

# بررسی عددی انتشار آلاینده های احتراق هوا- متان در یک مشعل محیط متخلخل

مسعود ضیاء بشرحق<sup>۱</sup>؛ رضا ابراهیمی<sup>۲</sup>؛ محمدرضا رجائی<sup>۳</sup>

## چکیده

در مشعل‌های محیط متخلخل دمای ناحیه احتراق در مقایسه با مشعل‌هایی که شعله آزاد دارند، پائین تر است، که این امر باعث کاهش انتشار NO<sub>x</sub> در این مشعل‌ها می‌شود. به علاوه، چون محیط متخلخل سبب می‌شود که فرصت کافی برای احتراق وجود داشته باشد، انتشار CO و هیدروکربن‌های نسوخته نیز کاهش می‌یابند. در این پژوهش، میزان انتشار آلاینده‌ها در یک مشعل متخلخل یکپارچه با مبدل حرارتی با توان 5 kW مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات ناویراستوکس، انرژی و بقای اجزاء شیمیائی در یک محیط متخلخل با فرض تعادل حرارتی موضعی بین فازهای جامد و گاز، حل شده است. میدان دمای دو بعدی و غلظت اجزاء شیمیائی برای احتراق پیش مخلوط هوا- متان ارائه شده و تأثیر هوای اضافی بر روی انتشار CO و NO مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر پیش بینی شده برای CO و NO تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی داشته و همچنین از لحاظ کمی و کیفی به برخی از مدل سازی‌ها برتری دارد.

## کلمات کلیدی

احتراق، آلاینده ها، محیط متخلخل، مدل سازی عددی 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 NO<sub>x</sub> 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-Stokes, 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.

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ تهران، میدان ونک، خیابان پردیس، پلاک ۱۷؛  
Email: mzia@kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛  
Email: rebrahimi@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛  
Email: m.r.rajaei@nioc.org

## KEYWORDS

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

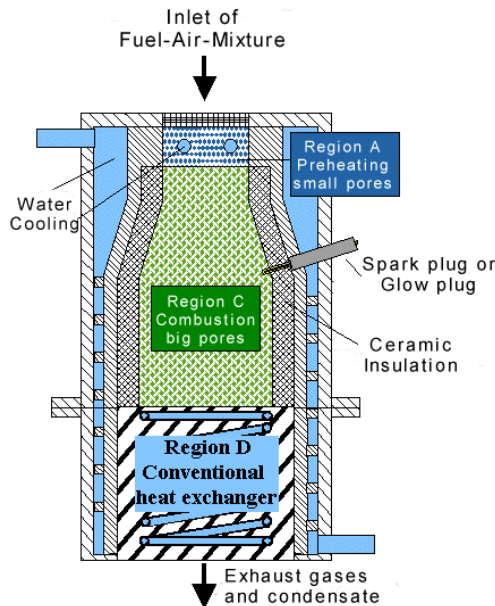
پیش گرم شده و به دمای اشتعال نزدیک می‌شوند. در این هنگام گازهای پیش مخلوط وارد ناحیه احتراق (C) شده و واکنش‌های شیمیائی فعال می‌شود. قسمت زیادی از گرمای واکنش، عمدتاً به وسیله انتقال حرارت تشعشعی و هدایت حرارتی از طریق مواد جامد به ناحیه پیش گرمایش (A) منتقل می‌شود و باقیمانده گرمای واکنش از طریق مواد جامد و گازهای محصولات احتراق به پائین دست جریان منتقل می‌شود. در پائین دست جریان معمولاً یک مبدل حرارتی (ناحیه D) به منظور جذب حرارت تولید شده قرار داده می‌شود. این مبدل با گردش آب، گرمای واکنش و در بعضی از شرایط با تقطیر بخار آب موجود در محصولات احتراقی، گرمای نهان تقطیر آب را نیز جذب می‌نماید.

مزایای متعدد احتراق در محیط متخلخل از جمله افزایش سرعت و پایداری شعله، افزایش نرخ حرارت رها شده بر واحد سطح و کاهش تشکیل NOx از نتایج مستقیم مکانیزم احتراقی یاد شده می‌باشد. به علاوه چون محیط متخلخل سبب می‌شود که فرصت کافی برای احتراق وجود داشته باشد و اختلاط بسیار مناسبی از گازهای احتراق ایجاد شود، انتشار CO و هیدروکربن‌های نسوخته نیز کاهش می‌یابد.

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. از آنجا که مدل سازی عددی، کمک مؤثری به توسعه و بهینه نمودن و طراحی این تکنیک و به خصوص مشعل‌های متخلخل می‌کند، مدل‌های عددی متفاوتی ارائه شده است. اغلب این مدل‌ها یک بعدی است و به بررسی سرعت و پایداری شعله و مکانیزم انتقال حرارت اختصاص یافته است. ابراهیمی و همکارانش [۱] یک مدلسازی دو بعدی با واکنش تک قدمی برگشت ناپذیر انجام داده‌اند. استفاده از واکنش عمومی تک قدمی اگرچه برای بسط فرآیند احتراق، روشی ساده و از لحاظ کامپیوتری ارزان قیمت است و سرعت شعله را نسبت به سینتیک چند مرحله‌ای، دقیق تر پیش بینی می‌کند، لیکن این روش در ارائه میزان انتشار آلاینده‌ها ناکارآمد است و باید از سینتیک چند مرحله‌ای استفاده شود. پریرا و همکارانش [۱۲] از اولین کسانی هستند که مدل‌هایی عددی برای تعیین میزان انتشار آلاینده‌ها در محیط متخلخل ارائه داده‌اند، البته در این پژوهش‌ها، جریان یک بعدی فرض شده است. محمد و همکارانش [۸] یک مدل دو بعدی (کارتزین) ارائه داده‌اند. آنها مشعل متخلخل همگنی را که توسط لوله‌های خنک کننده محصور شده بود، مدل نمودند.

