

## بررسی عددی اثرات زاویه واگرایی و طول ناحیه پیش‌گرمایش، بر روی احتراق و ایجاد آلاینده‌ها در مشعل محیط متخلخل

ایمان محمدی<sup>۱</sup> و حسین عجم<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، iman2960@gmail.com

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، h.ajam@um.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۶/۲۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۹/۱۸، پذیرش: ۹۷/۹/۲۳

**چکیده:** در این مقاله نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی و متقارن محور احتراق پیش‌آمیخته متان- هوا با سینتیک چندمرحله‌ای در داخل محیط متخلخل با تغییر تخلخل پیوسته ارائه شده است که در آن برای مشخص کردن 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 استفاده شده است. مشعل مورد مطالعه شامل دو ناحیه پیش‌گرم و احتراقی است. در این کار به بررسی اثرات تغییر زاویه واگرایی و طول ناحیه پیش‌گرمایش مشعل بر روی پروفیل دما و انتشار آلاینده‌ها می‌پردازیم. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه واگرایی میزان آلاینده NO در خروجی مشعل به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد درحالی‌که با افزایش طول ناحیه پیش‌گرمایش مقدار انتشار این آلاینده در خروجی کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** مشعل محیط متخلخل، تخلخل متغیر، احتراق متقارن محور، روش حجم محدود، سینتیک شیمیایی، زاویه واگرایی

### مقدمه

امروزه صرفه‌جویی در مصرف سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌ها از اهداف اصلی بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌هایی است که در آن‌ها از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌شود. مشعل‌ها از جمله مواردیست که کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها در آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. احتراق در محیط متخلخل یکی از روش‌های احتراقی جدیدی است که به سرعت در حال جایگزینی روش‌های احتراق متداول است. در این روش به دلیل یکنواخت بودن احتراق، بازده احتراق بالاتر بوده و آلاینده‌های آن نیز کمتر است. احتراق در محیط متخلخل نسبت به سیستم‌های احتراقی پیشین دارای مزایای بی‌شماری است که از آن میان می‌توان به کاهش میزان انتشار CO و هیدروکربن‌های نسوخته به علت احتراق کامل در محیط متخلخل، جلوگیری از افزایش موضعی درجه حرارت و کاهش تشکیل NO<sub>x</sub> به علت بهبود دفع حرارت از ناحیه واکنش، پوشش گسترده وسیعی از توان‌های موردنیاز توسط این مشعل‌ها، افزایش سرعت شعله به دلیل بهتر شدن انتقال حرارت به پیش مخلوط ورودی، کوچک‌تر شدن ابعاد این مشعل‌ها در مقایسه با مشعل‌های متداول و انتخاب و طراحی آزاد و راحت آن برای کاربردهای مختلف اشاره کرد.

یکی از نخستین کاربردهای مواد متخلخل در مشعل به سال ۱۹۸۲ برمی‌گردد که در آن اچیگو<sup>[۱]</sup>، باز یافت انرژی از گازهای خروجی دستگاه‌های با دمای بالا را مدنظر قرار داد. وی دریافت که با این کار می‌توان قسمت اعظمی از انرژی حرارتی گاز را از طریق جابه‌جایی به محیط متخلخل منتقل کرد و همچنین با افزایش درجه حرارت گاز ورودی، کارایی لایه محیط

متخلخل در امر بازیافت انرژی بیشتر می‌شود. بعد از آن در سال ۱۹۸۴ ونگ وتین [۲]، مطالعاتی را در همین زمینه با استفاده از روش دو شار حرارتی برای معادلات انتقال حرارت تشعشی و با در نظر گرفتن پخش انرژی تشعشی توسط محیط متخلخل انجام دادند و دریافتند که پخش انرژی تشعشی توسط لایه متخلخل سبب می‌شود که میزان انرژی جذب شده توسط محیط متخلخل از طریق جابه‌جایی کمتر شده و باعث کاهش بازده لایه محیط متخلخل در امر بازیافت می‌شود. در سال ۲۰۰۳ تالاکدر [۳]، و همکارانش، رفتار حرارتی مشعل‌های متخلخل را در دو حالت کارکرد دائم و گذرا با در نظر گرفتن یک سیستم دوبعدی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه اثرات نشر انرژی تشعشی توسط محیط متخلخل نیز مدنظر قرار گرفت و از روش ابعاد فروریخته<sup>۱</sup> جهت تعیین توزیع شار تشعشی در داخل مشعل متخلخل کمک گرفته شد. آن‌ها دریافتند که بیشترین میزان تشعشع خروجی برای دیوارهای سیاه اتفاق می‌افتد و همچنین در مقایسه با تشعشع و هدایت جامد می‌توان از هدایت مخلوط گاز صرف‌نظر کرد. در سال ۲۰۰۶ میسرا [۴]، و همکاران، برای آنالیز حرارتی مشعل‌های متخلخل تابشی چهارگوش یک سیستم دوبعدی با ۱۶۴ واکنش و ۲۰ گونه شیمیایی در نظر گرفتند و معادلات انرژی جداگانه‌ای برای فاز گاز جامد حل شد. آن‌ها نشان دادند که تعادل حرارتی در فاصله کوتاهی از ورودی برای مقادیر طول مشخصه (قطر حفره ریزتر) اتفاق می‌افتد و همچنین پیک دمایی جامد برای مقادیر بزرگ‌تر ضریب جذب، بیشتر است. آودیک و همکاران [۵]، در سال ۲۰۱۰ به مطالعه تجربی احتراق در یک محیط متخلخل برای مصارف خانگی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از مشعل متخلخل می‌تواند توان حرارتی را تا ۸ برابر مشعل‌های معمولی افزایش دهد و مقادیر CO و NO<sub>x</sub> را کاهش دهد. در کار دیگری در همین سال، بیدی [۶]، و همکاران به بررسی عددی پایداری شعله و بهینه‌سازی مشعل از نظر تولید آنتروپی پرداخته‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که شعله بیشتر در نیمه بالادست محیط متخلخل پایدار می‌شود و تولید آلاینده‌گی در این حالت کمتر از وقتی است که شعله در نیمه پایین‌دست جریان پایدار می‌شود. موجیبو و همکارانش [۷]، در سال ۲۰۱۱، به بررسی دو مشعل گازمایع پیش اختلاط متفاوت و دولایه برای کارکردهای خانگی پرداختند. در یکی از این مشعل‌ها، شعله در داخل محیط متخلخل و در دیگری بالای سطح (بالای سطح متخلخل و چسبیده به آن) تشکیل می‌شود. آن‌ها ثابت کردند که مشعل با شعله سطحی برای کارکردهای پخت‌وپز مناسب‌تر است زیرا در پخت‌وپز مطلوب است که شعله به‌اندازه کافی تا بالای سطح محیط متخلخل ادامه داشته باشد. یوکسناکول و همکاران [۸]، در سال ۲۰۱۱ یک مشعل محیط متخلخل ساختند که به‌علت نازلی شکل بودن مسیر اختلاط عمل مکش به‌صورت طبیعی رخ می‌داد، آن‌ها مشعل خود را "مشعل متخلخل خود مکش" نامیدند. در همین سال شارما و همکارانش [۹]، به‌طور آزمایشگاهی به مطالعه اجاق نفتی اصلاح‌شده‌ای پرداختند که در آن یک سپر گرمایی آلومینیومی و محیط تابشی متخلخل از جنس زیرکونیا در ناحیه احتراق به‌کاررفته بود. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که این اصلاحات منجر به ۱۵ درصد افزایش بازده می‌شود. در همین سال پانتانگی و همکاران [۱۰]، و ماتکومار و همکارانش [۱۱]، اقدام به ساخت یک مشعل دولایه کردند که در کار پانتانگی ناحیه پیش‌گرمایش توسط توپ‌های آلومینیومی ۵ میلی‌متری و ناحیه احتراق از سیلیکون کاربرد با ۹۰ درصد تخلخل و در کار ماتکومار ناحیه پیش‌گرمایش از سرامیکی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و تخلخل ۴۰ درصد و ناحیه احتراقی مشابه تشکیل شده بود. آن‌ها تأثیر قطر مشعل، ضخامت جدار قالب مشعل و طول قالب‌های متخلخل را مورد آنالیز قرار دادند و دریافتند که این تغییر در ناحیه پیش‌گرمایش سبب افزایش راندمان می‌شود. در سال ۲۰۱۳ محمدی و حسین‌پور [۱۲] به بررسی اثرات مکانیزم‌های شیمیایی و دمای دیواره بر روی عملکرد مشعل‌های محیط متخلخل با تخلخل ثابت در دو ناحیه پیش‌گرمایش و احتراقی پرداختند. آن‌ها دریافتند که مکانیزم‌های شیمیایی تأثیر چندانی بر روی پروفیل دمایی نخواهد داشت و هر چه مکانیزم‌های شیمیایی کامل‌تر می‌شود میزان انتشار آلاینده NO به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌شود. آن‌ها همچنین دریافتند که با افزایش دمای دیواره مقدار بیشینه دما و به‌تبع آن انتشار آلاینده NO در خروجی مشعل افزایش می‌یابد. آن‌ها در ادامه تحقیقاتشان در سال ۲۰۱۴ به بررسی اثرات پروفیل‌های تغییر تخلخل بر روی عملکرد و انتشار آلاینده‌ها در مشعل پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که با اعمال پروفیل تغییر تخلخل پیوسته به‌جای تخلخل ثابت در دو

