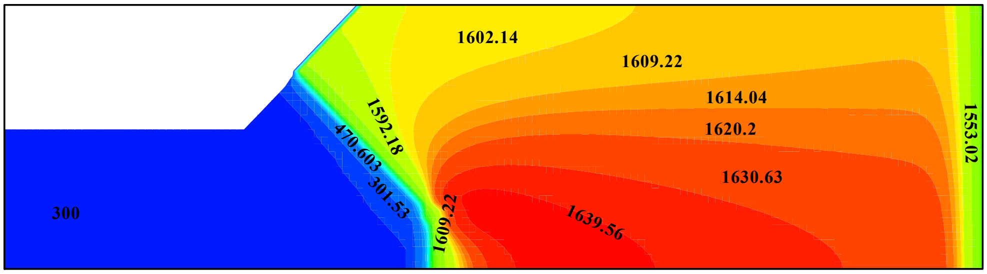
هـ- در مجموع انحراف نتایج این مدلسازي از مقادیر آزمایشگاهي براي کسر جرمي منواکسیدکربن و منواکسیدنیتروژن رضایت بخش مي‌باشد، لیکن براي دسترسي به نتایج مطلوب‌تر، استفاده از مکانیزم‌هاي شیمیائي مناسب در محیط متخلخل مورد نیاز مي‌باشد. باید این نکته را یادآور شد که بخشي از اختلاف بین آزمایشها و روش‌هاي عددي ممکن است ناشي از مسائل اساسي در مدل سازي باشد، از جمله مي‌توان به محدود بودن درک فرآیندهاي مکانیک سیالات، تشعشع و حرارت در محیط متخلخل و همچنین کمبود اطلاعات در زمینه خواص ترموفیزیکي (از قبیل خواص تشعشعي، ضریب انتقال حرارت و ...) اشاره نمود، که کار بیشتري را در این زمینه مي‌طلبد.

جدول (۱): خواص Al_2O_3 و SiC [۱۳] و [۷]

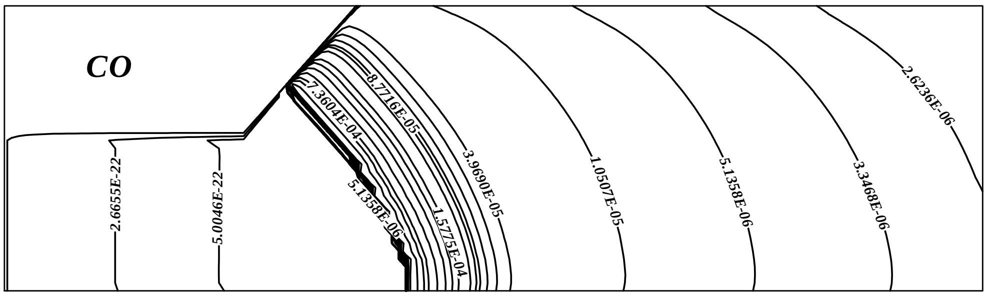
ماده	خواص
Al_2O_3	$\lambda_{eff}/(W/mK) = 0.34691 - 0.00073672\,.[T/K] + 1.2052\times10^{-6}.[T/K]^2 + 0.32345\,.[\lvert \mathbf{v} \rvert/(m/s)]$ $1/E(T) = 1.00713 + 6.14885\times10^{-8}\,.[T/K]^{2.5} - 9.5358\times10^{-10}\,.[T/K]^3$
SiC	$\lambda_{eff}/(W/mK) = 0.31845 - 0.0006257\,.[T/K] + 1.2481\times10^{-6}.[T/K]^2 + 0.32887\,.[\lvert \mathbf{v} \rvert/(m/s)]$ $E(T) = 0.63746 + 6.35787\times10^{-6}.[T/K]^{1.5} - 8.8698\times10^{-8}\,.[T/K]^2$

جدول (۲): مکانیزم اکسیداسیون متان همراه با تشکیل NO، (واحدها کیلو مول، متر مکعب، ثانیه و کلوین مي باشند) [۹]