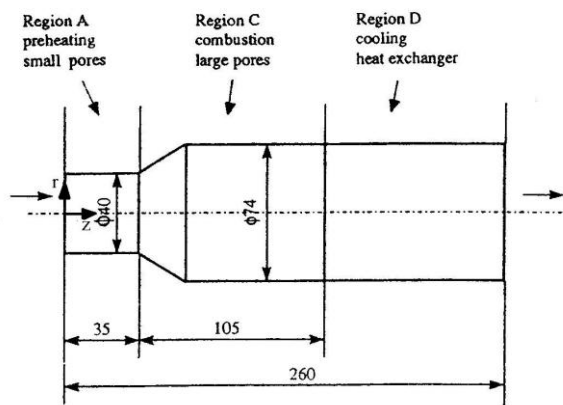
## ۱- مقدمه

امروزه کنترل و کاهش میزان آلاینده‌های خروجی از دستگاه‌های احتراقی در جهت حفظ منابع طبیعی و پاکیزگی محیط زیست به عنوان عاملی مهم در طراحی این دستگاه‌ها به شمار می‌رود. از این رو در دهه اخیر، روشهای زیادی به منظور کم کردن میزان آلاینده‌های دستگاه‌های احتراقی ابداع شده است. یکی از این روش‌ها، تکنیک احتراق در محیط متخلخل می‌باشد. در شعله‌های پیش مخلوط آزاد آرام، سرعت شعله و در نتیجه پایداری شعله و نرخ حرارت رها شده بر واحد سطح ورودی در یک سوخت معین، وابسته و محدود به هدایت حرارتی و تشعشع حرارتی مخلوط گاز می‌باشد. در مشعل‌های شعله آزاد، درجه حرارت به طور موضعی به دلیل ناکافی بودن دفع حرارت از ناحیه واکنش، بالا می‌باشد. این امر سبب افزایش تشکیل NOx می‌شود. با قرار دادن یک ماتریس متخلخل در محفظه احتراق، دفع حرارت از ناحیه واکنش بهتر انجام شده و از افزایش موضعی درجه حرارت جلوگیری و به تبع آن تشکیل NOx کاهش می‌یابد. شکل (۱) نمونه‌ای از این مشعل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۱): یک نمونه مشعل متخلخل [۱۵]

در این مشعل پیش مخلوط سوخت و هوا ابتدا وارد ناحیه پیش گرمایش (A) می‌شود. چون دمای مواد جامد بالاتر از دمای گازهای ورودی است، گازهای پیش مخلوط در حین عبور از خلل و فرج مواد متخلخل به واسطه انتقال حرارت جابجائی



شکل (۲): شماتیک مشعل متخلخل [۲]

این مشعل از سه قسمت پیش گرمایش (A)، ناحیه احتراق (C) و مبدل حرارتی (D) تشکیل شده است. ساختار خلل و فرج‌ها در قسمت‌های مختلف این مشعل به گونه ای طراحی شده است که در ناحیه (A) و (D) شعله منتشر نمی‌شود و تنها در ناحیه (C) امکان انتشار شعله وجود دارد. ناحیه پیش گرمایش و مبدل حرارتی از گوی‌های ناپیوسته اکسید آلومینیوم با قطرهای ۳ الی ۵ میلی متر تشکیل شده است. طول ناحیه (A) ۳۵ میلی متر و قطر آن ۴۰ میلی متر است. پیش مخلوط سوخت و هوا پس از پیش گرمایش در ناحیه (A) از طریق یک نازل و اگر وارد ناحیه احتراق می‌شود. ناحیه احتراق که شامل دیفیوزر و یک لوله با مقطع ثابت است، از فوم سرامیکی SiC با نسبت تخلخل ۱۰ ppi (تعداد سوراخ‌ها در یک اینچ) تشکیل شده است. حداکثر قطر داخلی این ناحیه ۷۴ میلی متر و طول آن ۱۰۵ میلی متر است. در پایان، محصولات احتراق وارد ناحیه (D) با طول ۱۲۰ میلی متر می‌شوند. دیواره‌های مشعل با آب، خنک می‌شود، لیکن برای داشتن احتراق کامل و دائمی، دور تا دور ناحیه احتراق و ورودی با استوانه سرامیکی عایق شده است.