1. Collapsed dimension

ناحیه پیش گرمایش و احتراقی، مقدار بیشینه دما و به تبع آن میزان انتشار آلاینده NO در خروجی مشعل کاهش می یابد [۱۳].  
 وو و همکارانش [۱۴]، در سال ۲۰۱۴ یک مشعل محیط متخلخل با شعله مسطح گاز مایع را ساختند. انتخاب این حالت امکان رسیدن به دماهای بالاتر شعله را می دهد که منجر به انتقال حرارت بالاتری می شود. محیط متخلخل از جنس ساچمه های برنزی انتخاب شده بود. آن ها به طور آزمایشگاهی ثابت کردند که مشعل متخلخل دارای دامنه تنظیم توان بیشتری در مقایسه با مشعل شعله آزاد است. هاشمی و همکاران [۱۵]، در سال ۲۰۱۴ به بررسی پدیده برگشت شعله در مشعل های متخلخل پرداختند، آن ها با تغییر عواملی نظیر نسبت هم آری، نرخ آتش و ویژگی های محیط متخلخل پرش و نفوذ شعله در داخل محیط متخلخل را مورد ارزیابی تجربی قرار دادند. در سال ۲۰۱۵ در ادامه بررسی ها در مورد مشعل متخلخل به استفاده از محیط متخلخل برای پایدارسازی شعله غیرپیش آمیخته پرداختند، آن ها در نسبت هم آری ۰/۶۳ شعله پایدار به دست آوردند که تقریباً با نسبت هم آری تشکیل شعله پیش آمیخته در مشعل متخلخل برابر است [۱۶]. در سال ۲۰۱۷ گنجعلی خان نسب [۱۷] و همکارانش به مطالعه اثرات پارامترهای مختلف مانند ضخامت اپتیکی، ضریب تخلخل، نسبت هوای اضافی و نسبت پخش بر روی بازده تشعشع در مشعل های محیط متخلخل پرداختند. آن ها دریافتند که با افزایش ضخامت اپتیکی چون جذب انرژی به وسیله فاز جامد افزایش می یابد، بازده تشعشع نیز افزایش می یابد و با افزایش تخلخل، به علت کاهش سطح مخصوص بر واحد حجم فاز جامد، انرژی کمتری از فاز گاز به ماتریس جامد منتقل شده که منجر به کاهش بازده تشعشع می شود، همچنین با افزایش نسبت هوای اضافی و نسبت پخش، بازده تشعشع کاهش می یابد و با افزایش نسبت هوای اضافی، دمای بیشینه و همچنین مقدار آلاینده های CO و NO در محصولات احتراق کاهش می یابد.

در کار حاضر سعی بر این است تا تأثیر زاویه واگرایی و طول ناحیه پیش گرمایش را بر عملکرد مشعل های محیط متخلخل مورد بررسی قرار دهیم که برای این کار برنامه ای به زبان فترن برای حالت دوبعدی و متقارن محور و مکانیزم های چندمرحله ای (GRI.2.11) مکانیزمی شامل ۴۹ گونه و ۲۷۹ واکنش شیمیایی به کار برده می شود.

### مشعل مورد مطالعه

مخلوط سوخت و هوا ابتدا وارد ناحیه 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 به واسطه انتقال حرارت جابه جایی پیش گرم شده و به دمای اشتعال نزدیک می شوند در این هنگام مخلوط وارد ناحیه احتراق 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 به واسطه انتقال حرارت تشعشعی و هدایت حرارتی از طریق مواد جامد به ناحیه ورودی (پیش گرمایش) منتقل می شود و مابقی گرمای واکنش از طریق مواد جامد و گازهای محصولات احتراق به واسطه انتقال حرارت هدایت، تشعشع و جابه جایی به پایین دست جریان واگذار می شود.

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، مقادیر شعاع ورودی و خروجی و طول کلی مشعل ثابت و به ترتیب برابر ۱/۳ و ۱/۵ سانتی متر فرض می شود این در حالیست که مقادیر طول ناحیه پیش گرمایش (a) و زاویه واگرایی ( $\theta$ ) و به تبع آن طول ناحیه واگرایی (b) تغییر خواهد کرد.