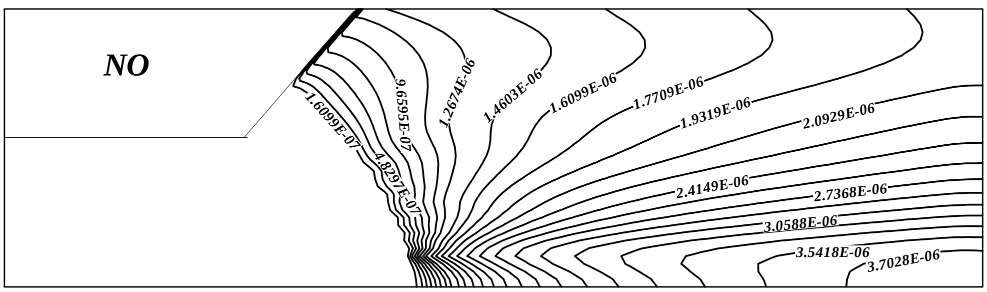
نرخ واکنش	واکنش	
$R_1 = 10^{15.220}\,[CH_4]^{1.460}\,[O_2]^{0.5217}\exp\left(\frac{-20643}{T}\right)$	$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \Rightarrow CO + 2H_2O$	۱
$R_2 = 10^{14.902}\,[CO]^{1.6904}\,[O_2]^{1.570}\exp\left(\frac{-11613}{T}\right)$	$CO + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow CO_2$	۲
$R_3 = 10^{14.349}\,[CO_2]^{1.0}\exp\left(\frac{-62281}{T}\right)$	$CO_2 \Rightarrow CO + \frac{1}{2}O_2$	۳
$R_4 = 10^{23.946}\,[CO]^{0.7211}\,[O_2]^{4.0111}\exp\left(\frac{-53369}{T}\right)$	$N_2 + O_2 \Rightarrow 2NO$	۴
$R_5 = 10^{14.967}\,T^{-0.5}\,[N_2]\,[O_2]^{0.5}\exp\left(\frac{-68899}{T}\right)$	$N_2 + O_2 \Rightarrow 2NO$	۵



شکل (۵): کانتور درجه حرارت براي توان ۵ kW و ۶۰% هواي اضافي



شکل (۹): کانتور کسر جرمي CO براي توان ۵ kW و ۴۰% هواي اضافي



شکل (۱۰): کانتور کسر جرمي NO براي توان ۵ kW و ۴۰% هواي اضافي

۹- مراجع

[۱] ابراهيمي، رضا، ضياء بشرحق، مسعود و رجائي، محمد رضا، بررسي عددي احتراق هوا-متان در مشعل‌هاي محيط متخلخل غير همگن، هشتمين کنفرانس ديناميک شاره ها، ايران، تبريز، ۱۹-۱۷ شهريور ماه ۱۳۸۲.

[۲] Durst, F., Pickenacker, K. and Trimis D., *First Periodic Report of Compact Porous Medium Burner and Heat Exchanger for Household Application*, Contract NO. JOE3CT95-0019, 1996.

[۳] Ergun, S., *Fluid Flow Through Packed Columns*, hem. Engng. Prog., Vol. 48, pp. 89-94, 1952.

[۴] Gordon, S. and McBride, B. J., *CEC: Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks and Chapman-Jouguet Detonations*, NASA Report SP-273, 1971.

[۵] MacDonald, I. F., EI-Sayed, M. S., Mow, K. and Dullien, F. A. L., *Flow through Porous Media Ergun Equation Revisited*, Ind. Eng. Chem. Fund., Vol. 18, pp. 199-208, 1979.

[۶] Malico, I., Zhou, X. Y. and Pereira, J. C. F., *Two-Dimensional Numerical Study of Combustion and Pollutant Formation in Porous Burners*, Combust. Sci. and Tech.,Vol. 152, pp. 57-79, 2000.

[۷] Manara, J., *Aufbau Einer Apparatur Zur IR-Optischen Charakterisienung Von Proben Bei Hohen Temperaturen Unter Vakuum*. Physikalisches Institut der Universititat Wurzburg, 1997.

[۸] Mohamad, A. A., Viskanta, R. and Ramadhyani, S., *Numerical Predictions of Combustion and Heat Transfer in Packed Bed with Embedded Coolant Tubes*, Combust. Sci. and Tech., Vol. 96, pp. 387-407, 1994.

[۹] Nicol, D. G., Malte, P. C., Hamer, A. J., Roby, R. J. and Steele. R. C., *Development of a Five-Step Global Methane Oxidation-NO Formation Mechanism for Lean Premixed Gas Turbine Combustion*, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Trans. of ASME, Vol. 121, pp. 272-280, April 1999.

[۱۰] Pan, H. L., Pickenacker, O., Pickenacker, K., Trimis, D. and Weber, T., *5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*, Porto, April 11-14, 2000.

[۱۱] Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, *Hemisphere Publishing Corporation*, Taylor & Francis Group, New York, 1980.

[۱۲] Pereira, J. C. P. and Zhou, X. Y., *Numerical Study of Combustion and Pollutants Formation in Inert Nonhomogeneous Porous Media*, Combust. Sci. and Tech., Vol. 130, pp. 335-364, 1997.

[۱۳] Pickenacker, K., Brenner, G., Pickenacker, O., Trimis, D., Wawrzinek, K. and Weber, T., *Numerical and Experimental Investigation of Matrix Stabilized Methane - Air Combustion in Porous Inert Media*, Combustion and Flame, Vol. 123, pp. 201-213, 2000.

[۱۴] Turns, S. R., *An Introduction to Combustion: Concepts and Application*, 2nd ed., McGraw-Hill, 2000.

[۱۵] http://www.lstm.uni-erlangen.de