### ۳- معادلات اساسی

با فرض جریان دائم، آرام و نیوتنی در یک محیط ایزوتروپ و بدون کاتالیست برای تمام مناطق مشعل، معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت محیط متخلخل را می‌توان به صورت روابط (۱) تا (۵) نوشت:

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

معادلات اندازه حرکت در دو امتداد محوری و شعاعی

در کار حاضر یک هندسه متقارن محوری دو بعدی بر اساس مشعل متخلخل آزمایشی درست و همکارانش [۲] که متصل به یک مبدل حرارتی است، مدل شده است. این مشعل قبلاً توسط مالیکو و همکارانش [۶] مدل سازی گردیده، لیکن آنها در تعیین میزان انتشار آلاینده ها چندان موفق نبودند زیرا محاسبات آنها میزان انتشار CO را کمتر و میزان انتشار NO را بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌داد. آنها با فرض عدم تعادل موضعی بین فازهای جامد و گاز دو معادله انرژی جداگانه برای این دو فاز در نظر گرفتند. این محققین از روش گام زمانی و یک روش عددی بر مبنای دو تکه کردن معادلات انرژی فاز گاز و بقای اجزاء شیمیایی، استفاده نمودند. این روش باعث کوپلینگ ضعیف معادلات شده و زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. بدین جهت آنها در عمل نتوانستند به یک همگرایی مناسب دست یابند. برای غلبه بر این محدودیت در پژوهش حاضر، معادلات انرژی و بقای اجزاء شیمیایی به صورت یکپارچه حل شده‌اند و با فرض تعادل حرارتی موضعی بین فاز جامد و گاز، یک معادله انرژی برای این محیط حل شده و از یک ضریب هدایت حرارتی مؤثر که به روش معکوس به دست آمده [۱۳]، استفاده شده است.

تعادل حرارتی موضعی بین فازهای جامد و گاز، استفاده از یک ضریب هدایت حرارتی مؤثر، به کار گرفتن مکانیزم کاهش یافته (پنج واکنش، هفت جزء شیمیایی) که سبب کاهش زمان محاسبات می‌شود و در نهایت حل یکپارچه معادلات انرژی و بقای اجزاء شیمیایی از نوآوری‌های پژوهش حاضر نسبت به کارهای قبلی به شمار می‌رود.

### ۲- مدل فیزیکی

در این پژوهش یک مشعل متخلخل نمونه که در دانشگاه LSTM ارلنگن- نورنبرگ توسط درست و همکارانش [۲] آزمایش و توسعه داده شده (شکل ۲) به صورت کامپیوتری شبیه سازی شده و نتایج آن با آزمایشات آنها مقایسه شده است.

اکسید آلومینیوم و SiC در جدول (۱) ارائه شده است. برای محاسبه خواص ترمودینامیکی از معادلات چند جمله ای کد تعادل شیمیائی ناسا [۴] استفاده شده است. کلیه خواص انتقالی از جمله ضریب لزجت و ضریب نفوذ، غیر ثابت فرض شده است [۱۴].

#### ۴- مکانیزم شیمیائی احتراق

در این تحقیق از مکانیزم عمومی پنج قدمی اکسیداسیون متان همراه با تشکیل NO استفاده شده است. این مکانیزم دارای دقت بسیار بالائی است و توسط نیکول و همکارانش [۹] ارائه شده است. مکانیزم یادشده شامل پنج واکنش شیمیائی و هفت جزء شیمیائی مهم  $\text{CO}$ ،  $\text{H}_2\text{O}$ ،  $\text{CO}_2$ ،  $\text{O}_2$ ،  $\text{CH}_4$ ،  $\text{N}_2$  و NO می باشد که در جدول (۲) قابل ملاحظه است.

#### ۵- شرایط مرزی

در ورودی جریان، سرعت، دما و غلظت اجزاء شیمیائی مشخص است. در مقطع خروجی فرض می شود که گرادیان غلظت اجزاء شیمیائی صفر است و جریان به محیطی با فشار معین تخلیه می شود. سرعت محوری با استفاده از برآورده شدن معادله پیوستگی در سلول خروجی به دست می آید. گفتنی است که در کار حاضر فقط نواحی پیش گرمایش و ناحیه احتراق مدل شده است. بنابراین، می بایستی به ترتیب مناسبی، تأثیر میدل حرارتی بر روی میدان حل، مدل سازی شود. به دلیل آنکه در خروجی ناحیه احتراق چاه حرارتی ناشی از تشعشع حرارتی جامد به میدل حرارتی، قابل ملاحظه است، می توان در خروجی ناحیه احتراق یک تشعشع حرارتی از جامد به میدل حرارتی لحاظ نمود. در این مدل سازی میدل حرارتی، یک جسم سیاه با درجه حرارت معین در نظر گرفته شده است. چون خواص تشعشعی محیط متخلخل علاوه بر وابستگی به مواد جامد، به ساختار این محیط نیز وابسته است، بنابراین، برای رسیدن به بهترین شبیه سازی از نتایج آزمایشگاهی محاسبه ضریب صدور استفاده شده است. در کار حاضر از ضریب صدور مرجع [۷] استفاده شده است. رابطه ضریب صدور در جدول (۱) ارائه شده است. بر روی خط مرکزی شرط تقارن و در روی سطح دیواره ها شرط عمومی عدم لغزش و عدم نفوذپذیری در معادلات اندازه حرکت لحاظ شده است و گرادیان کسر جرمی در امتداد عمود بر سطح صفر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\Delta P}{\Delta X_i} \quad (2)$$