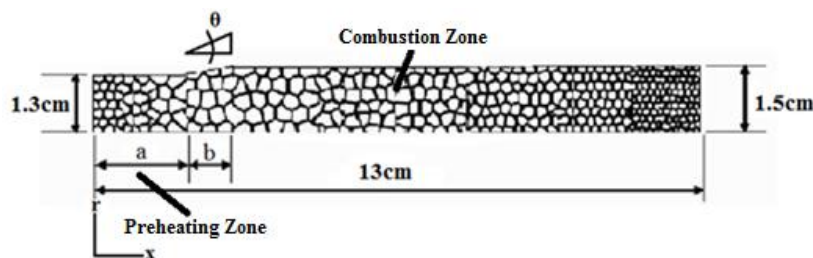


Figure 1- A schematic of a porous medium burner with variable porosity

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

برای مشعل با تخلخل متغیر تابع ۱ استفاده شده است که در آن X نشان دهنده طول مشعل است.

$$\begin{cases} 0.05X+0.6 & 0 \leq X \leq a \\ 0.15X+0.4 & a < X \leq a+b \\ -0.015X+0.895 & a+b < X \leq 13 \end{cases} \quad (1)$$

جدول ۱ مقادیر ضریب هدایت حرارتی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و قطر حفره ماده متخلخل به‌کاررفته در دو ناحیه پیش‌گرمایش و احتراقی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خصوصیات ترموفیزیکی ماده متخلخل مورد استفاده

Table1- Thermophysical properties of porous material used in this work

Properties	Preheating Zone	Combustion zone
Conductive coefficient	$0.1W/mK$	$0.5W/mK$
Convective coefficient	$1 \times 10^7 W/m^3K$	$1 \times 10^8 W/m^3K$
Pore diameter	0.55	0.6

### فرضیات به‌کاررفته در حل مسئله

- جریان سیال پایا، آرام و نیوتنی است.
- با توجه به تغییر تخلخل، برای محاسبه افت فشار و بقیه متغیرها در ماتریس متخلخل همچنان معادله داریسی<sup>۱</sup> و فورهایمر<sup>۲</sup> برقرار است.
- اثرات نیروی حجمی ناچیز است.
- اثرات سورت و دوفور صرف‌نظر شده است.
- از اثرات کاتالیزوری ماده متخلخل در دمای بالا صرف‌نظر شده است.
- شرط عدم تعادل بین فاز جامد و گاز در نظر گرفته شده است که این دو معادله به‌وسیله ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی که دلالت بر انتقال حرارت جابه‌جایی بین دو فاز دارد، به هم مرتبط می‌شوند [۱۸].

### معادلات حاکم

با توجه به فرضیات مسئله معادلات حاکم به‌صورت زیرند [۲۰-۱۳، ۱۲، ۱۸]

#### ۱- معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot (\rho V_s) = 0 \quad (2)$$

#### ۲- معادلات تکانه

$$\nabla \cdot (\rho u V_s) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_x \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho v V_s) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial r} - \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_r \quad (4)$$

که  $\mu$  لزجت دینامیکی مخلوط گازها،  $\rho$  چگالی مخلوط گازها و  $\frac{\partial P}{\partial x}$  و  $\frac{\partial P}{\partial r}$  به ترتیب افت فشار به‌علت لزجت در جهت‌های x و r هستند. در این معادلات ترم مربوط به افت فشار در داخل ماتریس متخلخل  $\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)$  از معادله فورهایمر که با توجه به شرایط مربوطه از معادله داریسی دقیق‌تر است به‌دست می‌آید و به‌صورت زیر نشان داده می‌شود.

1. Darcy  
2. Forchheimer

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_i = \frac{\mu}{K_1} V_s + \frac{\mu}{K_2} V_s |V_s| \quad (5)$$

که در آن  $K_1$  و  $K_2$  به ترتیب تانسورهای نفوذپذیری برای جریان آرام و درهم هستند و  $V_s$  بیانگر سرعت ظاهری<sup>۱</sup> است که در محیط متخلخل به صورت زیر تعریف می شود.

$$V_s = \varepsilon V \quad (6)$$

که  $\varepsilon$  بیانگر تخلخل ماده متخلخل است. با در نظر گرفتن فرض عدم تعادل موضعی بین فاز جامد و گاز، معادلات جداگانه ای را برای فاز گاز و جامد خواهیم داشت.

### ۳- معادله انرژی فاز گاز

$$\nabla \cdot (\rho V_s C_p T_f) = \nabla \cdot (\varepsilon \lambda_f \nabla T_f) + H(T_s - T_f) - \sum_{K=1}^{N_S} \dot{\omega}_K h_K \quad (7)$$

که  $H$  ضریب انتقال گرمای حجمی،  $T_s$  دمای ماده متخلخل،  $T_f$  دمای مخلوط گاز،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط گاز،  $\lambda_f$  و  $\rho$  به ترتیب ضریب هدایت گرمایی و چگالی مخلوط گازند.  $\dot{\omega}_K$  مربوط به نرخ تولید یا از بین رفتن گونه های شیمیایی به علت انجام واکنش های شیمیایی و  $h_K$  آنتالپی تشکیل گونه  $K$  ام است.

### ۴- معادله انرژی فاز جامد

$$\nabla \cdot \left( (1-\varepsilon) \lambda_{eff,i} \nabla T_s \right) + H(T_f - T_s) - Q_R = 0 \quad (8)$$

انتقال حرارت تشعشع در داخل ماتریس متخلخل به وسیله  $\lambda_{eff}$  و بین فاز جامد و محیط اطراف به وسیله  $Q_R$  مدل می شود. ضریب انتقال گرمای هدایت مؤثر ( $\lambda_{eff,i}$ ) شامل همه مکانیزم های اصلی انتقال انرژی در محیط متخلخل می شود و به هدایت حرارتی فازهای جامد و گاز، خواص تشعشعی هر دو فاز، فشار، دما، تخلخل و هندسه ماتریس متخلخل (شامل قطر مشخصه، شکل حفره و غیره) بستگی دارد که ضریب انتقال گرمای هدایت مؤثر ( $\lambda_{eff,i}$ ) به صورت زیر تعریف می شود.

$$\lambda_{eff,i} = \lambda_{eff}^{\circ} + \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot d}{K_i} \quad (9)$$

که در آن  $\lambda_{eff}^{\circ}$  به اکثر پارامترهای ذکر شده در بالا و به خصوص اثرات تشعشعی بستگی داشته و در آزمایشگاه به صورت تابعی از دما تعیین می شود. در معادله ۹ ترم اول انتقال گرمای هدایت و تشعشعی ماتریس متخلخل بدون وجود جریان و قسمت دوم مربوط به اثرات نفوذ همرفت است 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 هستند [۱۹-۲۱].

انتقال حرارت تشعشع بین فاز جامد و محیط اطراف به صورت زیر تعریف می شود:

$$Q_R = (1-\varepsilon) \cdot \frac{a C_B \cdot (T_s^4 - T_o^4)}{\Delta l} e^{-\psi x} \quad (10)$$

$$\psi = -\frac{1}{\Delta l} \ln \varepsilon$$

که  $\Delta l$  طول مشخصه است که می تواند به عنوان ثابت مدل تعریف شود.  $\psi$  ضریب خاموشی تشعشع برای ماتریس متخلخل،  $a$  ضریب جذب و  $C_B$  ضریب استفان-بولتزمن  $10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$  است.  $5,67 \times 10^{-8}$

1. Superficial

### ۵- معادله بقاء گونه‌های شیمیایی

$$\nabla \cdot (\rho V_S Y_k) = \nabla \cdot (\rho \varepsilon D_{km} \nabla Y_k) + \dot{\omega}_k, \quad K \in [1, N_S] \quad (11)$$

که  $N_S$  تعداد گونه‌های شیمیایی و  $D$  ضریب نفوذ جرم مخلوط گازی متشکل از  $N_S$  گونه شیمیایی است. ویژگی‌های ترموشیمیایی و ترموفیزیکی برای مخلوطی با  $N_S$  گونه توسط زیربرنامه ترن فیت<sup>۱</sup> و اطلاعات ترمودینامیکی پایه کمکین<sup>۲</sup> به دست می‌آید. نرخ تولید و یا ازبین رفتن گونه‌ها به دلیل واکنش‌های شیمیایی به عنوان ترم چشمه و چاه در معادلات انرژی گاز و انتقال گونه‌های شیمیایی وارد می‌شود.

$$\dot{\omega}_k = M_k \sum_{l=1}^{N_R} (v'_{kl} - v''_{kl}) K_1 \cdot \left( \prod_{\text{reactants}} C^{v'_{kl}} - \frac{1}{K_c} \prod_{\text{products}} C^{v''_{kl}} \right) \quad (12)$$

که  $N_R$  تعداد واکنش‌های شیمیایی،  $M_k$  وزن مولکولی،  $K_c$  ثابت تعادل شیمیایی،  $v'_{kl}$  و  $v''_{kl}$  ضرایب استوکیومتریک گونه‌های شیمیایی است که ضرایب استوکیومتریکی از طریق یک مکانیزم واکنشی به صورت معادله (۱۳) به هم مرتبط می‌شوند.

$$\sum_{k=1}^{N_S} v'_{kl} A_k \leftrightarrow \sum_{k=1}^{N_S} v''_{kl} A_k \quad (13)$$

ثابت ویژه سرعت واکنش  $K_1$  از رابطه آرنیوس به صورت زیر به دست می‌آید [۲۲].

$$K_1 = K_1^0 T^{\beta_1} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \quad (14)$$

$K_1^0$  فاکتور فرکانس برخورد<sup>۳</sup>  $\beta_1$  توان دما و  $E_1$  انرژی فعال‌سازی برای هر واکنش است که در سینتیک احتراقی مناسب تعیین شده است.

### شرایط مرزی

شرایط مرزی وارد بر هندسه مشعل به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

#### 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) هستند.

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

که در آن  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن که برابر  $5.67 \times 10^{-8}$  است،  $\varepsilon_r$  ضریب انتشار سطح و  $T_o$  دمای محیط که برابر ۳۰۰ کلوین در نظر می‌گیریم.

#### 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.

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

1. Tranfit  
2. Chemkin  
3. Collision frequency

### شرط مرزی دیوار

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

### شرط مرزی تقارن

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

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

### بررسی استقلال از مش بندی

در این مقاله برای بررسی استقلال از مش، شبکه بندی‌های مختلفی مورد بررسی قرار داده شد. نتایج نشان داد که تغییرات متغیرها با ریزتر شدن شبکه از مش ۲۶ × ۲۶ بسیار ناچیز و در حدود ۳٪ خواهد بود که در کارهای مهندسی قابل صرف نظر کردن است، بنابراین کلیه نتایج براساس مش ذکر شده گزارش شده است. جدول ۲ مقادیر عددی مربوط به دمای گاز را برای حالات مختلف مش بندی نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر دمای گاز برای نقاط آزمون مختلف با توجه به مش بندی‌های ذکر شده

Table2- Gas temperature values for the different test points according to the mentioned mesh

Grid Size	Test Point			
	X=4.5cm	X=6.5cm	X=8.5cm	X=11.5cm
160×13	522K	1350K	1650K	1655K
160×26	1410K	1740K	1750K	1370K
260×13	1422K	1752K	1760K	1765K
260×26	1573K	1950K	1952K	1952K
390×26	1588K	1979K	1991K	1990K

### بحث و نتایج

در این قسمت ابتدا به بررسی درستی نتایج پرداخته می‌شود و سپس برخی از اثرات زاویه واگرایی و طول ناحیه پیش گرمایش بر روی پروفیل‌های دما و میزان انتشار آلاینده‌ها در مشعل محیط متخلخل همراه با تخلخل متغیر پیوسته و سینتیک شیمیایی چندمرحله‌ای نشان داده می‌شود.

### صحت سنجی نتایج

در این قسمت به مقایسه و بررسی پروفیل‌های دما و کسر جرمی گونه NO با نتایج آزمایشگاهی آقای دورست و تریمیس پرداخته می‌شود [۲۳]. شکل ۲ چگونگی توزیع دمای گاز و ماتریس جامد را روی خط مرکزی مشعل برای سینتیک GRI-2.11 در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از دورست و تریمیس را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، دمای ماتریس جامد در قسمت بالادست واکنش بالاتر از دمای گاز است و همچنین دمای گاز و جامد در ناحیه احتراقی تقریباً بر هم منطبق هستند. یکی از مهم‌ترین مزایای مشعل‌های محیط متخلخل برتری آن‌ها در پیش گرمایش سوخت و هوا قبل از احتراق است. این پیش گرمایش عمده‌تاً توسط انتقال حرارت تشعشی در ماتریس متخلخل و انتقال آن به فاز گاز توسط انتقال حرارت جابه جایی و بخشی نیز توسط انتقال حرارت هدایت در طول ماتریس متخلخل انجام می‌شود. از آنجا که ضریب انتقال حرارت جابه جایی در ناحیه احتراقی بالا است، درجه حرارت محلی ماتریس متخلخل به جز ناحیه کوچکی در دمای پایین قبل از احتراق، برابر دمای فاز گاز است. بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و شبیه سازی آزمایشگاهی حدود ۵ درصد است. با توجه به

شکل ۲ بین نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی وجود دارد. در شکل ۳ کسر جرمی گونه NO برای نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی در مشعل محیط متخلخل با توان ۵KW و در فاصله ۶cm از ورودی مشعل به عنوان تابعی از نسبت هوای اضافی نشان داده شده است. بیشترین اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی عددی حدود ۸ درصد است که با توجه به استفاده از سینتیک شیمیایی Gri-2.11 در نتایج حاصل از شبیه سازی عددی، ضروری است که به منظور دستیابی به پیش بینی بهتر جهت انتشار NO از مکانیزم شیمیایی و میدان دمایی دقیق تری، استفاده شود. با توجه به شکل ۳ بین نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی اختلاف اندکی وجود دارد که می توان از آن صرف نظر کرد.