معادله انرژی

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j c_p T - \lambda_{eff,j} \frac{\partial T}{\partial x_j}) = \varphi \sum_{k=1}^{N_s} \dot{\omega}_k h_k W_k \quad (3)$$

معادله انتقال اجزاء شیمیائی

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_k - \rho D_{km} \frac{\partial Y_k}{\partial x_j}) = \varphi \dot{\omega}_k, \quad k=1,2,\dots,N_s \quad (4)$$

معادله حالت

$$\rho = \frac{\bar{W} P}{R_u T} \quad \bar{W} = \sum_{k=1}^{N_s} X_k W_k \quad (5)$$

$\varphi$  ضریب متخلخل،  $Y$  کسر جرمی،  $\dot{\omega}_k$  ترم چاه یا چشمه اجزاء شیمیائی،  $D_{km}$  ضریب نفوذ جزء  $k$  ام در مخلوط و  $h$  آنتالپی شده است. از انتقال انرژی در اثر نفوذ اجزاء شیمیائی صرف نظر است.  $\Delta P/\Delta X_i$  افت فشار ناشی از ماتریس متخلخل است که برای محاسبه آن از مدل ارگان [۳] که توسط مک دونالد و همکارانش [۵] اصلاح شده، استفاده شده است.

معادله انرژی بر مبنای تعادل حرارتی موضعی بین فاز جامد و گاز نوشته شده است. در این معادله برای انتقال حرارت بین جامد و گاز پارامتری بنام ضریب هدایت حرارتی مؤثر  $\lambda_{eff}$  تعریف شده است. ضریب هدایت حرارتی مؤثر مانند ضریب هدایت حرارتی مولکولی به کار گرفته می شود، با این تفاوت که این پارامتر شامل مکانیزم های مهم انتقال انرژی در محیط متخلخل می باشد. پن و همکارانش [۱۰] به طور آزمایشگاهی رابطه ای را برای ضریب هدایت حرارتی مؤثر تعیین نموده اند. آنها پروفیل درجه حرارت را در یک محیط متخلخل برای شرایط دائمی و به ازای دبی ها و درجه حرارت های ورودی مختلف اندازه گیری و از روش معکوس، ضریب هدایت حرارتی مؤثر را تخمین زدند. در روش معکوس، آنها ابتدا یک مقدار، برای هدایت حرارتی مؤثر شعاعی و محوری حدس زدند. سپس پروفیل درجه حرارت در محیط متخلخل را با فرض تعادل حرارتی موضعی با استفاده از یک کد حجم محدود محاسبه نمودند. آنها این کار را تا زمانی که خطای بین میدان اندازه گیری شده و شبیه سازی شده، حداقل شود ادامه دادند. این روند باعث می شود که رابطه ای برای ضریب هدایت حرارتی مؤثر به صورت تابعی از سرعت جریان (نرم) و درجه حرارت به دست آید. این ضریب برای ساختار

$$S_c = S^* - S_p T_p^* \quad (۱۴)$$

علامت \* نشان دهنده مقادیر تکرار قبل می‌باشد.

برای خطی کردن جمله چشمه معادله بقای اجزاء شیمیائی از روشی استفاده شده است که کسر جرمی بین حدود منطقی، یعنی صفر و یک باقی بماند. با فرض

$$S = S_c + S_p Y_p \quad (۱۵)$$

مقادیر  $S_c$  و  $S_p$  از روابط

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

$$\bar{Y}_p = 0 \quad S^* < 0 \quad (۱۷)$$

$$S_c = \frac{S^* \bar{Y}_p}{\bar{Y}_p - Y_p^*} \quad (۱۸)$$

$$S_p = -\frac{S^*}{\bar{Y}_p - Y_p^*} \quad (۱۹)$$

محاسبه شده‌اند.

## ۷- نتایج و بحث

### ۷-۱- سرعت محوری

در شکل (۳) تغییرات سرعت محوری روی خط تقارن نشان داده شده است. در روی جبهه شعله سرعت حدوداً ۲/۵ برابر سرعت ورودی افزایش یافته است. چون چگالی گاز به دلیل افزایش دما، روی جبهه شعله کاهش می‌یابد، در نتیجه با توجه به ثابت بودن دبی جرمی، سرعت روی جبهه شعله افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت، منطقی می‌باشد. چون در روی خط مرکزی، جریان گاز عمود بر جبهه شعله می‌باشد، سرعت گاز همان سرعت شعله می‌باشد، بنابراین، سرعت شعله برای ۶۰ درصد هوای اضافی در حدود ۱۰۹ cm/s پیش بینی شده است که این مقدار نزدیک ۶ برابر سرعت شعله آزاد آرام با ۶۰ درصد هوای اضافی ( ۱۷cm/s [۱۴] ) می‌باشد. که از مزایای احتراق در محیط متخلخل است. ابراهیمی و همکارانش [۱] بطور مشروح در مورد دلایل این افزایش بحث نموده‌اند.

برای محاسبه میدان جریان از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل [۱۱] که روشی نیمه ضمنی است، استفاده شده است. معادلات (۱) الی (۴) را می‌توان به صورت کلی معادلات بیضوی نوشت.