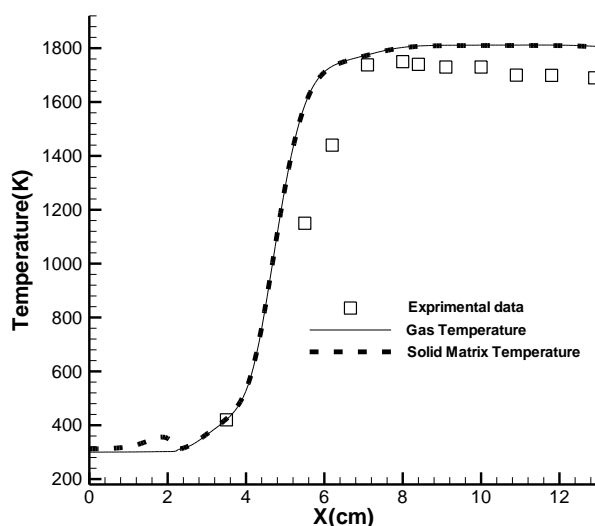


Figure 2- Comparison of temperature distribution obtained from kinetics GRI-2.11 with experimental results in a porous media burner with an excess air ratio of 1.5 [23]

شکل ۲- مقایسه توزیع دمای به دست آمده از سینتیک GRI-2.11 با نتایج تجربی در مشعل محیط متخلخل با نسبت هوای اضافی ۱٫۵

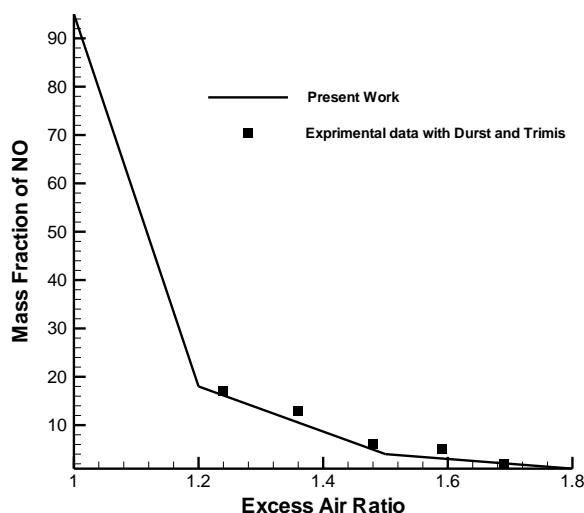


Figure 3- Comparison of mass fraction of NO species with experimental results in a porous media burner and Gri-2.11 chemical kinetics for different amounts of excess air ratio[23]

شکل ۳- مقایسه کسر جرمی گونه NO با نتایج تجربی در مشعل محیط متخلخل و سینتیک شیمیایی Gri-2.11 برای مقادیر مختلف نسبت هوای اضافی



## نتایج

## اثرات زاویه واگرایی مشعل

در جریان‌های احتراقی سرعت جریان را نمی‌توان از یک حد معین افزایش داد. چون اگر سرعت در ناحیه احتراق بیشتر از سرعت شعله باشد، امکان انتشار شعله وجود نخواهد داشت و جریان خفه خواهد شد. بنابراین چنانچه بخواهیم دبی بیشتری از مواد را بسوزانیم بایستی سرعت جریان را در ناحیه احتراق کاهش دهیم. به همین دلیل در این مشعل سطح مقطع ورودی به ناحیه احتراق افزایش داده شده است. تا سرعت جریان در این ناحیه کاهش یابد. به‌علاوه در صورت عدم وجود دیفیوزر، در توان‌های کم و بعضی از درصدهای هوای اضافی امکان انتشار شعله در ناحیه پیش‌گرمایش وجود خواهد داشت. بنابراین دیفیوزر طوری طراحی می‌شود که جبهه شعله در توان بیشینه، در خروجی دیفیوزر و یا بعد از آن قرار گیرد و در توان کمینه جبهه شعله در ورودی به دیفیوزر قرار گیرد. با توجه به مطالب فوق لزوم استفاده از یک دیفیوزر در مشعل محیط متخلخل به‌خوبی روشن است.

شکل ۴، نمودار مربوط به دمای گاز در طول مشعل را برای چند نمونه زاویه واگرایی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه واگرایی مقدار پیک دمای مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. این در حالی است که در منطقه احتراق دما به‌طور پیوسته برای زوایای واگرایی بزرگ‌تر، بیشتر خواهد بود. با توجه به شکل بیشترین اختلاف در مقادیر پروفیل‌های دمایی مربوط به ناحیه‌ای است که در آن جبهه شعله تشکیل می‌شود و برای مابقی طول مشعل مقادیر تقریباً یکسانی را نشان می‌دهد. ازدیاد درجه حرارت گاز قبل از رسیدن به ناحیه احتراق که باعث پیش‌گرم شدن گاز می‌شود، در شکل به‌روشنی دیده می‌شود.

شکل ۵، کسر جرمی گونه‌های شیمیایی اصلی را بر روی خط مرکزی مشعل با نسبت هوای اضافی ۱/۵ برای زوایای مختلف واگرایی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گاز متان به‌عنوان واکنش‌دهنده از مقدار اولیه مشخص در ابتدای واکنش به مقدار تقریباً صفر در انتهای واکنش رسیده است که نشان‌دهنده احتراق کامل گاز متان است. به‌علت وجود اکسیژن اضافی، مقدار آن در خروجی مشعل به صفر نرسیده است و همچنین مقادیر دی‌اکسید کربن و آب به‌عنوان فراورده‌های احتراق از صفر در ابتدای واکنش به یک مقدار ثابت در خروجی مشعل رسیده است. با توجه به شکل با کاهش زاویه واگرایی جبهه شعله به سمت پایین‌دست جریان انتقال می‌یابد.