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

میدان حل به وسیله شبکه‌های با سازمان با المان‌های چهار ضلعی (۳۷\*۱۴۰) تقسیم بندی شده است (در این تعداد شبکه حل غیر وابسته به تعداد المانهای موجود شبکه است). از آن جایی که جمله چشمه در معادله انرژی به درجه حرارت و در معادله بقای اجزاء شیمیائی به کسر جرمی اجزاء وابسته است، می‌بایستی این وابستگی به یک شکل خطی بیان شود. جمله‌های چشمه اغلب موجب واگرایی می‌شوند و عموماً رسیدن به جواب همگرا شده بستگی به درست خطی کردن جمله چشمه دارد. در روش عددی حاضر، جمله چشمه معادله انرژی به صورت رابطه (۷) خطی شده است.

$$S = S_c + S_p T_p \quad (۷)$$

برای محاسبه  $S_p$  در آغاز باید قاعده اصلی منفی بودن این جمله رعایت شود، سپس چون در پایان قصد حل معادله انفصال [۱۱]

$$a_p \Phi_p = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b \quad (۸)$$

با ضرایب

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

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

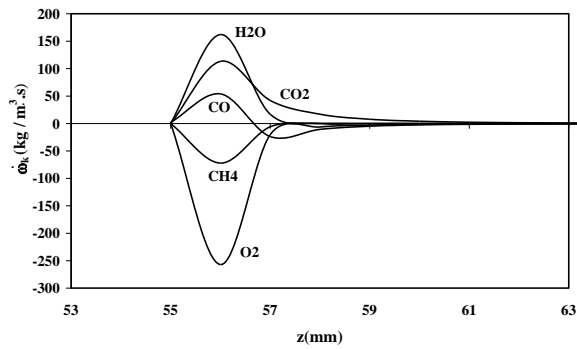
وجود دارد، بهتر است بزرگی  $S_p$  برابر بزرگی دیگر ضرایب معادله انفصال (۸) در نظر گرفته شود. این کار سبب می‌شود که بزرگی تمام ضرایب یکسان شود و مشکلاتی که در اثر غالب بودن  $S_p$  به وجود می‌آید، مرتفع شود. بنابراین، برای به دست آوردن  $S_p$  می‌توان چنین عمل نمود.

$$S_o = \text{Max} (a_E, a_W, a_S, a_N) \quad (۱۱)$$

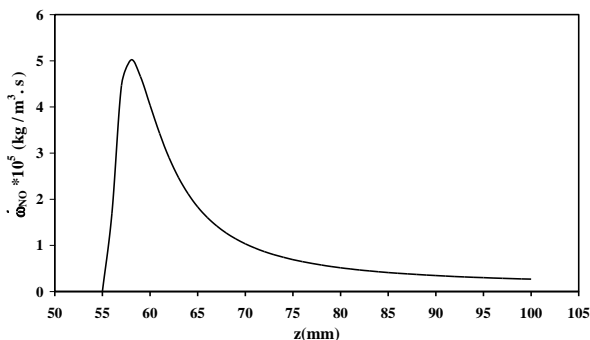
$$S_p r_i \Delta r \Delta z = - \left| S_o \right| \quad (۱۲)$$

در نتیجه،

$$S_p = - \frac{\left| S_o \right|}{r_i \Delta r \Delta z} \quad (۱۳)$$

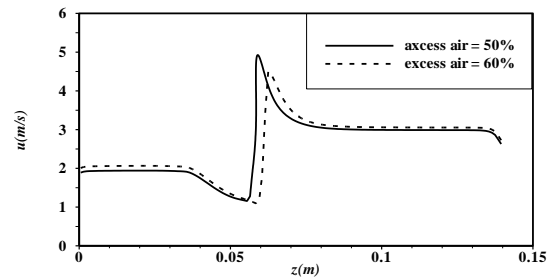


شکل (۶): منحنی تغییرات غلظت اجزاء شیمیائی بر روی خط مرکزی و برای توان ۵ kW و ۴۵٪ درصد هوای اضافی



شکل (۷): منحنی تغییرات غلظت NO بر روی خط مرکزی و برای توان ۵ kW و ۴۵٪ درصد هوای اضافی

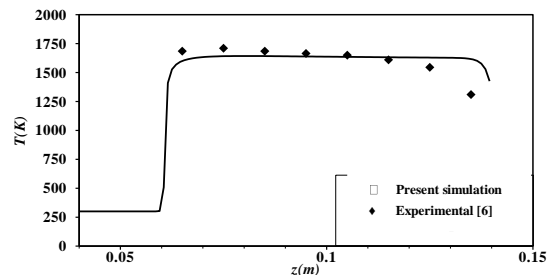
در شکل (۸) کسر جرمی اجزای شیمیائی در روی خط مرکزی و نزدیک و روی جبهه شعله ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود واکنشهای شیمیائی حدوداً در ۶۰ میلی متری ورودی فعال می‌شوند. نکته قابل توجه در اشکال (۶)، (۷) و (۸) آن است که کسر جرمی  $CH_4$  در طول ۲ میلی متر به سرعت کاهش و کسر جرمی  $H_2O$  در طول ۲ میلی متر به سرعت افزایش می‌یابد، و لیکن کسر جرمی دیگر اجزاء شیمیائی و به خصوص کسر جرمی NO، با سرعت کمتری تغییر می‌کنند. دیگر نکته قابل ملاحظه در این شکل تغییرات کسر جرمی CO می‌باشد. هنگامی که مخلوط شیمیائی فقیر باشد، یعنی هوای ورودی به سیستم بیشتر از هوای حالت استوکیومتری باشد، مخلوط کاملاً می‌سوزد و واکنش کامل می‌شود، در نتیجه CO پس از تشکیل شدن در جبهه شعله از بین می‌روند. بنابراین، غلظت جزء شیمیائی CO پس از تولید در جبهه شعله، به مرور کاهش می‌یابد. شکل‌های (۹) و (۱۰) که در انتهای مقاله آورده شده کانتورهای کسر جرمی دو آلاینده CO و NO را نشان می‌دهد.



شکل (۳): تغییرات سرعت محوری روی خط مرکزی برای توان kW ۵ و ۶۰٪ و ۵۰٪ هوای اضافی

## ۲-۷- درجه حرارت

شکل (۴) مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی درست و ترمیم [۲] و داده‌های پیش بینی شده را برای درجه حرارت خط تقارن نشان می‌دهد. درجه حرارت‌های پیش بینی شده در منطقه ورودی به مبدل حرارتی چندان با نتایج آزمایشگاهی مطابقت ندارد. این عدم تطابق بدین دلیل است که در ناحیه خروجی مشعل، مبدل حرارتی تنها به صورت یک چاه حرارتی مدل شده است، که برای رسیدن به نتایج بهتر می‌بایستی مبدل حرارتی نیز مدل شود.



شکل (۴): نتایج آزمایشگاهی [۲] و عددی درجه حرارت خط مرکزی برای توان ۵ kW و ۶۰٪ هوای اضافی

در شکل (۵) که در انتهای مقاله آمده است کانتور درجه حرارت برای ۶۰ درصد هوای اضافی و توان kW ارائه شده است.

## ۳-۷- کسر جرمی

شکل (۶) و (۷) منحنی تغییرات غلظت اجزای شیمیائی بر روی خط مرکزی را نشان می‌دهد.



همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد هوای اضافی، انتشار CO کاهش می‌یابد، زیرا که مقدار هوای کافی برای احتراق سوخت وجود دارد و بنابراین، میزان انتشار CO کاهش می‌یابد و می‌توان نتیجه گرفت که هیدرو کربنهای نسوخته نیز کاهش می‌یابد. افزایش تولید CO در اثر کاهش درصد هوای اضافی در مشعل مورد مطالعه علاوه بر دلیل یادشده علت فیزیکی دیگری نیز دارد، همان طور که از شکل (۱) مشخص است، ناحیه (A) از سوراخ‌های کوچکی تشکیل گردیده تا از انتشار شعله در این ناحیه جلوگیری شود. با کاهش درصد هوای اضافی متوسط درجه حرارت میدان و همچنین حداکثر درجه حرارت میدان افزایش می‌یابد، بنابراین، واکنش‌های احتراقی سریع‌تر فعال شده و به تبع آن مکان جبهه شعله به بالا دست جریان (ورودی) منتقل می‌شود، با انتقال مکان جبهه شعله به بالا دست جریان، احتمال تشکیل شعله در ناحیه (A) قوت می‌گیرد، از طرفی چون احتراق در محیط متخلخلی که دارای سوراخ‌های کوچکی می‌باشد، سبب عدم تکمیل احتراق و در نتیجه افزایش انتشار CO می‌شود، بنابراین، با تشکیل جبهه شعله در ناحیه (A) انتشار CO افزایش خواهد یافت. بطور خلاصه با کاهش درصد هوای اضافی، مکان جبهه شعله به تدریج به ناحیه (A) منتقل شده و در نهایت انتشار CO افزایش می‌یابد.

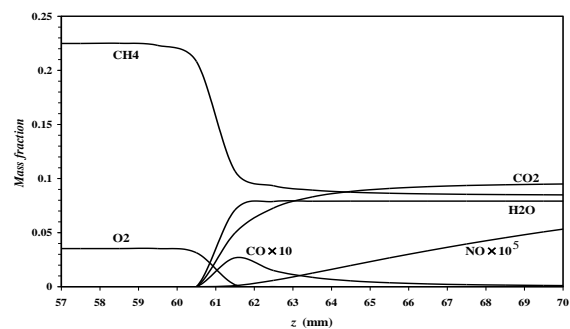
نتایج کسر جرمی NO در مدل سازی حاضر، اختلاف ناچیزی با مقادیر آزمایشگاهی [۲] دارد، همچنین این نتایج از لحاظ کیفی روند یکسانی با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در واقع چون با افزایش درصد هوای اضافی متوسط درجه حرارت میدان حل کاهش می‌یابد، بنابراین، مقدار انتشار NO نیز کاهش می‌یابد.

## ۸- خلاصه نتایج

در این پژوهش احتراق پیش مخلوط هوا - متان در داخل یک مشعل متخلخل به منظور تعیین میزان آلاینده‌های آن، به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مهم این تحقیق را می‌توان در قالب بندهای الف تا ه خلاصه کرد.

الف- از آنجا که با افزایش درصد هوای اضافی، مقدار هوای کافی برای احتراق سوخت وجود دارد میزان انتشار CO کاهش می‌یابد که نتایج مدل سازی نیز همین روند را نشان می‌دهد.