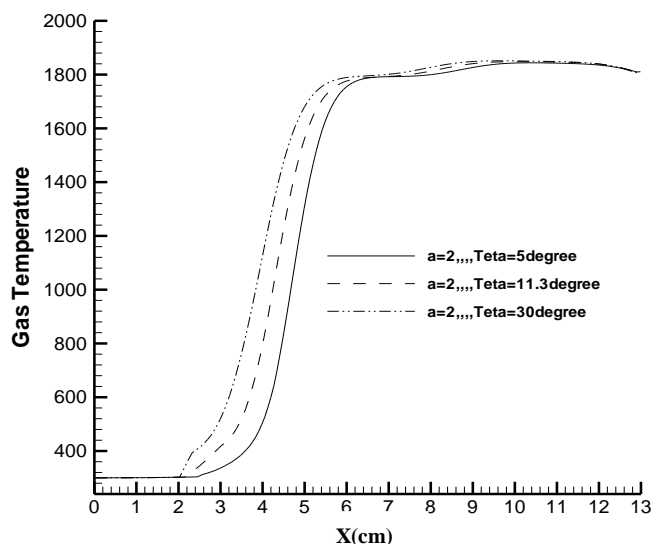


Figure 4- Gas temperature(K) diagram along the burner for different values of divergence angle

شکل ۴- نمودار دمای گاز در طول مشعل برای زوایای مختلف واگرایی

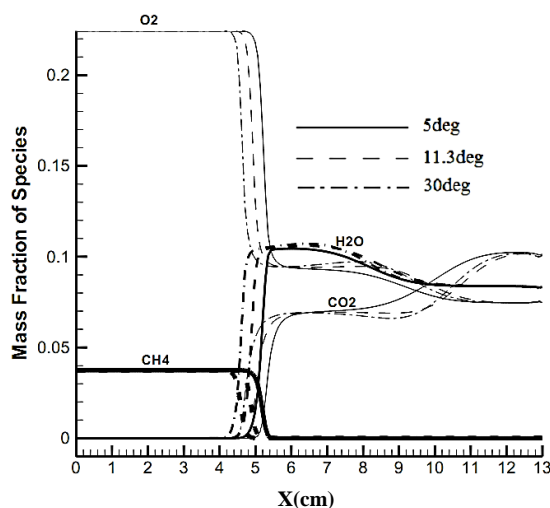


Figure 5- Mass fraction of the main species on the center line of the burner (symmetry axis) with an excess air ratio of 1.5 for different values of divergence angle

شکل ۵- نمودار کسر جرمی گونه‌های اصلی روی خط مرکزی مشعل (محور تقارن) با نسبت هوای اضافی ۱٫۵ برای مقادیر مختلف زاویه واگرایی

شکل ۶، مربوط به کسر جرمی گونه NO است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید با کاهش زاویه واگرایی میزان این آلاینده در خروجی مشعل به شکل چشم‌گیری کاهش می‌یابد. علت آن‌ها می‌توان این‌گونه توضیح داد، همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با کاهش زاویه واگرایی دمای حداکثر میدان و همچنین متوسط سطح درجه حرارت کاهش می‌یابد، کاهش سطح درجه حرارت میدان سبب کاهش تولید NO خواهد شد.

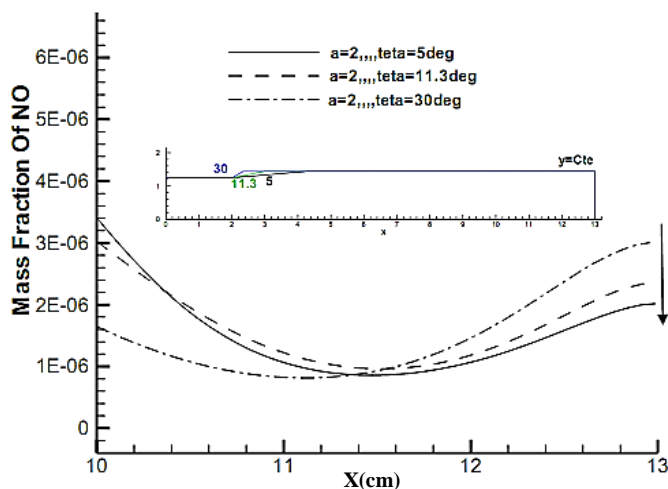


Figure 6- The mass fraction of the NO species for a burner with dimensions  $a = 2$  for several values of divergence angles

شکل ۶- کسر جرمی گونه NO برای مشعلی به ابعاد  $a=2$ cm برای چند نمونه از زوایای واگرایی

شکل ۷، نمودار کسر جرمی آلاینده CO را برای زوایای مختلف واگرایی نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش زاویه واگرایی مقدار انتشار این آلاینده در خروج از مشعل افزایش می‌یابد. چون مکان جبهه شعله به سمت بالادست جریان منتقل شده است. بنابراین احتراق در محیط متخلخل، که دارای حفره‌های کوچک‌تری است، اتفاق می‌افتد. این امر سبب عدم تکمیل احتراق و در نتیجه افزایش انتشار CO می‌شود. بنابراین می‌بایستی از عواملی که سبب انتقال مکان جبهه شعله به بالادست جریان (ناحیه پیش‌گرمایش که دارای حفره‌های کوچک‌تر در مقایسه با ناحیه احتراقی است) می‌شود، پرهیز کرد.

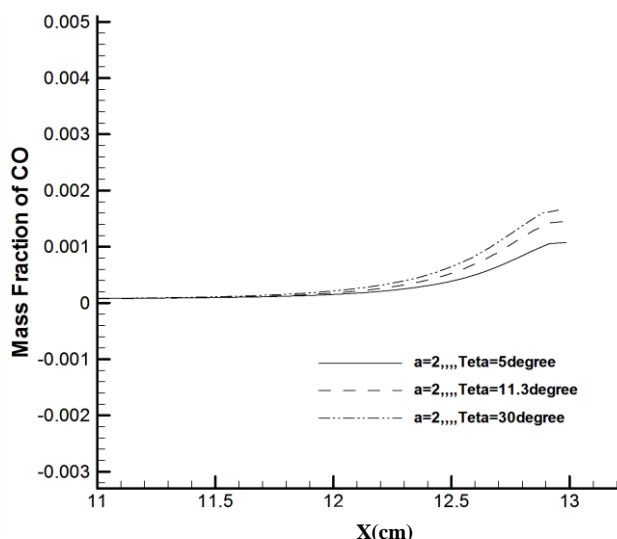


Figure 7- The mass fraction of the CO species for a burner with dimensions  $a = 2$  for several values of divergence angles  
 شکل ۷- کسر جرمی گونه CO برای مشعلی به ابعاد  $a=2\text{cm}$  برای چند نمونه از زوایای واگرایی

### اثرات طول ناحیه پیش گرمایش

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، هنگامی که طول ناحیه پیش گرمایش افزایش می یابد درحالی که طول مجموع ناحیه پیش گرمایش و ناحیه واگرایی ثابت فرض می شود پروفیل های دمایی تقریباً یکسانی را پیش بینی می کند این درحالی است که اگر طول ناحیه پیش گرمایش افزایش یابد و زاویه واگرایی ثابت فرض شود، پیک دمایی کاهش می یابد. همان گونه که در شکل مشاهده می شود مکان جبهه شعله در ناحیه واگرایی قرار دارد.