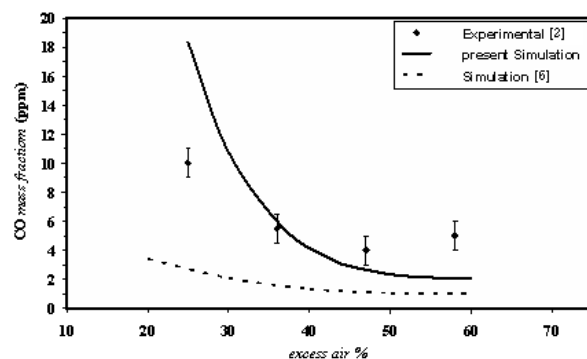
ب- در مشعل مورد مطالعه ناحیه (A) از سوراخ‌های کوچکی تشکیل شده است، به جهت آنکه احتراق در محیط متخلخلی که دارای سوراخ‌های کوچکی می‌باشد، سبب عدم تکمیل احتراق و



شکل (۸): کسر جرمی اجزاء نزدیک جبهه شعله برای توان ۵ kW و ۶۰٪ هوای اضافی (کسر جرمی CO در ده و کسر جرمی NO در صد هزار ضرب شده است)

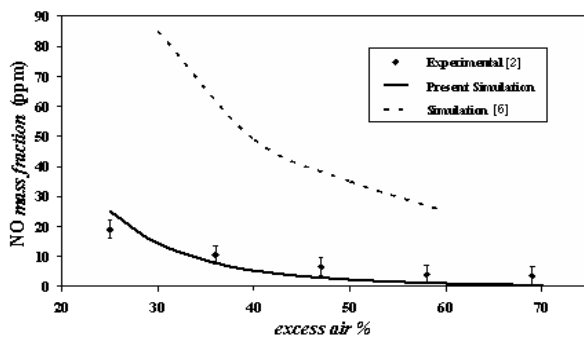
## ۷-۴- تأثیر درصد هوای اضافی بر روی کسر جرمی CO و

در شکل (۱۱) و (۱۲) تأثیر درصد هوای اضافی بر روی کسر جرمی CO و NO نشان داده شده و مقادیر پیش بینی شده، با نتایج آزمایشگاهی [۲] و نتایج حل عددی مالیکو و همکارانش [۶] مقایسه شده است.



شکل (۱۱): تأثیر درصد هوای اضافی بر روی کسر جرمی CO برای مشعلی با توان ۵ kW

همان طور که ملاحظه می‌شود نتایج مدل سازی حاضر از لحاظ کمی و کیفی بر مدل سازی [۶] برتری دارد و به طور نسبی مطابقت بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل (۱۲): تأثیر درصد هوای اضافی بر روی کسر جرمی NO برای مشعلی با توان ۵ kW

ه- در مجموع انحراف نتایج این مدلسازی از مقادیر آزمایشگاهی برای کسر جرمی منواکسیدکربن و منواکسیدنیتروژن رضایت بخش می‌باشد، لیکن برای دسترسی به نتایج مطلوب‌تر، استفاده از مکانیزم‌های شیمیائی مناسب در محیط متخلخل مورد نیاز می‌باشد. باید این نکته را یادآور شد که بخشی از اختلاف بین آزمایشها و روش‌های عددی ممکن است ناشی از مسائل اساسی در مدل سازی باشد، از جمله می‌توان به محدود بودن درک فرآیندهای مکانیک سیالات، تشعشع و حرارت در محیط متخلخل و همچنین کمبود اطلاعات در زمینه خواص ترموفیزیکی (از قبیل خواص تشعشعی، ضریب انتقال حرارت و ...) اشاره نمود، که کار بیشتری را در این زمینه می‌طلبد.

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

ج- با افزایش درصد هوای اضافی تولید NO کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش درصد هوای اضافی، متوسط درجه حرارت میدان حل کاهش می‌یابد و نظر به دلیل تناسب تولید NO با درجه حرارت، میزان انتشار NO کاهش می‌یابد.

د- بسبب بزرگی قابل توجه ضریب هدایت حرارتی مؤثر از ضریب هدایت حرارتی گاز در شعله‌های آزاد، سرعت سوزش در شعله‌های محیط متخلخل بزرگتر از سرعت سوزش در شعله‌های پیش مخلوط آزاد می‌باشد، این مهم از مزایای احتراق در محیط متخلخل است و به طراح اجازه می‌دهد که در شرایط یکسان بتواند مشعل هائی کوچکتر از مشعل‌های شعله آزاد طراحی نماید.