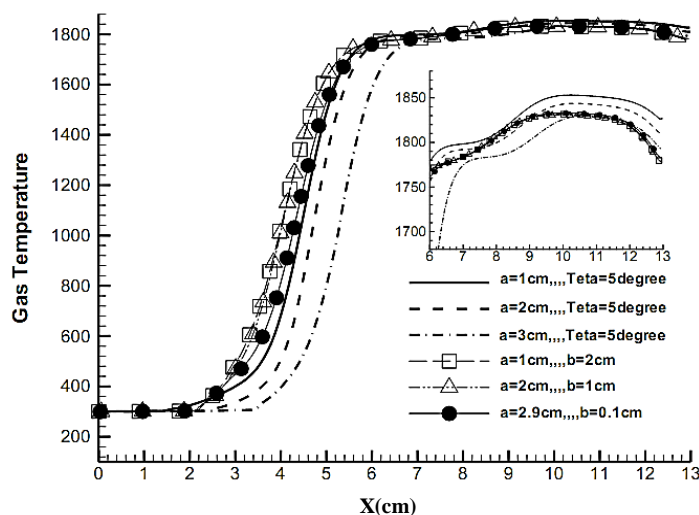


Figure 8- Gas temperature(K) diagram for several values of pre-heating area length  
 شکل ۸- نمودار دمای گاز برای چند نمونه از طول ناحیه پیش گرمایش

شکل ۹، نمودار کسر جرمی گونه های اصلی روی خط مرکزی مشعل (محور تقارن) با نسبت هوای اضافی  $1/5$  برای مقادیر مختلف طول ناحیه پیش گرمایش را نشان می دهد. با توجه به شکل با کاهش طول ناحیه پیش گرمایش و ثابت در نظر گرفتن زاویه واگرایی (۵ درجه) جبهه شعله به سمت بالادست جریان حرکت می کند.

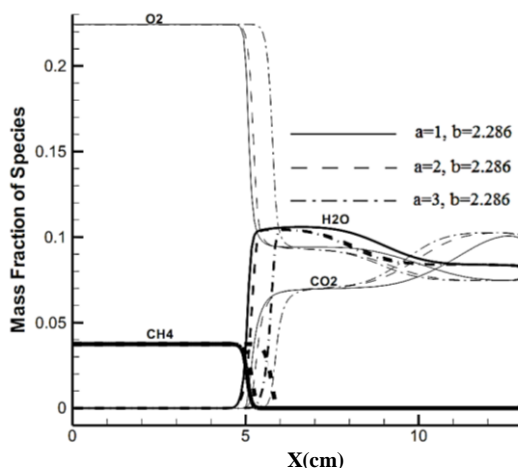


Figure 9- Mass fraction of the main species on the center line of the burner (symmetry axis) with an excess air ratio of 1.5 for different values of pre-heating area length

شکل ۹- نمودار کسر جرمی گونه‌های اصلی روی خط مرکزی مشعل با نسبت هوای اضافی ۱/۵ برای مقادیر مختلف طول ناحیه پیش‌گرمایش

شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نمودار کسر جرمی گونه‌های NO و CO را برای حالات مختلف طول ناحیه پیش‌گرمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هنگامی که مجموع طول ناحیه پیش‌گرمایش و ناحیه واگرایی ثابت باشند، مقدار انتشار این آلاینده‌ها در خروجی مشعل تقریباً ثابت فرض می‌شود. این درحالی است که با افزایش طول ناحیه پیش‌گرمایش، در حالی که زاویه واگرایی ثابت فرض شود، مقدار انتشار این آلاینده‌ها در خروجی مشعل کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۸، چون مکان جبهه شعله به پایین دست جریان منتقل شده است، پیک دمایی و همچنین متوسط سطح دمایی میدان کاهش می‌یابد، که این امر سبب کاهش انتشار NO به محیط اطراف خواهد شد. علت کاهش مقدار انتشار CO را می‌توان این‌گونه توضیح داد که چون با افزایش طول ناحیه پیش‌گرمایش و ثابت در نظر گرفتن زاویه واگرایی، احتراق در منطقه پایین دست جریان اتفاق می‌افتد، که دارای حفره‌های بزرگ‌تر در مقایسه با بالادست جریان است، احتراق کامل‌تر شده و به تبع آن مقدار CO بیشتری به CO<sub>2</sub> تبدیل می‌شود، بنابراین از مقدار انتشار آن در خروجی مشعل کاسته می‌شود.

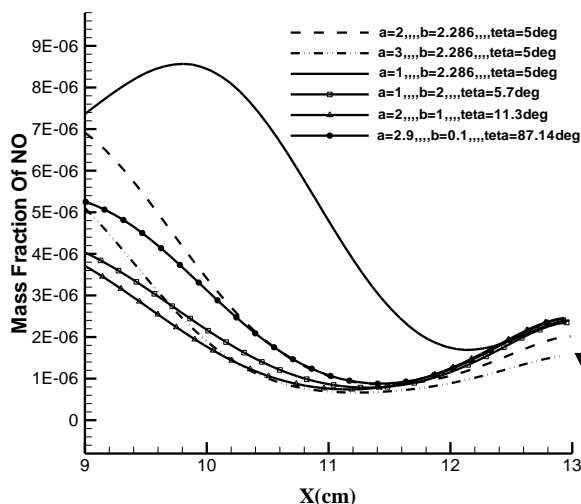


Figure 10- Mass fraction of NO species for several values of pre-heating area length

شکل ۱۰- کسر جرمی گونه NO برای چند نمونه از طول ناحیه پیش‌گرمایش

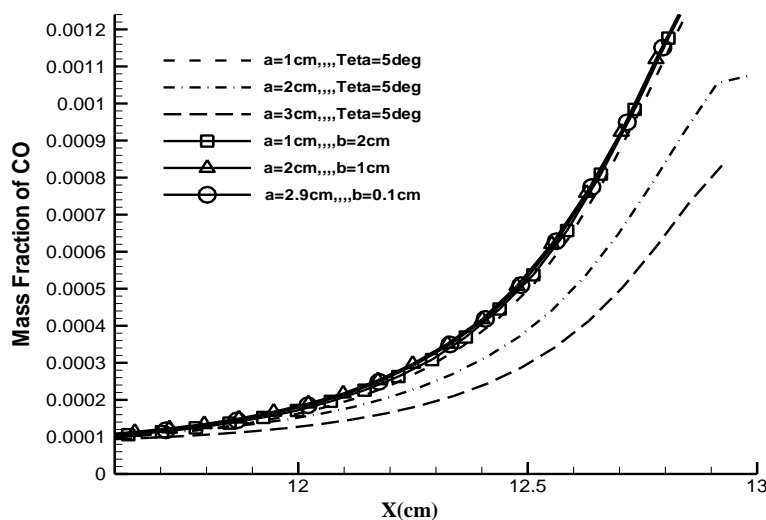


Figure 11- Mass fraction of CO species for several values of pre-heating area length  
 شکل ۱۱- کسر جرمی گونه CO برای چند نمونه از طول ناحیه پیش گرمایش

### نتیجه گیری

- با کاهش زاویه واگرایی، میزان انتشار آلاینده NO حدود ۴۰٪ کاهش پیدا می کند. این درحالی است که پیک دمایی تغییرات زیادی را نشان نمی دهد.
- با افزایش زاویه واگرایی جبهه شعله به سمت بالادست جریان انتقال می یابد، درحالی که با افزایش طول ناحیه پیش گرمایش و ثابت فرض کردن زاویه واگرایی، جبهه شعله به سمت پایین دست جریان حرکت می کند.
- با افزایش طول ناحیه پیش گرمایش درحالی که مجموع طول ناحیه پیش گرمایش و واگرایی ثابت فرض شود، مقدار انتشار آلاینده NO در خروجی مشعل تقریباً ثابت است.
- با افزایش طول ناحیه پیش گرمایش درحالی که زاویه واگرایی ثابت فرض شود، مقدار انتشار آلاینده NO در خروجی به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.

### منابع

1. R. Echigo, "Effective Energy Conversion Method Between Gas Enthalpy and Thermal Radiation and Application to Industrial Furnaces," *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Heat Transfer conf., München 6*, 1982, pp. 361-366.
2. K. Wang, and C. Tien, "Thermal Insulation in Flow System, Combined Radiation and Convection Through a Porous Segment," *J. of Heat Transfer*, 106, 1984, pp. 453-459.
3. P. Talukdar, S. Mishra, D. Trimis, and F. Durst, "Heat Transfer Characteristics of a Porous Radiant Burner under the Influence of a 2 D Radiation Field," *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2003, pp. 1-11.
4. S. C. Mishra, M. Steven, S. Nemoda, P. Talukdar, D. Trimis, F. Durst, "Heat Transfer Analysis of a Two-Dimensional Rectangular Porous Radiant Burner," *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 33, 2006, pp. 467-474.
5. F. Avdic, M. Adzic, F. Durst, "Small scale porous medium combustion system for heat production in households," *Appl. Energy*, 87, 2010, pp. 2148-2155.
6. M. Bidi, M. R. H. Nobari, M. Saffar Aval, "A Numerical Evaluation of Combustion in Porous Media by EGM (Entropy Generation Minimization)," *Energy*, 35, 2010, pp. 3483-3500.
7. M. A. Mujeebu, M. Abdullah, A. Mohamad, "Development of Energy Efficient Porous Medium Burners on Surface and Submerged Combustion Modes," *Energy*, 36, 2011, pp. 5132-5139.
8. W. Yoksenakul, S. Jugjai, "Design and Development of a SPMB (Self-Aspirating, Porous Medium Burner) with a Submerged Flame," *Energy*, 36, 2011, pp. 3092-3100.
9. M. Sharma, S. Mishra, P. Mahanta, "An Experimental Investigation on Efficiency Improvement of a Conventional Kerosene Pressure Stove," *International Journal Energy Clean Environment*, 12, 2011, pp. 79-93.

10. V. K. Pantangi, S. C. Mishra, P. Muthukumar, R. Reddy, "Studies on Porous Radiant Burners for LPG (liquefied petroleum gas) Cooking Applications," *Energy*, 36, 2011, pp. 6074-6080.
11. P. Muthukumar, P. Anand, P. Achdeva, "Performance analysis of porous radiant burners used in LPG cooking stove," *International Journal of Energy and Environment*, 2, 2011, pp. 367-374.
12. I. Mohammadi, S. Hossainpour, "Investigation of the effects of several porosity variation profiles on performance and pollutants emission of the porous media burners," *Fire and Materials*, 40, 2014, pp. 3-17.
13. I. Mohammadi, S. Hossainpour, "The effects of chemical kinetics and wall temperature on performance of porous media burners," *Heat and Mass Transfer*, 49, 2013, pp. 869-877.
14. C.Y. Wu, K.H. Chen, S.Y. Yang, "Experimental Study of Porous Metal Burners for Domestic Stove Applications," *Energy Conversion and Management*, 77, 2014, pp. 380-388.
15. S. A. Hashemi, M. Dastmalchi, M. Nikfar, "Experimental Study Flashback Phenomenon in Porous Ceramic," *Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)*, 46, 2014, pp. 25-35.
16. S. A. Hashemi, E. Noori, A. Aghaei, "Experimental Study of Non-Premixed Turbulent Flame Stabilization with Porous Medium," *Modares Mechanical Engineering*, 15, 2015, pp. 341-349.
17. H. Shabani Nejad, S. A. Gandjalikhan Nassab, E. Jahanshahi Javaran, "Numerical Study on Radiant Efficiency of a Porous Burner under Different Conditions," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 32, 2017, pp. 1-8.
18. I. Malico, X. Y. Zhou, and J. C. F. Pereira, "Two-dimensional Numerical Study on Combustion and Pollutants formation in Porous Burner," *Combust, Sci and Tech*, 152, 2000, pp.57-59.
19. K. Vafai, *Handbook of Porous Media*, United States, Taylor & Francis Group, LIC, 2005.
20. S. Nemoda, D. Trimis, and G. Zivkovich, "Numerical Simulation of Porous Burners and Hole Plate Surface Burners," *J. Thermal Science*, 8, 2004, pp. 3-17.
21. S. Decker, S. Mößbauer, S. Nemoda, D. Trimis and T. Zapf, "Detailed Experimental Characterization and Numerical Modelling of Heat and Mass Transport Properties of Highly Porous Media for Solar Receivers and Porous Burners," *6<sup>th</sup> International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment*, porto, portugal, 2000.
22. R. J. Kee, F. M. Rupley, and J. A. Miller, *The Chemkin Thermodynamic Data Base*, Sandia National Laboratories, Rept. SAND-8215B, 1992.
23. F. Durst, and D. Trimis, *Compact Porous Medium Burner and Heat Transfer Exchanger for Household Applications*, Ec project report, Contact no. JOEC-CT95-0019, 1996.

## English Abstract

### Numerical investigation of the effects of divergence angle, pre-heating zone length on the combustion and emission of pollutant in the porous media burner

Iman mohammadi<sup>1</sup> and hossein ajam<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, mashhad, Iran, iman2960@gmail.com

2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, mashhad, Iran, h.ajam@um.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2018.09.18, Received in revised form: 2018.12.09, Accepted: 2018.12.14.)

In this paper, the results of the two-dimensional and axisymmetric modeling of the methane-air pre-mixed combustion with multi-step kinetics in a porous medium with continuous porosity change have been presented. In order to determine the thermophysical and thermochemical properties of species, the CHEMKIN II program and Basic information used. Continuity equations, Navier Stokes, gas and solid phase heat transfer equations, and chemical species governing equations are solved by using of finite volume method. The SIMPLE algorithm has been used for the relationship between speed and pressure. The burner under the studied includes two preheated and combustible areas. In this paper, we study the effects of divergence angle changes and length of burner preheating area on temperature profiles and emission of pollutants. The results showed that by increasing the divergence angle, the amount of NO contamination in the burner output increases dramatically, while by increasing the length of the preheating region, the amount of emission of this pollutant in the output decreases.

**Keywords:** porous media burner, porosity variation, axisymmetric combustion, finite volume method, chemical kinetics, divergence angle