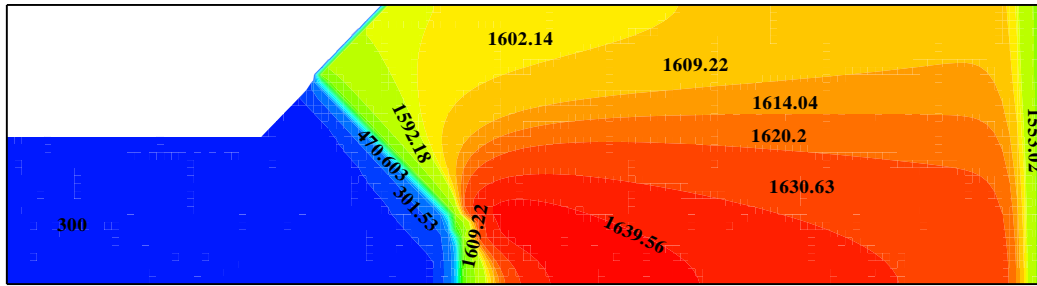
جدول (۱): خواص  $Al_2O_3$  و  $SiC$  [۱۳] و [۷]

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

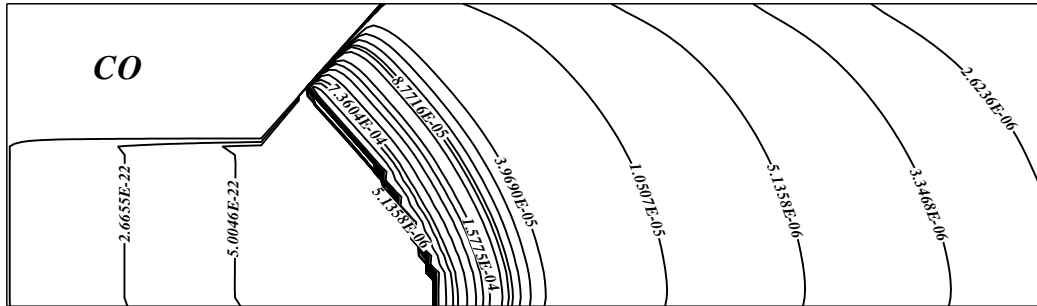
جدول (۲): مکانیزم اکسیداسیون متان همراه با تشکیل NO. (واحدها کیلو مول، متر مکعب، ثانیه و کلومین می‌باشند) [۹]

واکنش	نرخ واکنش
۱ $CH_4 + \frac{3}{2} O_2 \Rightarrow CO + 2H_2O$	$R_1 = 10^{15220} [CH_4]^{1.460} [O_2]^{0.5217} \exp\left(\frac{-20643}{T}\right)$
۲ $CO + \frac{1}{2} O_2 \Rightarrow CO_2$	$R_2 = 10^{14902} [CO]^{1.6904} [O_2]^{1.570} \exp\left(\frac{-11613}{T}\right)$
۳ $CO_2 \Rightarrow CO + \frac{1}{2} O_2$	$R_3 = 10^{14349} [CO_2]^{1.0} \exp\left(\frac{-62281}{T}\right)$
۴ $N_2 + O_2 \Rightarrow 2NO$	$R_4 = 10^{23946} [CO]^{0.7211} [O_2]^{4.0111} \exp\left(\frac{-53369}{T}\right)$
۵ $N_2 + O_2 \Rightarrow 2NO$	$R_5 = 10^{14967} T^{-0.5} [N_2] [O_2]^{0.5} \exp\left(\frac{-68899}{T}\right)$

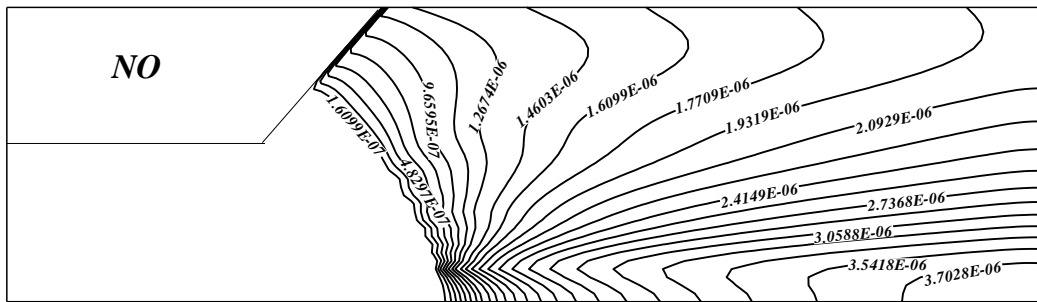




شکل (۵): کانتور درجه حرارت برای توان ۵ kW و ۶۰٪ هوای اضافی



شکل (۹): کانتور کسر جرمی CO برای توان ۵ kW و ۴۰٪ هوای اضافی



شکل (۱۰): کانتور کسر جرمی NO برای توان ۵ kW و ۴۰٪ هوای اضافی

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.

MacDonald, I. F., El-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.

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.

Manara, J., *Aufbau Einer Apparatur Zur IR-Optischen Charakterisierung Von Proben Bei Hohen Temperaturen Unter Vakuum*. Physikalisches Institut der Universität Würzburg, 1997.

[۴]

[۵]

[۶]

[۷]

## ۹- مراجع

[۱] ابراهیمی، رضا، ضیاء بشرحق، مسعود و رجائی، محمد

رضا، بررسی عددی احتراق هوا-متان در مشعل‌های محیط متخلخل غیر همگن، هشتمین کنفرانس دینامیک شماره ۱۹، ایران، تبریز، ۱۷-۱۹ شهریور 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.

- 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. [۱۲]
- 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. [۱۳]
- Turns, S. R., *An Introduction to Combustion: Concepts and Application*, 2nd ed., McGraw-Hill, 2000. [۱۴]
- <http://www.lstm.uni-erlangen.de> [۱۵]
- 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. [۸]
- 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. [۹]
- 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. [۱۰]
- Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, New York, 1980. [۱۱]